

## A Fuzzy Approach for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Time Windows using Improved PSO (Case Study)

Hamed Alinezhad 

MSc., School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Saeed Yaghoubi 

Associate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran..

Seyyed-Mahdi Hosseini-Motalgh 

Associate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Most studies on decision making issue have supposed the problem in deterministic environment, and because uncertainty makes the decisions taken suboptimal, so in this paper we propose a credibility based fuzzy model for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup and Time Windows (VRPSDPTW). The dispatching cost of vehicles and customers' time windows are supposed to be trapezoidal fuzzy numbers. We also proposed a hybrid meta-heuristic algorithm called Improved Particle Swarm Optimization (IPSO) for solving the problem. The proposed algorithm is the combination of Particle Swarm Optimization (PSO) and some removal and insertion techniques which helps to improve the searching ability and maintain diversity of solutions. Finally, to demonstrate the applicability of the proposed model in the real world we studied the distribution of dairy products among customers by a distribution company in Fars province. The computational results show that distributors can use this method to reduce operating costs of the company.


**Keywords:** Vehicle Routing Problem, Simultaneous Pickup and Delivery, Time Windows, Fuzzy Modeling.

Corresponding Author: yaghoubi@iust.ac.ir


How to Cite: Alinezhad, H., Yaghoubi, S., Hosseini-Motalgh, S. M. (2022). A Fuzzy Approach for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Time Windows using Improved PSO (Case Study), *Journal of Industrial Management Studies*, 20(64), 215-250.

## ارائه یک رویکرد فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی با استفاده از الگوریتم PSO بهبودیافته (مطالعه موردی شرکت فراورده‌های لبنی رامک)


کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

حامد علی نژاد \* 

دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

سعید یعقوبی 

دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

سید مهدی حسینی مطلق 

### چکیده

اکثر مطالعات موجود در مسائل تصمیم‌گیری مساله را در محیطی از داده‌های قطعی فرض نموده‌اند و با توجه به اینکه عدم قطعیت در زنجیره‌ی تامین منجر به غیربهبوده شدن تصمیماتی می‌گردد که با فرض قطعیت گرفته می‌شوند، لذا در این مقاله یک مدل فازی بر مبنای اعتبار برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن گذاشت و برداشت همزمان و همچنین پنجره‌های زمانی (VRPSDPTW) ارائه می‌شود. هزینه اعزام وسایل نقلیه و پنجره‌های زمانی مشتریان در حالت عدم قطعیت و در قالب اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی با نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته (IPSO) برای حل مساله استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و تکنیک‌های گذاشت و برداشت می‌باشد که موجب بهبود قابلیت جستجوی الگوریتم و همچنین حفظ تنوع جواب‌ها می‌گردد. در نهایت نیز برای نشان دادن کاربرد مدل ارائه شده در دنیای واقعی، به بررسی مساله توزیع محصولات لبنی توسط یک شرکت توزیع‌کننده بین مشتریان در استان فارس پرداخته‌ایم که نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که توزیع‌کنندگان می‌توانند با استفاده از این شیوه، هزینه‌های عملیاتی شرکت را کاهش دهند.

**کلیدواژه‌ها:** مساله مسیریابی وسایل نقلیه، گذاشت و برداشت همزمان، پنجره زمانی، مدل‌سازی فازی.

\* نویسنده مسئول: yaghoubi@iust.ac.ir

## مقدمه

مساله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) به دنبال یافتن مسیرهای بهینه با کمترین هزینه می‌باشد که در آن شروع و پایان تمامی مسیرها انبار می‌باشد. با کمک یک ناوگان از وسایل نقلیه همگن می‌خواهیم به تعدادی از مشتریان سرویس بدهیم به گونه‌ای که هر مشتری دقیقاً یک بار و توسط یک کامیون ملاقات شده و برخی محدودیت‌های جانبی نظیر ظرفیت وسایل نقلیه و محدودیت‌های زمانی نیز رعایت گردد. مساله VRP برای اولین بار توسط دانتزیگ و رامزر در منبع [۱] ارائه گردیده است و تاکنون مقاله‌های بسیاری به بررسی این مساله پرداخته‌اند، اما بسیاری از این پژوهش‌ها تمام اطلاعات مساله از قبیل اطلاعات مربوط به مشتریان، اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه و همچنین اطلاعات مربوط به جاده‌ها و تامین‌کنندگان را به صورت قطعی در نظر گرفته‌اند و تنها حالت قطعی مساله را حل نموده‌اند. این در حالی است که در واقعیت بسیاری از پارامترهای سیستم نظیر تقاضاهای مشتریان، زمان سفر و غیره به صورت غیرقطعی می‌باشد [۲]. علاوه بر این عدم قطعیت پارامترهای مساله، عملکرد کل زنجیره‌تامین را تحت تاثیر قرار می‌دهد و بنابراین نادیده گرفتن آن موجب ایجاد ریسک بالا برای سازمان‌ها می‌گردد [۳].

در حوزه مسیریابی وسایل نقلیه غیرقطعی، مسائل مسیریابی وسایل نقلیه احتمالی (SVRP) و مسیریابی وسایل نقلیه فازی (FVRP) اصلی‌ترین موضوعات تحقیقاتی می‌باشند. SVRP زمانی مطرح می‌شود که برخی عناصر مساله به صورت تصادفی باشند. مثال‌های رایج در این باره تقاضاهای احتمالی و زمان‌های سفر احتمالی می‌باشد. محققان بسیاری به ارائه مدل و الگوریتم برای حل مسائل SVRP پرداخته‌اند [۴-۷]. FVRP نیز زمانی مطرح می‌شود که برخی عناصر مساله به صورت غیرقطعی، ذهنی، نامشخص و گنگ باشند [۸]. بسیاری از پژوهش‌های قبلی که به بررسی موضوع عدم قطعیت در شبکه‌های لجستیکی پرداخته‌اند، رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی را در پیش گرفته‌اند [۹-۱۱]. کمبود داده‌های تاریخی موجود برای پارامترهای غیرقطعی و همچنین پیچیدگی محاسباتی بالای مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی موجب می‌شود که استفاده از این رویکرد برای موارد

دنیای واقعی تقریباً غیرممکن و غیرمنطقی شود [۱۲]. برای غلبه بر این عدم کارایی، رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی فازی برای طراحی شبکه لجستیک به کار گرفته شده است [۱۳، ۱۴]. برنامه‌ریزی ریاضی فازی یک ابزار انعطاف‌پذیر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مساله در زمانی است که تصمیم‌گیرنده اطلاع دقیقی از مقادیر پارامترها نداشته باشد. به عنوان مثال ممکن است در یک مثال اطلاعات موجود درباره تقاضای مشتریان خیلی دقیق نباشد. مثلاً بر اساس تجربه می‌توان نتیجه گرفت که تقاضای مشتری "حدود ۵۰" و یا "کمتر از ۶۰" می‌باشد. در حالت کلی، برای برخورد با اینگونه مسائل از متغیرهای فازی کمک می‌گیریم. با توجه به این توضیحات، لازم است تا با مبانی نظری و پیشینه پژوهش در این زمینه به شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی پرداخته شود.

#### ۱. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

متغیرهای فازی برای اولین بار در منبع [۸] برای VRP به کار گرفته شد. چنگ و جن (۱۹۹۵)، در مقاله‌ای از الگوریتم ژنتیک برای حل VRP با موعده تحویل فازی استفاده نموده‌اند [۱۵]. علاوه بر این لای و همکاران (۲۰۰۳)، به مدل‌سازی مساله VRP با زمان سفر فازی پرداخته و آن را با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک حل نموده‌اند [۱۶]. یانان و جوپینگ (۲۰۰۵)، نیز به بررسی عدم قطعیت در مساله‌ی مسیریابی پرداخته‌اند که تقاضای مشتریان به صورت اعداد فازی و زمان مسافرت نیز به صورت احتمالی با تابع توزیع احتمال معین در نظر گرفته شده است [۱۷]. ژنگ و لیو (۲۰۰۶)، با فازی در نظر گرفتن زمان سفر، یک مدل بهینه‌سازی فازی ارائه نمودند و سپس با ترکیب شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک مدل ارائه شده را حل نمودند [۱۸]، همچنین در مطالعه دیگری وان و نسل و همکاران (۲۰۰۸) نیز زمان سفر را از یک فرآیند احتمالی که به دلیل ازدحام ترافیک بود، به دست آورده و در مساله VRP جایگذاری نمودند [۱۹]. اربائو و مینگ‌یانگ (۲۰۰۹)، نیز یک مدل برنامه‌ریزی فازی با شانس محدود بر مبنای تئوری اعتبار فازی برای مساله مسیریابی با تقاضاهای فازی ارائه نموده و با ترکیب الگوریتم تکامل تفاضلی و شبیه‌سازی احتمالی آن را حل نموده‌اند [۲]. تانگ و همکاران (۲۰۰۹)، نیز به ارائه مدل و حل مساله

مسیریابی با پنجره‌های زمانی فازی پرداخته‌اند [۲۰]. همچنین بریتو و همکاران (۲۰۰۹)، در مقاله‌ای به ارزیابی راه‌حل‌های عملی برای مساله مسیریابی با اطلاعات غیرقطعی پرداخته‌اند [۲۱].

اربائو و مینگ‌یانگ (۲۰۱۰)، یک مدل با شانس محدود بر مبنای تئوری اعتبار فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه باز ارائه نموده‌اند و سپس از ترکیب الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و شبیه‌سازی احتمالی برای حل آن کمک گرفته‌اند [۲۲]. با توجه به اینکه نمی‌توان در اغلب مسائل زمان سرویس‌دهی مشتریان را پیش‌بینی نمود، گوپتا و همکاران (۲۰۱۰)، در مقاله‌ای زمان سرویس‌دهی مشتریان را به صورت غیرقطعی در نظر گرفته‌اند و مدل ارائه شده را با بکارگیری الگوریتم ژنتیک حل نموده‌اند [۲۳]. ژو و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل فازی دو هدفه برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی نرم ارائه نمودند که در آن تابع هدف اول به صورت مینیمم سازی مجموع مسافت طی شده و تابع هدف دوم نیز به صورت ماکزیمم سازی میانگین رضایت مشتریان است و در نهایت مدل ارائه شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل شده است [۲۴]. کوا و همکاران (۲۰۱۲)، نیز یک مدل ریاضی فازی بر مبنای برنامه‌ریزی با شانس محدود برای مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود را ارائه نمودند و مدل ارائه شده را با ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک حل نمودند [۲۵].

دویگو و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ای به بررسی مسأله VRP با پنجره‌های زمانی نرم و زمان‌های سفر غیرقطعی پرداخته‌اند و در آن یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن هزینه‌های حمل و نقل و سرویس‌دهی اریه نموده‌اند و در نهایت مسأله را با یک روش تابو سرچ حل نموده‌اند [۲۶]. غفاری نسب و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مقاله دیگری با در نظر گرفتن تقاضا به صورت فازی مساله مکان‌یابی-مسیریابی را بر مبنای تئوری اعتبار فازی و به صورت برنامه‌ریزی فازی با شانس محدود مدل‌سازی نموده‌اند و آن را با الگوریتم ابتکاری بر مبنای شبیه‌سازی آنیلینگ حل نمودند [۲۷]. در مقاله دیگری زارع و نادری‌زاده (2013) مسأله مکان‌یابی تجهیزات و مسأله مسیریابی وسایل نقلیه را به صورت ترکیبی ارائه نمودند که در آن تقاضای مشتریان به صورت فازی بوده و انبارها و وسایل نقلیه دارای

ظرفیت محدود هستند و مدل فازی ارائه شده با شانس محدود را نیز از طریق خوشه‌بندی حریص حل نموده‌اند [۲۸].

نادی‌زاده و حسینی نسب (۲۰۱۴) مسأله مکان‌یابی-مسیریابی را با در نظر گرفتن ظرفیت محدود برای وسایل نقلیه و انبار ارائه نمودند که در آن، تقاضای مشتریان به صورت متغیرهای فازی بوده و از یک الگوریتم ابتکاری شامل شبیه‌سازی احتمالی و جستجوی محلی برای حل مدل فازی ارائه شده بر مبنای اعتبار استفاده شده است [۲۹]. مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با بازگشت خالی کامیونها نیز توسط گولسین و نیحال (۲۰۱۵) بررسی شده است که یک الگوریتم برنامه‌ریزی فازی چندهدفه برای حل ارائه گردیده است [۳۰].

کو و همکاران (۲۰۱۶) برای افزایش تعداد مشتریان سرویس داده شده و حداقل کردن زمان انتظار آن‌ها یک مدل ریاضی برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه پویا ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از تئوری فازی، مدت زمان سرویس‌دهی را به صورت غیرقطعی فرض نموده و یک الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مدل ارائه شده پیشنهاد نموده‌اند [۳۱]. مسأله مسیریابی وسایل نقلیه چندهدفه که تقاضای مشتریان به صورت اعداد فازی مثلثی هستند، توسط بحری و همکاران (۲۰۱۶) بررسی شده است و از یک رویکرد استوار برای برخورد با مسأله استفاده شده است [۳۲]. مجیدی و همکاران (۲۰۱۷) نیز مسأله مسیریابی وسایل نقلیه سبز با در نظر گرفتن گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی را با رویکرد فازی برای شرایطی که تقاضای گذاشت و برداشت غیرقطعی است، ارائه نموده و در نهایت با ترکیب الگوریتم ابتکاری جستجوی همسایگی و اپراتورهای گذاشت و برداشت جدید، مدل ارائه شده را حل نموده‌اند [۳۳]. یانگ و همکاران (۲۰۱۷) مسأله سرویس‌دهی به بیماران در منزل آن‌ها در کشورهای اروپایی را به صورت مسأله مسیریابی وسایل نقلیه بررسی نموده‌اند که مقدار تقاضای مشتریان برای دارو غیرقطعی است. سپس آن‌ها برای مدل‌سازی مسأله از رویکرد فازی با شانس محدود استفاده کرده و از ترکیب الگوریتم ژنتیک با روش‌های شبیه‌سازی احتمالی مدل ارائه شده را حل نموده‌اند [۳۴].

در این پژوهش به بررسی یکی از انواع مختلف مساله VRP با عنوان مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی و گذاشت و برداشت همزمان (VRPTWSDP) تحت شرایط عدم قطعیت می‌پردازیم که در آن پنجره‌های زمانی و هزینه‌ی ارسال وسایل نقلیه هر دو به صورت فازی در نظر گرفته شده است. طبق بررسی‌های مؤلفین، تاکنون این مساله مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا نوآوری این پژوهش ارائه یک مدل فازی بر مبنای اعتبار برای مساله VRPTWSDP و حل آن با الگوریتم ترکیبی IPSO می‌باشد. که در الگوریتم ترکیبی ارائه شده، یک کدینگ بخصوصی از ذرات را برای حل مدل تعریف نموده‌ایم که موجب تبدیل مساله گسسته به حالت پیوسته شده و لذا الگوریتم IPSO که یک الگوریتم پیوسته است، را به صورت مستقیم برای حل مدل بکار برده‌ایم و در نهایت نیز با ارائه مطالعه موردی جهت توزیع محصولات شرکت فراورده‌های لبنی رامک در استان فارس، کاربردی بودن آن در مسائل دنیای واقعی نیز نشان داده شده است. سایر بخش‌های این مقاله به این صورت می‌باشد: در بخش سوم به معرفی تئوری اندازه اعتبار فازی می‌پردازیم و پس از آن در بخش چهارم تعریف و مدل‌سازی مساله بیان می‌شود. در بخش پنجم الگوریتم حل را شرح داده و در بخش ششم مطالعه موردی و نتایج محاسباتی آورده می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش ششم آورده شده است.

## ۲. تئوری اندازه اعتبار فازی

مفهوم مجموعه‌ی فازی اولین بار در [۳۵] با تابع عضویت معرفی گردید و پس از آن خیلی سریع توسعه یافته و در حوزه‌ی وسیعی از مسائل دنیای واقعی به کار گرفته شد. برای اندازه‌گیری یک رویداد فازی، واژه‌ی متغیر فازی در [۳۶] معرفی گردید و تئوری اندازه‌گیری امکان متغیر فازی نیز در [۳۷] ارائه گردید. اخیراً نیز تئوری اعتبار توسط لیو [۳۸] ارائه شده است. در ادامه در این قسمت ابتدا مفاهیم امکان<sup>۱</sup> و الزام<sup>۲</sup> تعریف شده و سپس به تعریف اندازه اعتبار بر اساس این دو مفهوم می‌پردازیم و آن را برای مدل قطعی مساله به کار می‌گیریم.

- 
1. Possibility
  2. Necessity

تعریف امکان: اگر  $\theta$  به عنوان یک مجموعه غیر تهی،  $\emptyset$  یک مجموعه تهی و  $\rho(\theta)$  مجموعه توانی مجموعه  $\theta$  فرض شود؛ به ازای هر مجموعه  $A \in \rho(\theta)$ ، مقدار امکان با یک عدد غیر منفی  $Pos(A)$  نشان داده می‌شود و از سه اصل زیر پیروی می‌کند:

$$Pos\{\emptyset\} = 0 \quad -1$$

$$Pos\{H\} = 1 \quad -2$$

$$Pos\{U_k A_k\} = \sup_k Pos(A_k) \quad -3$$

فضای امکان با  $(\theta, \rho(\theta), Pos)$  تعریف شده و اندازه‌گیری آن با تابع  $Pos$  معرفی شده است.

تعریف الزام: اندازه‌گیری الزام برای  $A \in \rho(\theta)$  به صورت  $Nec\{A\} = 1 - Pos\{A'\}$  تعریف می‌شود.

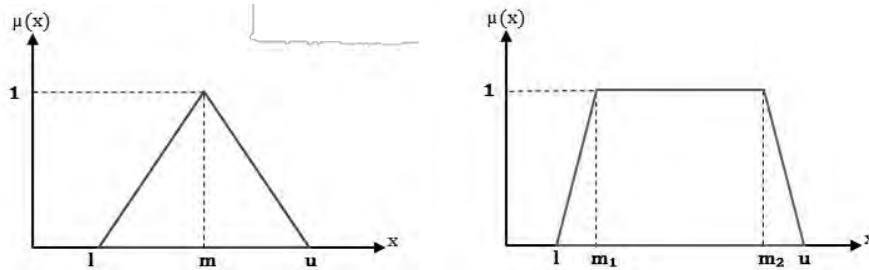
با توجه به تعریف‌های بالا واضح است که ممکن است با یک بودن امکان، واقعه فازی روی ندهد و یا اینکه با صفر بودن الزام، واقعه فازی اتفاق بیفتد. از طرف دیگر، یک واقعه فازی با یک بودن اعتبار قطعاً اتفاق می‌افتد و با صفر بودن اعتبار نیز قطعاً اتفاق نمی‌افتد [۳۸]. به عبارت دیگر اندازه اعتبار خود دوال ۱ می‌باشد.

انواع بسیار متنوعی از اعداد فازی با نام‌ها و ویژگی‌های متفاوت ارائه شده است ولی با توجه به اینکه یک اصل مهم در بکارگیری تئوری فازی کارایی محاسباتی آن است، در اینجا دو نوع عدد فازی معرفی می‌شود.

۱- عدد فازی مثلثی: عدد فازی مثلثی با سه عدد حقیقی به صورت  $F=(l,m,u)$  نمایش داده می‌شود که  $l$  و  $u$  به ترتیب کران بالا و پایین و میانگر بیشترین و کمترین مقداری است که عدد فازی می‌تواند اختیار کند و  $m$  نیز مقدار با درجه عضویت یک می‌باشد.

۲- عدد فازی ذوزنقه‌ای: یک عدد فازی ذوزنقه‌ای به صورت  $F=(l,m_1,m_2,u)$  نمایش داده می‌شود که همانطور که عنوان شد اعداد  $l$  و  $u$  به ترتیب کران بالا و پایین هستند و بازه  $m_1$  تا  $m_2$  نیز مقادیر ممکن با درجه عضویت یک می‌باشند.





شکل ۱. اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای در فضای هندسی

اکنون فرض کنید می‌خواهیم یک متغیر فازی ذوزنقه‌ای  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  را بررسی کنیم. مقادیر  $\theta_1$  و  $\theta_4$  مقادیری هستند که توسط تحلیل گر مساله و براساس تجربیات گذشته و داده‌های موجود تخمین زده شده‌اند. اگر  $\theta$  تقاضای مشتری باشد، این بدین معنی است که مقدار تقاضا کمتر از  $\theta_1$  و بیشتر از  $\theta_4$  نخواهد بود. به بازه‌ی  $[\theta_1, \theta_4]$  بازه‌ی پشتیبان گفته می‌شود. مقادیر  $\theta_2$  و  $\theta_3$  را نیز می‌توان براساس یک برآورد ذهنی و توسط خبرگان مشخص نمود و بازه‌ی بین آن‌ها به عنوان مقادیر ممکن با درجه عضویت یک می‌باشد. در این مساله نیز به دلیل اینکه برای هر پارامتر فازی چندین مقدار با درجه عضویت یک داریم، لذا آن‌ها را به صورت فازی ذوزنقه‌ای در نظر گرفته‌ایم.

فرض می‌کنیم  $\tilde{\theta}$  یک متغیر فازی با تابع عضویت  $\mu(x)$  باشد و  $r$  نیز یک عدد حقیقی باشد. می‌توانیم اندازه اعتبار را از رابطه (۱) محاسبه نمائیم [۳۹]:

$$Cr\{\tilde{\theta} \leq r\} = \frac{1}{2} (Pos\{\tilde{\theta} \leq r\} + Nec\{\tilde{\theta} \leq r\}) \quad (1)$$

با توجه به اینکه  $Pos\{\tilde{\theta} \leq r\} = Sup_{x \leq r} \mu(x)$  و  $Nec\{\tilde{\theta} \leq r\} = 1 - Sup_{x > r} \mu(x)$ ، فرمول اندازه اعتبار به شکل زیر که به صورت یک میانگین از اندازه امکان و الزام است تعریف می‌شود:

$$Cr\{\tilde{\theta} \leq r\} = \frac{1}{2} (Sup_{x \leq r} \mu(x) + 1 - Sup_{x > r} \mu(x)) \quad (2)$$

بنابراین ارزش انتظاری  $\tilde{\theta}$  بر اساس اندازه اعتبار را می‌توان به شکل زیر محاسبه نمود:

$$E[\tilde{\theta}] = \int_0^{\infty} Cr\{\tilde{\theta} \geq r\} dr - \int_{-\infty}^0 Cr\{\tilde{\theta} \leq r\} dr \quad (۳)$$

اگر  $\theta$  یک عدد فازی دوزنقه‌ای باشد که توسط چهار نقطه  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  مشخص شده باشد، ارزش انتظاری  $\tilde{\theta}$  برابر است با:

$$E[\tilde{\theta}] = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4}{4} \quad (۴)$$

و اندازه‌های اعتبار مربوطه نیز به شکل زیر محاسبه می‌گردند:

$$Cr\{\tilde{\theta} \leq r\} = \begin{cases} 0 & r \in (-\infty, \theta_{(1)}) \\ \frac{r - \theta_{(1)}}{2(\theta_{(2)} - \theta_{(1)})} & r \in (\theta_{(1)}, \theta_{(2)}) \\ \frac{1}{2} & r \in (\theta_{(2)}, \theta_{(3)}) \\ \frac{r - 2\theta_{(3)} + \theta_{(4)}}{2(\theta_{(4)} - \theta_{(3)})} & r \in (\theta_{(3)}, \theta_{(4)}) \\ 1 & r \in (\theta_{(4)}, +\infty) \end{cases} \quad (۵)$$

$$Cr\{\tilde{\theta} \geq r\} = \begin{cases} 1 & r \in (-\infty, \theta_{(1)}) \\ \frac{2\theta_{(2)} - \theta_{(1)} - r}{2(\theta_{(2)} - \theta_{(1)})} & r \in (\theta_{(1)}, \theta_{(2)}) \\ \frac{1}{2} & r \in (\theta_{(2)}, \theta_{(3)}) \\ \frac{\theta_{(4)} - r}{2(\theta_{(4)} - \theta_{(3)})} & r \in (\theta_{(3)}, \theta_{(4)}) \\ 0 & r \in (\theta_{(4)}, +\infty) \end{cases}$$

می‌توان نشان داد که اگر  $\tilde{\theta}$  یک عدد فازی دوزنقه‌ای بوده و  $\alpha \geq 0.5$  باشد خواهیم داشت [۳]:

$$Cr\{\tilde{\theta} \leq r\} \geq \alpha \Leftrightarrow r \geq (2 - 2\alpha)\theta_3 + (2\alpha - 1)\theta_4 \quad (۶)$$

$$Cr\{\tilde{\theta} \geq r\} \geq \alpha \Leftrightarrow r \leq (2\alpha - 1)\theta_1 + (2 - 2\alpha)\theta_2 \quad (۷)$$

در این رابطه  $\alpha$  مینیمم درجه قابل پذیرش می‌باشد که توسط فرد تصمیم گیرنده تعیین می‌شود. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل VRPSDPTW، به دلیل اینکه برای هر پارامتر فازی چندین مقدار با درجه عضویت یک داریم، لذا فرض می‌کنیم که پارامترهای غیرقطعی، اعداد فازی ذوزنقه‌ای هستند. پارامترهای غیرقطعی شامل شروع و خاتمه پنجره‌زمانی مشتریان و هزینه اعزام وسایل نقلیه می‌باشد. هزینه اعزام وسایل نقلیه اغلب قطعی فرض می‌شود ولیکن بنا به دلایلی از جمله موارد زیر این هزینه نیز می‌تواند رفتار غیرقطعی داشته باشد و غیرقطعی بودن هزینه اعزام امر غیرممکنی نیست: الف) با توجه به اینکه شرکت مالک وسایل نقلیه توزیع کننده محصولات نیست و این کامیون‌ها اجاره‌ای می‌باشند، لذا هزینه اعزام وسایل نقلیه (در زمان‌ها مختلف) می‌تواند رفتار غیرقطعی داشته باشد. ب) علاوه بر این، هزینه اعزام وسایل نقلیه تابعی از نوسانات اقتصادی، قیمت سوخت، فصل توزیع و هزینه کارگر (جهت بارگیری و تخلیه) و غیره می‌باشد. بعنوان مثال در زمان انتهایی سال و یا شروع سال جدید این هزینه‌ها تغییر می‌یابند و لذا ممکن است حالت غیرقطعی داشته باشند.

در حالت کلی، سه روش مدل سازی ریاضی فازی بر مبنای اعتبار وجود دارد که شامل مقدار انتظاری ۱ [۳۹]، برنامه‌ریزی با شانس محدود ۲ [۴۰] و برنامه‌ریزی با شانس محدود وابسته ۳ [۴۱] می‌باشد که در مقاله‌های بسیاری به کار رفته‌اند و به تفاوت‌ها، نقاط ضعف و قوت و موقعیت مناسب برای به کار گیری آن‌ها زیاد توجه نشده است. مدل مقدار انتظاری ساده‌ترین حالت است که می‌تواند به راحتی و بدون افزایش پیچیدگی محاسباتی مساله، به کار گرفته شود اما هیچ کنترلی بر روی سطح اطمینان برقراری محدودیت‌ها ندارد. از سویی دیگر، برنامه‌ریزی با شانس محدود می‌تواند درجه اطمینان محدودیت‌ها را کنترل نماید ولی با افزایش یک محدودیت برای هر تابع هدف موجب افزایش پیچیدگی محاسباتی مدل اصلی می‌گردد و همچنین به اطلاعات بیشتری نیز نیاز دارد. برنامه‌ریزی با شانس محدود وابسته نیز بسیار شبیه برنامه‌ریزی با شانس محدود

- 
1. Expected Value
  2. Chance Constrained Programming
  3. Dependent-Chance Constrained Programming

می‌باشد ولی با توجه به دادن اهمیت بیشتر بر روی سطح اطمینان محدودیت‌ها، بیشتر برای تصمیم‌گیرنده‌های محافظه‌کار مناسب می‌باشد [۳]. در نتیجه به منظور ارائه مدل ریاضی فازی بر مبنای اعتبار برای مساله مطرح شده، مدل مقدار انتظاری و برنامه‌ریزی با شانس محدود با هم ترکیب شده‌اند که مقدار انتظاری برای تابع هدف و برنامه‌ریزی با شانس محدود نیز برای پارامترهای غیرقطعی مدل در محدودیت‌های مساله اعمال شده است. شیوه ترکیبی ارائه شده موجب افزایش تعداد محدودیت‌ها نمی‌شود و به اطلاعات بیشتری نیز نیاز ندارد و علاوه بر این در محدودیت‌های مدل، از مزایای رویکرد برنامه‌ریزی با شانس محدود نیز بهره می‌برد. همچنین شیوه ارائه شده یک رویکرد برنامه‌ریزی مؤثر فازی است که بر اساس مفاهیم بنیادی ریاضی بوده و می‌تواند اعداد فازی مختلفی مثل اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای را پشتیبانی نماید [۳۸, ۳۹].

بر اساس مطالب عنوان شده در بالا و با توجه به اینکه پیمانانه اعتبار به صورت ترکیب دو رویکرد دیگر (پیمانانه امکان و پیمانانه الزام) است، در نتیجه می‌تواند رویکرد معقول‌تری نسبت به دو رویکرد دیگر باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه توزیع احتمالی متغیرها در این مساله معلوم نیست، در نتیجه پیمانانه احتمال قابل استفاده نبوده و از پیمانانه اعتبار برای مدل‌سازی استفاده شده است. همچنین با توجه به مطالعه موردی انجام شده در این مقاله و بر اساس جلساتی که با خبرگان در مطالعه موردی صورت گرفت، آن‌ها رویکرد ارزش انتظاری را بیشتر مورد توجه و تأکید قرار دادند و لذا برای عدم قطعیت موجود در تابع هدف از رویکرد ارزش انتظاری استفاده شده است. علاوه بر این، برای مدل‌سازی مساله از روش ارائه شده در منبع [۳] الهام گرفته شده است و خوانندگان محترم می‌توانند جهت اطلاعات بیشتر به این منبع مراجعه نمایند. در بخش بعدی مساله معرفی شده و مدل ریاضی فازی بر مبنای اعتبار آورده شده است.

### ۳. تعریف مساله و مدل سازی

#### ۴.۱. مدل فازی

در مساله‌ی مسیریابی مورد بررسی در این پژوهش به دنبال ارسال یک ناوگان همگن از وسایل نقلیه برای سرویس دهی به تعدادی مشتری با تقاضای قطعی هستیم که در شهرهای مختلفی قرار دارند. علاوه بر این هر مشتری نیز باید در یک بازه‌ی زمانی معین با نام پنجره‌ی زمانی سرویس دریافت کند. در مساله VRPSDPTW، یک مجموعه از وسایل نقلیه با ظرفیت محدود از انبار مرکزی خارج می‌شوند و پس از سرویس دهی به مشتریان مجدداً به انبار بازمی‌گردند. تابع هدف مساله نیز به دنبال حداقل نمودن هزینه مسافت طی شده و هزینه ارسال کامیون‌ها می‌باشد به گونه‌ای که: الف) شروع و خاتمه‌ی تمامی مسیرها انبار باشد. ب) هر مشتری دقیقاً یک بار و در پنجره‌ی زمانی مربوطه سرویس دریافت کند. ج) مجموع تقاضای مشتریان در هر مسیر نیز از ظرفیت وسایل نقلیه بیشتر نباشد.

مساله VRPSDPTW را با یک گراف به صورت  $G = (V, A)$  نمایش می‌دهیم که  $V = \{0, 1, \dots, n, n+1\}$  مجموعه نقاط، و  $A = \{(i, j) | i, j \in V\}$  نیز مجموعه کمان‌های متصل کننده نقاط به یکدیگر می‌باشد. بعلاوه اینکه  $V' = \{1, 2, \dots, n\}$  نقاط مشتریان بوده و برای هر  $i \in V'$  یک تقاضای تحویل و یک تقاضای برداشت داریم که به ترتیب با  $r_i > 0$  و  $p_i > 0$  نشان داده می‌شود. اندیس‌های  $0$  و  $n+1$  نیز مربوط به انبار مرکزی می‌باشند و نقاط ابتدا و انتهای مسیرها را تشکیل می‌دهند.  $d_{ij}$  و  $t_{ij}$  نیز به ترتیب مسافت سفر و زمان سفر متناسب با کمان  $(i, j) \in A$  می‌باشند. فرض بر این است که مجموعه  $K = \{1, 2, \dots, r\}$  مجموعه وسایل نقلیه در دسترس با ظرفیت محدود  $C_k$  و هزینه‌های اعزام نیز  $FV$  می‌باشند. همچنین فرض می‌کنیم که  $[e_i, l_i]$  پنجره‌ی زمانی مشتری  $i \in V'$  می‌باشد و  $s_i$  نیز زمان سرویس دهی مشتریان می‌باشد. با توجه به مساله شرح داده شده در بالا، متغیرهای تصمیم مساله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$U_{i,k}$  بار برداشتی کامیون  $k \in K$  بعد از سرویس دهی به مشتری  $i \in V'$ .

$V_{i,k}$  بار تحویلی کامیون  $k \in K$  قبل از سرویس دهی به مشتری  $i \in V'$ .

اگر کامیون  $k \in K$  به صورت مستقیم از گره  $i \in V$  به گره  $j \in V$  برود،  
 $X_{i,j,k} = 1$  و در غیر اینصورت  $X_{i,j,k} = 0$ .  
 $ST_{i,k}$  زمان رسیدن کامیون  $k \in K$  به مشتری  $i \in V$ .

در ادامه با توجه به موارد مطرح شده در بالا و قسمت‌های قبل و با توجه به اینکه شروع و خاتمه پنجره زمانی مشتریان و هزینه اعزام وسایل نقلیه به صورت پارامترهای غیرقطعی و اعداد فازی دوزنقه‌ای می‌باشند، مدل ریاضی فازی مساله بر مبنای اعتبار به صورت زیر می‌باشد که در آن  $M$  یک عدد مثبت خیلی بزرگ می‌باشد.

$$\text{Min } E[Z] = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{i,j} * X_{i,j,k} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} E[\bar{FV}] * X_{0,i,k} \quad (۸)$$

subject to:

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{i,j,k} = 1; \quad \forall i \in V' \quad (۹)$$

$$\sum_{j \in V} X_{j,i,k} - \sum_{j \in V} X_{i,j,k} = 0; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۰)$$

$$U_{j,k} - U_{i,k} + C_k X_{i,j,k} + (C_k - r_i - r_j) X_{j,i,k} \leq C_k - r_i; \quad \forall i, j \in V', i \neq j, k \in K \quad (۱۱)$$

$$V_{i,k} - V_{j,k} + C_k X_{i,j,k} + (C_k - p_i - p_j) X_{j,i,k} \leq C_k - p_j; \quad \forall i, j \in V', i \neq j, k \in K \quad (۱۲)$$

$$U_{i,k} + V_{i,k} - r_i \leq C_k; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۳)$$

$$U_{i,k} \geq r_i + \sum_{\substack{j \in V' \\ (j \neq i)}} r_j X_{i,j,k}; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۴)$$

$$V_{i,k} \geq p_i + \sum_{\substack{j \in V' \\ (j \neq i)}} p_j X_{j,i,k}; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۵)$$

$$U_{i,k} \leq C_k - (C_k - r_i) X_{i,n+1,k}; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۶)$$

$$V_{i,k} \leq C_k - (C_k - p_i) X_{0,i,k}; \quad \forall i \in V', k \in K \quad (۱۷)$$

$$\sum_{i \in V} X_{0,i,k} = 1; \quad \forall k \in K \quad (۱۸)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i,n+1,k} = 1; \quad \forall k \in K \quad (19)$$

$$ST_{j,k} \geq ST_{i,k} + s_i + t_{i,j} - M(1 - X_{i,j,k}); \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (20)$$

$$Cr\{ST_{i,k} \geq \bar{e}_i\} \geq \lambda_i \quad ; \forall i \in V, k \in K \quad (21)$$

$$Cr\{ST_{i,k} \leq \bar{l}_i\} \geq \gamma_i \quad ; \forall i \in V, k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{i,0,k} = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{n+1,i,k} = 0 \quad (24)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (25)$$

$$U_{i,k}, V_{i,k}, ST_{i,k}, Z \geq 0; \quad \forall i \in V, k \in K \quad (26)$$

قسمت اول تابع هدف مجموع مسافت طی شده‌ی وسایل نقلیه و قسمت دوم نیز هزینه ثابت اعزام وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر در مورد تابع هدف این است که هزینه جابجایی در واحد مسافت برابر یک در نظر گرفته شده است که در نتیجه هزینه جابجایی بین دو نقطه  $i$  و  $j$  به صورت  $d_{i,j} = d_{i,j} \times 1$  است و به همین خاطر در تابع هدف عدد یک حذف شده و به صورت حداقل نمودن مسافت بیان شده است (در واقع قسمت اول تابع هدف نیز از جنس هزینه می‌باشد). هزینه ثابت اعزام وسایل نقلیه بابت اجاره ماشین، هزینه بارگیری و تخلیه و غیره پرداخت می‌شود. رابطه (۹)، بیان می‌دارد که هر مشتری دقیقاً یک بار سرویس داده می‌شود و رابطه (۱۰) نیز تضمین می‌کند که کامیون‌های وارد شده به یک گره از آن گره خارج می‌شوند. محدودیت‌های حذف‌کننده‌ی زیرتورها و قیود ظرفیت (۱۱) تا (۱۷) نیز با توجه به جدیدترین و کاراترین محدودیت‌های زیرتور، از مقاله کارا و همکارانش [۴۲] اخذ شده است و همانطور که در آن مقاله اثبات شده است، نوشتن محدودیت‌ها به این شکل تاثیر قابل توجهی در کاهش زمان حل مسأله دارد. محدودیت (۱۸) بیان می‌دارد که شروع مسیر تمامی کامیون‌ها باید از انبار باشد و محدودیت (۱۹) نیز بیان می‌کند که تمامی کامیون‌ها در پایان دوره باید به انبار بازگردند. رابطه (۲۰) برقرار بودن ارتباطات زمانی بین گره‌ها را تضمین می‌کند و روابط (۲۱) و (۲۲) نیز روابط مربوط به رعایت شدن پنجره‌های زمانی می‌باشند که  $\lambda_i$  و  $\gamma_i$  در این روابط همان درجه اطمینان

محدودیت می‌باشند. رابطه (۲۳) و (۲۴) بیانگر این نکته می‌باشند که هیچ مسیری به گره صفر وارد نمی‌شود (از گره صفر فقط خروج داریم) و هیچ مسیری نیز از گره  $n+1$  خارج نمی‌شود (به گره  $n+1$  فقط ورود داریم). روابط (۲۵) و (۲۶) هم متغیرهای صفر و یک و نامنفی را بیان می‌کنند.

#### ۴.۲. مدل قطعی

با توجه به روابط ذکر شده در قسمت تئوری اندازه اعتبار فازی، مدل مسأله بعد از نگاشت از فضای فازی به فضای قطعی، به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[Z] = & \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{i,j} * X_{i,j,k} \\ & + \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} \left( \frac{FV_1 + FV_2 + FV_3 + FV_4}{4} \right) * X_{0,i,k} \end{aligned} \quad (27)$$

s.t: (۹) - (۲۰)

$$ST_{i,k} \geq (2 - 2\lambda_i) * e_{i(3)} + (2\lambda_i - 1) * e_{i(4)} \quad ; \forall i \in V, k \in K \quad (28)$$

$$ST_{i,k} \leq (2\gamma_i - 1) * l_{i(1)} + (2 - 2\gamma_i) * l_{i(2)} \quad ; \forall i \in V, k \in K \quad (29)$$

(۲۳) - (۲۶)

۴. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته

۵.۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه

الگوریتم PSO با توجه به مفهوم ساده، کارایی و توانایی در یافتن جواب‌های منطقی در مدت زمان کم، بسیار مورد توجه بوده است. این الگوریتم با شبیه‌سازی رفتار اجتماعی حیواناتی مثل ماهی‌ها و پرندگان که فاقد رهبر می‌باشند، جواب بهینه را برای مسائل پیدا می‌کند [۴۳]. الگوریتم PSO یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که در آن اعضای جمعیت جواب‌ها به صورت مستقیم با هم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات با یکدیگر و یادآوری خاطرات خوب گذشته، به حل مسأله می‌پردازند. با توجه به ساده بودن الگوریتم PSO، پیاده‌سازی آسان و اثربخش بودن آن و همچنین مناسب بودن آن برای انواع مختلف مسائل گسسته و پیوسته، به یکی از معروفترین الگوریتم‌های



تکاملی تبدیل شده است و می‌توانید روش مناسبی برای حل انواع مسائل باشد. علاوه بر این کارایی الگوریتم IPSO استفاده شده در این مقاله در منبع [۴۴] اثبات شده است و خوانندگان گرامی می‌توانند جهت مشاهده کارا بودن روش حل به آن مقاله مراجعه نمایند. الگوریتم PSO، یک الگوریتم بر مبنای جمعیت است که با یک جواب اولیه تصادفی از ذرات آغاز می‌شود. در سیستم این الگوریتم در یک فضای  $D$  بعدی، هر ذره دارای دو مشخصه موقعیت و سرعت می‌باشد که در آن  $D = \{1, 2, \dots, d\}$  می‌باشد. هر ذره  $i \in V'$  در الگوریتم PSO یک راه‌حل را به صورت  $X_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d]$  مشخص می‌کند که سرعت متناظر با آن نیز  $V_i = [v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^d]$  می‌باشد و  $d \in D$  می‌باشد. رابطه‌ی (۳۰) برای محاسبه‌ی سرعت جدید ذره بر اساس سرعت قبلی ذره و فاصله موقعیت فعلی ذره از بهترین موقعیت شخصی و گروهی به کار می‌رود، سپس ذره بر اساس رابطه (۳۱) به موقعیت جدید پرواز می‌کند.

$$v_i^d(t+1) = w \cdot v_i^d(t) + c_1 \cdot \text{rand}1_i^d \cdot (pbest_i^d(t) - x_i^d(t)) + c_2 \cdot \text{rand}2_i^d \cdot (gbest_d(t) - x_i^d(t)) \quad (30)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (31)$$

که در آن  $pbest_i = (pbest_i^1, pbest_i^2, \dots, pbest_i^D)$  می‌باشد و موقعیتی است که ذره تاکنون بهترین تابع هدف را داشته است و  $gbest = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$  نیز بهترین موقعیتی است که تمام ذرات تاکنون داشته‌اند.  $\text{rand}1_i^d$  و  $\text{rand}2_i^d$  هر دو اعداد تصادفی یکنواخت بوده که به صورت مستقل از بازه‌ی  $[0, 1]$  انتخاب شده‌اند و خاصیت تصادفی الگوریتم نیز به خاطر همین دو عدد می‌باشد.  $c_1$  و  $c_2$  نیز دو فاکتور یادگیری می‌باشند که به ترتیب بیانگر اعتماد ذره به خودش و جمعیت ذرات می‌باشد. پارامتر ضریب اینرسی یا  $w$  نیز برای متعادل‌سازی خاصیت جستجوی موضعی و کلی ذرات به کار می‌رود و ویژگی‌های جستجو و بهره‌برداری الگوریتم را تنظیم می‌کند. یک انتخاب مناسب برای مقدار  $w$  کاهش خطی آن در طول فرآیند جستجو می‌باشد [۴۵] و بر اساس رابطه (۳۲) در طول فرآیند به‌روز می‌گردد. که  $w_{min}$  و  $w_{max}$  به ترتیب حداکثر و حداقل

مقدار ضریب اینرسی می‌باشد و  $t_{max}$  نیز تعداد تکرارهای الگوریتم و  $t$  هم تکرار فعلی می‌باشد.

$$w = w_{max} - ((w_{max} - w_{min})/t_{max})t \quad (۳۲)$$

همچنین سرعت ذرات نیز به بازه‌ی  $[V_{min}, V_{max}]$  محدود می‌شود. مقادیر ماکزیمم و مینیمم سرعت ذرات براساس روابط (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌گردند:

$$V_{max,d} = \psi(X_{max,d} - X_{min,d}) \quad (۳۳)$$

$$V_{min,d} = \psi(X_{min,d} - X_{max,d}) \quad (۳۴)$$

که  $X_{min,d}$  و  $X_{max,d}$  مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای موقعیت ذره در بعد  $d$  بوده و  $\psi$  نیز یک مقدار ثابت در بازه‌ی  $[0,1]$  می‌باشد. اگر در یک تکرار مقدار محاسبه شده برای سرعت ذره کوچکتر از  $V_{min}$  باشد، مقدار سرعت برابر  $V_{min}$  قرار داده می‌شود و همچنین اگر مقدار سرعت بزرگتر از  $V_{max}$  باشد، مقدار سرعت برابر  $V_{max}$  قرار داده می‌شود.

## ۵.۲. تعریف ذره و شرح راه‌حل

با توجه به جستجوی ذرات در PSO در فضای پیوسته و گسسته بودن مساله مسیریابی، در این قسمت ما یک نگاهت مناسب بین راه‌حل مساله VRPTWSDP و ذرات در الگوریتم PSO تعریف می‌کنیم. با توجه به اینکه هر مسیر از کنار هم قرار گرفتن مجموعه‌ای از گره‌ها شکل می‌گیرد، ما در این قسمت یک کدینگ بخصوصی از ذرات را برای مساله VRPTWSDP تعریف می‌کنیم که موجب تبدیل مساله گسسته به مساله پیوسته شده و لذا می‌توانیم الگوریتم PSO را به صورت مستقیم برای حل مساله VRP به کار ببریم. فرض می‌کنیم که مساله مسیریابی ما دارای  $|V'|$  مشتری و  $|K|$  کامیون در دسترس می‌باشد. یک راه‌حل برای مساله را می‌توان به صورت جایگشت با  $|V'| + |K| - 1$  عضو تعریف نمود. به عنوان نمونه در یک مثال با سه کامیون و نه مشتری، یک راه‌حل می‌تواند به صورت

ارائه یک رویکرد فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با ...؛ علی نژاد و همکاران | ۲۳۳

شکل ۲ نشان داده شود. که اعداد بزرگتر از  $|V'|$  (جداکننده‌ها)، مسیرها را از هم جدا می‌کنند.

5	6	9	10	1	8	3	11	4	2	7
---	---	---	----	---	---	---	----	---	---	---

شکل ۲. نمایش حل برای مساله VRPTWSDP

در برخی مواقع ممکن است دو عدد بزرگتر از  $|V'|$  کنار هم قرار بگیرند که در چنین حالتی یک کامیونی وجود دارد که به هیچ مسیری تخصیص نیافته است. راه‌حل شرح داده شده در بالا باید به درستی به فضای پیوسته منتقل گردد، لذا ما برای هر عنصر از راه‌حل بالا یک عدد شناور در بازه  $[0, 1]$  در نظر می‌گیریم. برای این کار هر عنصر از راه‌حل را به بزرگترین عنصر تقسیم می‌نمائیم. به عبارت دیگر مثال قبل به صورت زیر خواهد بود:

0.45	0.55	0.82	0.91	0.09	0.73	0.27	1	0.36	0.18	0.64
------	------	------	------	------	------	------	---	------	------	------

شکل ۳. جواب منتقل شده به فضای پیوسته

پس از محاسبه‌ی سرعت ذرات به کمک رابطه (۳۰)، عناصر بردار سرعت مجدداً به فضای پیوسته منتقل می‌شوند [۴۶]. برای این منظور کوچکترین عدد شناور به کوچکترین عدد صحیح و دومین عدد شناور نیز به دومین عدد صحیح نسبت داده می‌شود و به همین ترتیب ادامه می‌یابد. با تعریف بالا، می‌توانیم مسیرهای VRPTWSDP را با کمک ذرات تعیین نمائیم. مراحل الگوریتم PSO پایه برای VRPTWSDP در زیر آورده شده است:

گام اول، تولید جواب اولیه: جواب اولیه به صورت یک جایگشت با  $|V'| + |K| - 1$  عضو تعریف می‌شود و مسیرها توسط جداکننده‌ها تعیین می‌شوند.  
 گام دوم، ارزیابی: تمامی عنصر راه‌حل به بزرگترین عضو جایگشت تقسیم شده و به یک نقطه شناور در بازه  $[0, 1]$  منتقل می‌گردند و ارزیابی با کمک رابطه (۳۰) انجام می‌گیرد و مقادیر  $gbest$  و  $pbest_i$  نیز ذخیره می‌شوند.

گام سوم، به روز رسانی سرعت و موقعیت: موقعیت هر ذره با کمک رابطه (۳۱) به روز شده و مجدداً به فضای گسسته بازگردانده می‌شود.  
گام چهارم، قضاوت: اگر شرط خاتمه برقرار نباشد، مجدداً به گام دوم برمی‌گردیم.

### ۵.۳. بهبود عملکرد الگوریتم PSO

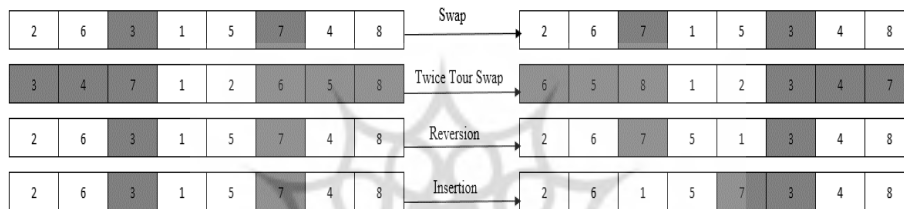
در بسیاری از مواقع جواب زیربینه نزدیک جواب بهینه می‌باشد و لذا جواب‌های همسایگی بهینه محلی می‌تواند حاوی جواب بهینه مساله باشد. بنابراین جستجوی جواب‌های بهینه محلی برای یافتن جواب مساله بسیار مفید و موثر می‌باشد [۴۷]. براساس همین ایده، ما در این قسمت چندین اپراتور جستجوی همسایگی را که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته‌اند را در این قسمت معرفی می‌نمائیم که این اپراتورها کمک شایانی به فرار از بهینه‌های محلی و حفظ تنوع جواب‌ها می‌نمایند. هر کدام از تکنیک‌هایی که در این قسمت استفاده شده‌اند شامل یک برداشت و یک گذاشت می‌باشند. به عبارت دیگر، در هر تکرار بعضی از مشتریان از مکانشان برداشته شده و در یک موقعیت جدید قرار داده می‌شوند. جستجوهای محلی به کار گرفته شده در این بخش به دو دسته تقسیم شده‌اند. در رویه حل یکی از دو گروه به صورت تصادفی انتخاب شده و سپس یکی از اپراتورهای همان گروه به صورت تصادفی اجرا می‌شود. این رویه تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه برقرار باشد. در ادامه هر کدام از دو گروه به صورت خلاصه شرح داده می‌شوند.

اولین گروه که بر مبنای انتخاب تصادفی است، شامل چهار اپراتور جستجوی همسایگی تصادفی است که در زیر هر اپراتور به صورت خلاصه توضیح داده می‌شود:  
۱. عملگر حرکتی تعویض: این عملگر دو مشتری (گره) را به صورت تصادفی انتخاب نموده و سپس موقعیت آن‌ها را با هم تعویض می‌کند.

۲. عملگر حرکتی Tour Swap: عملکرد این عملگر مشابه عملگر تعویض می‌باشد با این تفاوت که به جای انتخاب دو مشتری، دو گروه از مشتریان انتخاب شده و با هم

جابجا می شوند. هر گروه شامل حداقل یک مشتری و حداکثر  $2 - |V'|$  مشتری می باشد.  
 ۳. عملگر حرکتی معکوس سازی<sup>۱</sup>: در این عملگر ابتدا دو مشتری به صورت تصادفی انتخاب می شوند و سپس ترتیب قرار گرفتن آن دو مشتری و تمامی مشتریان بین آنها، معکوس می شود.

۴. عملگر حرکتی انتقال<sup>۲</sup>: در این عملگر نیز ابتدا دو مشتری به صورت تصادفی انتخاب می شوند ولی ترتیب انتخاب شدن مشتری ها مهم می باشد. این عملگر موقعیت مشتری اول انتخاب شده را به بعد از مشتری دوم انتقال می دهد.



شکل ۴. عملگرهای جستجوی همسایگی تصادفی

در گروه دوم چند عملگر گذاشت و برداشت هوشمند را برای تولید جواب های همسایگی معرفی می کنیم. به کارگیری این روش ها موجب بهبود در زمان محاسباتی و کیفیت جواب های بدست آمده می گردد. این عملگرها به شرح زیر می باشند:

۱. برداشت بدترین مسافت ( $WDR^2$ ): این عملگر در هر تکرار مشتری با بیشترین هزینه ( $dr^*$ ) را انتخاب می کند [۴۸]، که در آن هزینه به صورت مجموع مسافت هر گره از گره قبل ( $i \in V'$ ) و بعد آن ( $h \in V'$ ) و طبق رابطه (۳۵) محاسبه می شود.

$$dr^* = \arg \max_{j \in V'} \{ |d_{ij} + d_{jh}| \} \quad (35)$$

۲. برداشت بدترین زمان ( $WTR^2$ ): این عملگر در هر تکرار مشتری با بیشترین انحراف ( $tr^*$ ) از زمان شروع خدمت رسانی ( $ST_j$ ) و شروع پنجره زمانی ( $e_j$ ) را طبق

1. Reversion
2. Insertion
3. Worst-Distance Removal
4. Worst-Time Removal

رابطه (۳۶) انتخاب می‌کند [۴۹].

$$tr^* = \operatorname{argmax}_{j \in V'} \{ |ST_j - e_j| \} \quad (36)$$

۳. گذاشت حریصانه (GI): این عملگر در هر تکرار خود یکی از گره‌های برداشت شده ( $j \in V'$ ) را به بهترین و موجه‌ترین مکان انتقال می‌دهد. برای انتقال مشتری  $j$  بین مشتری‌های  $i \in V'$  و  $h \in V'$ ، ابتدا رابطه (۳۷) را برای تمامی محل‌های بالقوه محاسبه نموده و سپس مکان با کمترین مقدار  $gi^*$  انتخاب می‌شود.

$$gi^* = \operatorname{argmin}_{j \in V'} \{ d_{ij} + d_{jh} - d_{ih} \} \quad (37)$$

۴. گذاشت بهترین زمان<sup>۲</sup>: به دلیل وجود محدودیت پنجره‌زمانی مشتریان، در نظر گرفتن این شرط در معیار وارد کردن مشتریان ارزشمند بوده و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. این عملگر بدین صورت عمل می‌کند که هر گره را در بهترین مکان از لحاظ زمانی قرار دهد. یعنی برای قرار دادن گره  $j \in V'$ ، ابتدا رابطه (۳۸) را برای تمام مکان‌های موجود محاسبه نموده و مکان با کمترین مقدار  $ti^*$  را انتخاب می‌کند.

$$ti^* = \operatorname{argmin}_{j \in V'} \{ |ST_j - e_j| \} \quad (38)$$

#### ۵.۴. تنظیم پارامترهای الگوریتم

همانطور که در بالا عنوان شد نتایج الگوریتم IPSO توسط پارامترهایی مثل تعداد ذرات ( $|N|$ )، ضرایب  $c_1$  و  $c_2$ ، ضریب اینرسی ( $w$ )، ماکزیمم تعداد تکرارها ( $t_{max}$ )، دمای اولیه ( $T_0$ ) و ضریب کاهش دما ( $\alpha$ ) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه تنظیم پارامترهای الگوریتم اثر قابل توجهی بر روی نتایج دارد، لذا مقدار پارامترهای الگوریتم با در نظر گرفتن پنج سطح برای هر پارامتر، به روش تاگوجی تنظیم شده‌اند و نتایج در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به اینکه مقدار ضریب اینرسی به صورت خطی در طول

---

1. Greedy Insertion  
2. Best Time Insertion

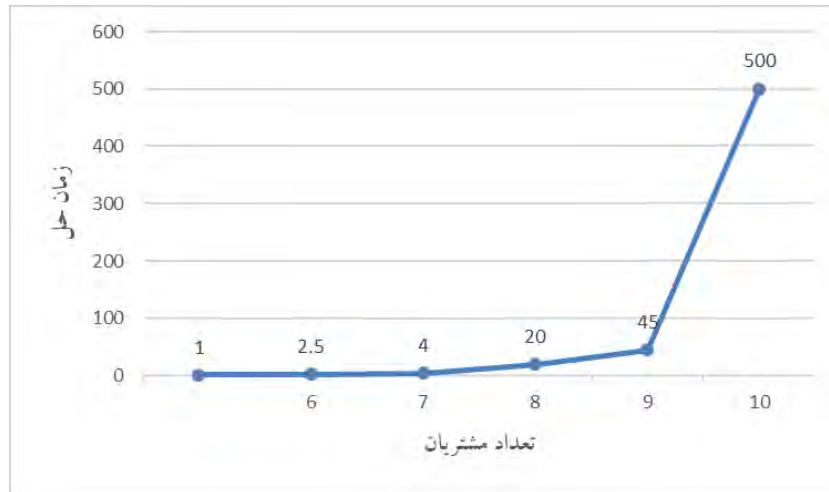
تکرارهای الگوریتم کاهش می یابد، لذا برای آن دو مقدار (اولیه و پایانی) خواهیم داشت.

جدول ۱. تنظیم پارامترها

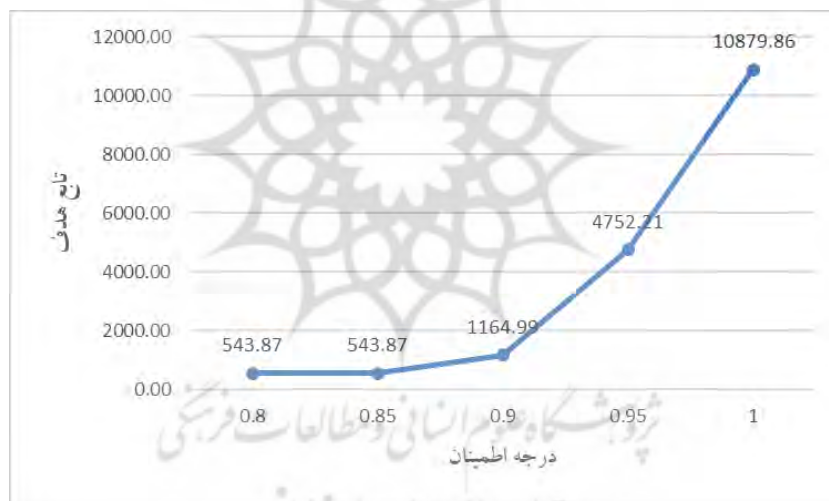
پارامتر	مقدار
$ N $	۴۵
$c_1$	۱,۹۹
$c_2$	۲
$w_{max}$	۰,۹۳
$w_{min}$	۰,۳۵
$t_{max}$	۱۸۰۰
$T_0$	۱۲۵۰
$\alpha$	۰,۹۹

## ۵,۵. تحلیل حساسیت

برای بررسی رفتار مدل نسبت به پارامترها، در این قسمت تحلیل حساست انجام می شود. ابتدا مدت زمان حل مسأله با افزایش تعداد مشتریان در نرم افزار GAMS بررسی شده است که نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد مشتریان از ۹ به ۱۰، زمان حل مسأله افزایش قابل ملاحظه ای دارد و از ۴۵ ثانیه به ۵۰۰ ثانیه رسیده است و برای حالت ۱۱ مشتری روش دقیق قادر به پیدا کردن جواب در زمان قابل قبول نمی باشد (مسأله Np-hard است) و به همین دلیل در این مقاله از الگوریتم IPSO برای حل مسأله استفاده گردیده است. در شکل ۶ مقدار تابع هدف با درجه اطمینان های مختلف را برای یک مساله با ۱۰ مشتری نشان داده ایم و در شکل ۷ نیز مقایسه مقدار تابع هدف برای سه مسأله در حالت قطعی و فازی آورده شده است.

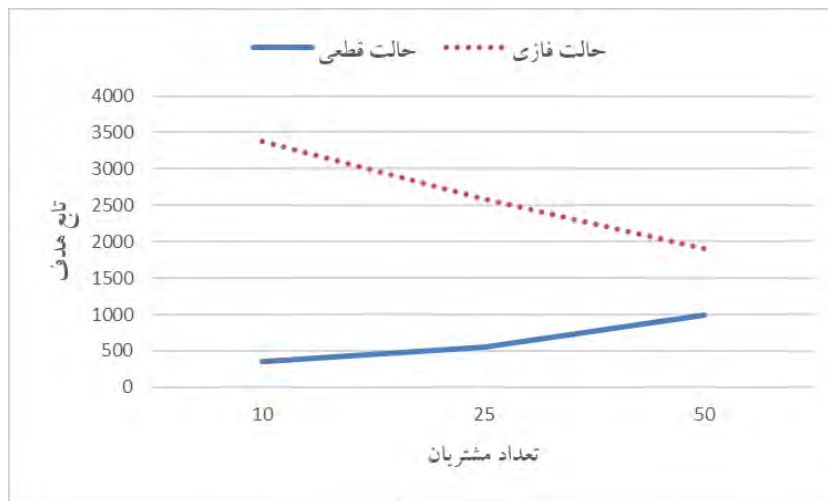


شکل ۵. افزایش زمان حل با افزایش تعداد مشتریان



شکل ۶. افزایش تابع هدف با افزایش درجه اطمینان





شکل ۷. مقایسه مقدار تابع هدف در حالت قطعی و فازی

#### ۵. مطالعه موردی و نتایج محاسباتی

در این قسمت به منظور نشان دادن کاربرد مساله در دنیای واقعی، توزیع محصولات لبنی توسط یک شرکت توزیع کننده بین مشتریان مورد بررسی قرار گرفته است. انبار مرکزی شرکت توزیع کننده در شهر شیراز قرار دارد و شرکت قصد دارد محصولات لبنی را بین نمایندگانی که در بیست و یک شهر و در سرتاسر استان فارس قرار دارند توزیع نماید. هدف کاهش مسافت طی شده و برآوردن تقاضاها در پنجره‌های زمانی مربوطه و با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه و محدودیت‌های زمانی می‌باشد. با توجه به مباحث مطرح شده در قسمت‌های قبل و قطعی نبودن پارامترهای هزینه‌ی ارسال وسایل نقلیه و پنجره‌های زمانی، لذا فرض می‌کنیم این پارامترها به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای می‌باشند. شهرهایی که در این مساله باید ملاقات شوند و همچنین شماره آن‌ها مطابق جدول ۲ می‌باشد که عدد صفر نشان دهنده‌ی انبار مرکزی و اعداد ۱ تا ۲۱ نیز مشتریان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. شهرهای مشتریان در مطالعه انجام شده

شماره	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
شهر	شیراز	آباده	سپیدان	استهبان	ارسنجان	اقلید	بوانات	جهرم	داراب	زرتین دشت	خرمید	فسا	فراسیند	فیروزآباد	فرو و کارزین	کازرون	لاز	لامرد	مرودشت	مهر	مسنی	فیروز

مقادیر  $\theta_1$  تا  $\theta_4$  برای هزینه ارسال وسایل نقلیه به ترتیب ۳۰۰، ۴۳۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ می‌باشد و مقادیر عددی پنجره‌ی زمانی مشتریان مساله نیز مطابق جدول ۳ می‌باشد. پارامترهای تقاضای تحویل، تقاضای برداشت و مدت زمان سرویس‌دهی مشتریان نیز در جدول ۴ ارائه شده است. برای بدست آوردن فواصل دقیق بین شهرها از سایت مسیریابی راههای ایران ۱ کمک گرفته‌ایم که فواصل بین شهرها مطابق جدول ۵ می‌باشد. همچنین زمان سفر بین شهرها نیز برابر مسافت بین شهرها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ظرفیت تمام کامیون‌ها برابر ۷۰۰۰ می‌باشد. الگوریتم ارائه شده در قسمت بالا برای حل مساله با سطح سرویس‌دهی ۹۵ درصد به کار گرفته شده است که با توجه به جواب بدست آمده، ۷ کامیون برای سرویس‌دهی به مشتریان مورد نیاز می‌باشد و بهترین برنامه‌ی عملیاتی برای شرکت به صورت زیر می‌باشد که مقدار تابع هدف ۷۵۵۳٫۹ را نتیجه می‌دهد. مسیری طی شده توسط کامیون‌ها نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

کامیون شماره ۱:	انبار → ۵ → ۱ → ۲ → انبار	مسافت طی شده: ۵۵۱/۸
کامیون شماره ۲:	انبار → ۱۸ → ۴ → ۶ → ۱۰ → انبار	مسافت طی شده: ۵۱۸
کامیون شماره ۳:	انبار → ۱۱ → ۸ → ۲۱ → ۳ → انبار	مسافت طی شده: ۵۹۵/۳
کامیون شماره ۴:	انبار → ۹ → ۱۶ → انبار	مسافت طی شده: ۷۱۲/۱
کامیون شماره ۵:	انبار → ۷ → ۱۴ → ۱۳ → انبار	مسافت طی شده: ۵۲۷/۶
کامیون شماره ۶:	انبار → ۱۹ → ۱۷ → انبار	مسافت طی شده: ۷۶۲/۳
کامیون شماره ۷:	انبار → ۲۰ → ۱۵ → ۱۲ → انبار	مسافت طی شده: ۵۰۹/۳



جدول ۳. مقادیر اعداد فازی برای پنجره ی زمانی مساله

ردیف	e				l			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	296	300	304	305	309	310	316	319
2	67	71	75	76	80	81	87	90
3	167	171	175	176	180	181	187	190
4	394	398	402	403	407	408	414	417
5	374	378	382	383	387	388	394	397
6	239	243	247	248	252	253	259	262
7	376	380	384	385	389	390	396	399
8	351	355	359	360	364	365	371	374
9	469	473	477	478	482	483	489	492
10	179	183	187	188	192	193	199	202
11	477	481	485	486	490	491	497	500
12	166	170	174	175	179	180	186	189
13	103	107	111	112	116	117	123	126
14	246	250	254	255	259	260	266	269
15	292	296	300	301	305	306	312	315
16	328	332	336	337	341	342	348	351
17	371	375	379	380	384	385	391	394
18	503	507	511	512	516	517	523	526
19	452	456	460	461	465	466	472	475
20	383	387	391	392	396	397	403	406
21	222	226	230	231	235	236	242	245

جدول ۴. سایر پارامترهای مساله

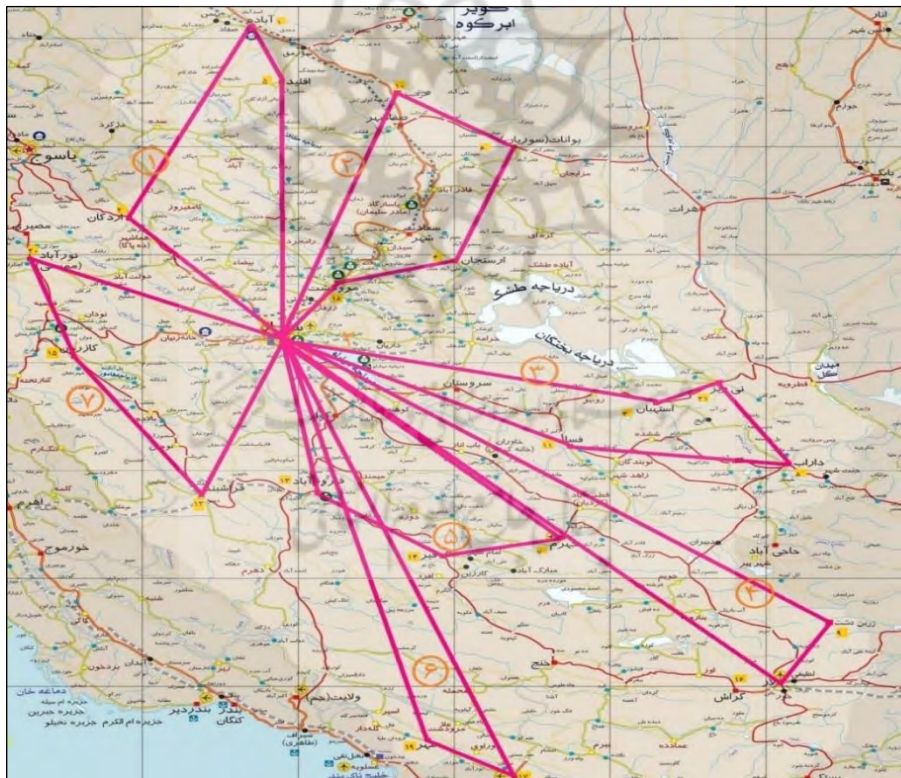
شماره مشتری	تقاضای تحویل	تقاضای برداشت	زمان سرویس دهی
1	00۴۴	10	32
2	850	17	8/5
3	1250	40	12/5
4	1350	25	13/5
5	1110	62	11/1
6	1400	43	14
7	2275	40	22/75
8	1500	39	15
9	2350	72	23/5
10	1760	89	17/6
11	2200	90	22
12	1800	12	18
13	2200	75	22
14	1700	52	17
15	2760	46	27/6
16	3800	16	38
17	3800	39	38
18	2100	80	21
19	2000	92	20
20	1750	60	17/5
21	1300	60	13

جدول ۵. فواصل بین شهرها

3	2	1	0
175/6	75/7	273/4	0
350/6	220/5	0	273/4
251/8	0	220/5	75/7
0	251/8	350/6	175/6
158/8	158/1	185/1	143
339	174/1	45/7	209/9
274/5	245/2	133/4	230/1
154/7	258/5	452/9	182/3
80/4	332/1	457/4	255/9
135/1	349/1	474/3	272/9
347	287	87	187
66/1	226/3	351/5	150/1
315/8	250/2	444/6	174
253/6	188/1	382/5	111/9
266/7	306/3	500/7	230/1
308/1	169/5	371/2	141/2
237/9	413/1	577/1	336/9
400/9	455/4	649/8	379/2
177	75/2	226/2	51/3
481/5	416	610/4	339/8
330/2	191/6	312	163/3
42/3	293/5	352/2	217/3

16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
336/9	141/2	230/1	111/9	174	150/1	187	272/9	255/9	182/3	230/1	209/9	143
577/1	371/2	500/7	382/5	444/6	351/5	87	474/3	457/4	452/9	133/4	45/7	185/1
413/1	169/5	306/3	188/1	250/2	226/3	287	349/1	332/1	258/5	245/2	174/1	158/1
237/9	308/1	266/7	253/6	315/8	66/1	347	135/1	80/4	154/7	274/5	339	158/8
393/2	275/2	368/2	252	314/1	167/6	103	290/5	273/5	256/3	141	180/7	0
544	324/6	437/2	319	381/1	347/2	107	470	453/1	389/4	129/1	0	180/7
534/4	363/1	458	339/8	402	308/9	43	431/7	414/7	410/3	0	129/1	141
160/9	324/3	112/5	157/3	219/5	89/1	380	105/4	140/5	0	410/3	389/4	256/3
170/9	390/2	253	335/7	397/8	111/5	412	68/1	0	140/5	414/7	453/1	273/5
102/3	405/9	217/8	262/7	324/9	127/2	437	0	68/1	105/4	431/7	470	290/5
378	347	356	280	251	217	0	437	412	380	43	107	103
229/9	283/6	200/8	229/1	291/2	0	217	127/2	111/5	89/1	308/9	347/2	167/6
341/1	108/9	180/8	71/2	0	291/2	251	324/9	397/8	219/5	402	381/1	314/1
266/3	179/6	120/9	0	71/2	229/1	280	262/7	335/7	157/3	339/8	319	252
198/8	289/2	0	120/9	180/8	200/8	356	217/8	253	112/5	458	437/2	368/2
470/8	0	289/2	179/6	108/9	283/6	347	405/9	390/2	324/3	363/1	324/6	275/2
0	470/8	198/8	266/3	341/1	229/9	378	102/3	170/9	160/9	534/4	544	393/2
167/3	391/6	220	276/4	280/4	374/4	463	265/3	333/9	286	607/1	586/3	519/3
394/1	186/8	274/5	167/4	223/8	186/5	148	308/8	293/1	239/3	183/5	171/9	95/7
201/6	352/2	254/3	237	240/5	408/7	509	299/6	368/2	320/3	567/7	546/9	479/9
501/3	63/1	350/5	241	168	305/6	345	428	412/3	346/4	352/5	265/4	297/3
274/3	351/2	307/2	287/9	358/2	108/7	379	171/2	115/8	194/8	239/4	347/9	168/3

21	20	19	18	17	0
217/3	163/3	339/8	51/3	379/2	0
352/2	312	610/4	226/2	649/8	1
293/5	191/6	416	75/2	455/4	2
42/3	330/2	481/5	177	400/9	3
168/3	297/3	479/9	95/7	519/3	4
347/9	265/4	546/9	171/9	586/3	5
239/4	352/5	567/7	183/5	607/1	6
194/8	346/4	320/3	239/3	286	7
115/8	412/3	368/2	293/1	333/9	8
171/2	428	299/6	308/8	265/3	9
379	345	509	148	463	10
108/7	305/6	408/7	186/5	374/4	11
358/2	168	240/5	223/8	280/4	12
287/9	241	237	167/4	276/4	13
307/2	350/5	254/3	274/5	220	14
351/2	63/1	352/2	186/8	391/6	15
274/3	501/3	201/6	391/1	167/3	16
439/7	493/3	43/3	431/8	0	17
198/9	207	389/6	0	431/8	18
512/4	470/7	0	389/6	43/3	19
371/3	0	470/7	207	439/3	20
0	371/3	512/4	198/9	439/7	21



شکل ۸. مسیرهای بدست آمده پس از حل مساله

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل فازی بر مبنای اعتبار برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه همگن با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی ارائه شد که در آن پنجره‌های زمانی مشتریان و هزینه‌ی ارسال وسایل نقلیه به صورت اعداد فازی ذوزنقه‌ای می‌باشد. در نهایت مسأله‌ی توزیع محصولات لبنی بین مشتریان در یک شرکت توزیع کننده در سرتاسر استان فارس را بررسی نمودیم که تطابق زیادی با مدل ارائه شده در این مقاله دارد و با توجه به NP\_hard بودن مساله، از یک الگوریتم ترکیبی با نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته برای حل مدل ارائه شده استفاده نمودیم که نتایج قابل قبولی را در مدت زمان کوتاه برای مساله ارائه می‌نماید و لذا بسیاری از توزیع کنندگان می‌توانند از این شیوه برای تعیین مسیرهای وسایل نقلیه استفاده نموده و موجب کاهش قابل توجه در هزینه‌های عملیاتی شرکت گردند.

### ORCID

Hamed Alinezhad



<http://orcid.org/0000-0002-5604-4542>

Saeed Yaghoubi



<http://orcid.org/0000-0003-1218-9050>

Seyyed-Mahdi Hosseini-



<http://orcid.org/0000-0003-2568-187X>

Motalgh



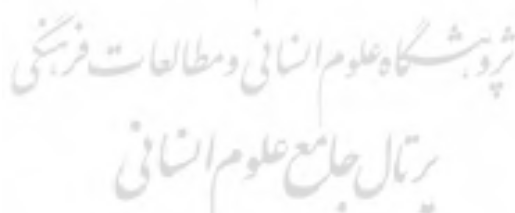
## منابع

1. Dantzig, G.B. and J.H. Ramser, *The truck dispatching problem*. Management science, 1959. 6(1): p. 80-91.
2. Erbao, C. and L. Mingyong, *A hybrid differential evolution algorithm to vehicle routing problem with fuzzy demands*. Journal of computational and applied mathematics, 2009. 231(1): p. 302-310.
3. Pishvae, M., S. Torabi, and J. Razmi, *Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty*. Computers & Industrial Engineering, 2012. 62(2): p. 624-632.
4. Bertsimas, D.J., *A vehicle routing problem with stochastic demand*. Operations Research, 1992. 40(3): p. 574-585.
5. Dror, M., G. Laporte, and P. Trudeau, *Vehicle routing with stochastic demands: Properties and solution frameworks*. Transportation science, 1989. 23(3): p. 166-176.
6. Gendreau, M., G. Laporte, and R. Séguin, *Stochastic vehicle routing*. European Journal of Operational Research, 1996. 88(1): p. 3-12.
7. Liu, B. and K. Lai. *Stochastic programming models for vehicle routing problems*. in *Focus on computational neurobiology*. 2004. Nova Science Publishers, Inc.
8. Teodorović, D. and G. Pavković, *The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain*. Fuzzy sets and systems, 1996. 82(3): p. 307-317.
9. El-Sayed, M., N. Afia, and A. El-Kharbotly, *A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk*. Computers & Industrial Engineering, 2010. 58(3): p. 423-431.
10. Pishvae, M.S., F. Jolai, and J. Razmi, *A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design*. Journal of Manufacturing Systems, 2009. 28(4): p. 107-114.
11. Schütz, P., A. Tomasgard, and S. Ahmed, *Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition*. European Journal of Operational Research, 2009. 199(2): p. 409-419.
12. Pishvae, M.S., M. Rabbani, and S.A. Torabi, *A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty*. Applied Mathematical Modelling, 2011. 35(2): p. 637-649.
13. Pishvae, M. and S. Torabi, *A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty*. Fuzzy sets and systems, 2010. 161(20): p. 2668-2683.

14. Qin, Z. and X. Ji, *Logistics network design for product recovery in fuzzy environment. European Journal of Operational Research*, 2010. 202(2): p. 479-490.
15. Cheng, R., M. Gen, and T. Tozawa, *Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms. 日本フuzzy学会誌*, 1995. 7(5): p. 1050-1061.
16. Lai, K., B. Liu, and J. Peng, *Vehicle routing problem with fuzzy travel times and its genetic algorithm*. 2003, *Technical Report*.
17. He, Y. and J. Xu, *A class of random fuzzy programming model and its application to vehicle routing problem. World Journal of Modelling and simulation*, 2005. 1(1): p. 3-11.
18. Zheng, Y. and B. Liu, *Fuzzy vehicle routing model with credibility measure and its hybrid intelligent algorithm. Applied mathematics and computation*, 2006. 176(2): p. 673-683.
19. Van Woensel, T., et al., *Vehicle routing with dynamic travel times: A queueing approach. European Journal of Operational Research*, 2008. 186(3): p. 990-1007.
20. Tang, J., et al., *Vehicle routing problem with fuzzy time windows. Fuzzy Sets and Systems*, 2009. 160(5): p. 683-695.
21. Brito, J., J.A. Moreno, and J.L. Verdegay. *Fuzzy Optimization in Vehicle Routing Problems. in IFSA/EUSFLAT Conf*. 2009.
22. Cao, E. and M. Lai, *The open vehicle routing problem with fuzzy demands. Expert Systems with Applications*, 2010. 37(3): p. 2405-2411.
23. Gupta, R., B. Singh, and D. Pandey, *Fuzzy vehicle routing problem with uncertainty in service time. International Journal of Contemporary Mathematical Sciences*, 2010. 5(11): p. 497-507.
24. Xu, J., F. Yan, and S. Li, *Vehicle routing optimization with soft time windows in a fuzzy random environment. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011. 47(6): p. 1075-1091.
25. Kuo, R., F.E. Zulvia, and K. Suryadi, *Hybrid particle swarm optimization with genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with fuzzy demand—A case study on garbage collection system. Applied Mathematics and Computation*, 2012. 219(5): p. 2574-2588.
26. Duygu, T., et al., *Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time windows and service costs. Computers & Operations Research*, 2013. 40: p. 214-224.
27. Ghaffari-Nasab, N., S.G. Ahari, and M. Ghazanfari, *A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands. Scientia Iranica*, 2013. 20(3): p. 919-930.

28. Zare Mehrjerdi, Y. and A. Nadizadeh, *Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. European Journal of Operational Research*, 2013. 229(1): p. 75-84.
29. Nadizadeh, A. and H. Hosseini Nasab, *Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. European Journal of Operational Research*, 2014. 238(2): p. 458-470.
30. Dinc Yalcin, G. and N. Erginel, *Fuzzy multi-objective programming algorithm for vehicle routing problems with backhauls. Expert Systems with Applications*, 2015. 42(13): p. 5632-5644.
31. Kuo, R.J., B.S. Wibowo, and F.E. Zulvia, *Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time. Applied Mathematical Modelling*, 2016. 40(23): p. 9990-10001.
32. Bahri, O., N.B. Amor, and E.-G. Talbi, *Robust Routes for the Fuzzy Multi-objective Vehicle Routing Problem. IFAC-PapersOnLine*, 2016. 49(12): p. 769-774.
33. Majidi, S., et al., *Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pickup – delivery and time windows. RAIRO-Oper. Res.*, 2017. 51(4): p. 1151-1176.
34. Shi, Y., T. Boudouh, and O. Grunder, *A hybrid genetic algorithm for a home health care routing problem with time window and fuzzy demand. Expert Systems with Applications*, 2017. 72: p. 160-176.
35. Zadeh, L.A., *Fuzzy sets. Information and control*, 1965. 8(3): p. 338-353.
36. Kaufmann, A., *Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets*. 1975, New York: Academic Press.
37. Negoita, C., L. Zadeh, and H. Zimmermann, *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy sets and systems*, 1978. 1: p. 3-28.
38. Liu, B., *Uncertain Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations*. 2004, Berlin: Springer.
39. Liu, B. and Y.K. Liu, *Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. IEEE Transactions on fuzzy systems*, 2002. 10(4): p. 445-450.
40. Liu, B. and K. Iwamura, *Chance constraint programming with fuzzy parameters. Fuzzy Sets and Systems*, 1998. 94: p. 227-237.
41. Liu, B., *Dependent chance programming with fuzzy decisions. IEEE Transactions and Fuzzy Systems*, 1999. 7(354-360).
42. Karaoglan, I., et al., *The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. Omega*, 2012. 40: p. 465-477.

43. Chen, C.-Y. and F. Ye. *Particle swarm optimization algorithm and its application to clustering analysis*. in *Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference on*. 2004. IEEE.
44. Hamed, A., et al., *An improved particle swarm optimization for a class of capacitated vehicle routing problems*. *International Journal of Transportation Engineering*, 2017. 5(4): p. 331-347.
45. Shi, Y. and R.C. Eberhart, *A modified particle swarm optimizer*. *Proceedings of the Congress Evolutionary Computer*, 1998: p. 69–73.
46. Lichtblau, T., *Discrete optimization using mathematica*, in *World Multi Conference on Systemics and Informatics*, N. Callaos, et al., Editors. 2002, *International Institute of Informatics and Systemics*. p. 169-174.
47. Wang, H., et al., *Diversity enhanced particle swarm optimization with neighborhood search*. *Information Sciences*, 2013. 223: p. 119-135.
48. Cho, P., et al., *An assessment of consecutively presenting orthokeratology patients in a Hong Kong based private practice*. *Clinical and Experimental Optometry*, 2003. 86(5): p. 331-338.
49. Planeta, D.S., *Priority Queue Based on Multilevel Prefix Tree*. arXiv preprint arXiv:0708.2936, 2007.



استاد به این مقاله: علی نژاد، حامد، یعقوبی، سعید، حسینی مطلق، سید مهدی. (۱۴۰۰). ارائه یک رویکرد فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی با استفاده از الگوریتم PSO بهبود یافته (مطالعه موردی شرکت فراورده‌های لبنی رامک)، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰(۶۴)، ۲۱۵-۲۵۰.

DOI: 10.22054/JIMS.2018.29544.1984



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.