نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

Journal of Decisions and Operational Research

دوره ۳، شماره (۲)، تابستان ۱۳۹۷

# حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با در نظر گرفتن پنجره زمانی و تقاضای فازی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در خدمات بهداشت خانگی

**مسعود ربانی[1]*، مریم توحیدی فرد[1]، محمد پرتوی[1]، حامد فرخی اصل[2]**

[1]دانشکده مهندسی صنایع و سیستم، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[2]دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

## چکیده

در دنیای امروز، برطرف کردن نیازهای بهداشتی و درمانی بیماران در منزل دارای فواید متعددی است. با ارائه خدمات درمانی به‌صورت منظم و به‌موقع، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، روند بهبودی بیمار نیز سرعت می‌یابد. در این مقاله، یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با در نظر گرفتن پنجره زمانی و تقاضای فازی در نظر گرفته‌شده است. این مسئله، درصدد است تا با مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی به‌گونه‌ای عمل کند که مسافت طی شده، زمان کل سفر، تعداد وسایل حمل‌ونقل و تابع هزینه حمل‌ونقل حداقل گردد و با در نظر گرفتن پنجره زمانی سخت، جهت ملاقات بیماران، رضایت بیماران افزایش یابد. این مسئله جزء مسائل پیچیده و متعلق به کلاسNP-hard است و حل آن از طریق برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود مدت‌زمان بالایی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا در این مقاله برای حل آن از دو رویکرد فرا ابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده‌شده است. با توجه به حساسیت الگوریتم‌های فرا ابتکاری به مقدار پارامترهایشان، برای تنظیم این پارامترها از متدولوژی سطح پاسخ استفاده‌شده است. تعدادی مسئله برای نشان دادن کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی حل‌شده است و نتایج محاسباتی با نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مسیریابی وسایل نقلیه، پنجره زمانی، تقاضای فازی، متدولوژی سطح پاسخ، الگوریتم فرا ابتکاری.

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۷ اصلاح: ۱۳۹۷/۳/۹ پذیرش : ۱۳۹۷/۴/۱۲

## ۱- مقدمه

امروزه، به دلیل بالا رفتن امید به زندگی و کاهش میزان زادوولد در کشورهای درحال‌توسعه و توسعه‌یافته، پدیده سالمندی بیش‌ازپیش موردتوجه است. بر اساس آمارهای سازمان بهداشت جهانی، در سال ۶۰۰،۲۰۰۰ میلیون سالمند در جهان وجود داشت که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۵، تعداد سالمندان به یک میلیارد و دویست میلیون نفر و در سال ۲۰۵۰، به دو میلیارد نفر برسد. بر این اساس، سالمندان سریع‌ترین نرخ رشد جمعیت را در بین گروه‌های مختلف سنی دارند. هم‌اکنون، حدود دوسوم جمعیت سالمند دنیا در کشورهای درحال‌توسعه مانند ایران زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود این رقم در سال ۲۰۵۰ به ۸۰ درصد برسد. مطابق داده‌های حاصل از گزارش مرکز آمار ایران، جمعیت سالمند ایران ۳/۹ درصد در سال ۱۳۵۵ بوده است که با افزایش دو برابری به ۷/۳ درصد در سال ۱۳۸۵ رسیده است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، تعداد سالمندان ایرانی در سال ۲۰۵۰ میلادی به رقم ۲۶ میلیون و ۳۹۳ هزار نفر (۲۶ درصد کل جمعیت) خواهد رسید که رقمی قابل‌توجه است. (امیرسدی و سلیمانی، ۲۰۰۵)

*عهده‌دار مکاتبات: mrabani@ut.ac.ir

طبق تعریف ارائه‌شده توسط برتلس و فهل (۲۰۰۶)، به مجموعه فعالیت‌های ویزیت بیماران، ارائه خدمات درمانی و مراقبت از بیماران در منزل، مراقبت بهداشت خانگی[۱] گفته می‌شود. با بهینه‌سازی ارائه خدمات بهداشتی و درمانی خانگی می‌توان بیماران را از مزایای این‌گونه خدمات بهره‌مند ساخت (مجیدی و همکاران، ۲۰۱۷). این خدمات می‌تواند طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها نظیر ویزیت بیمار توسط پزشک، تحویل دارو و تجهیزات پزشکی به بیمار؛ دریافت نمونه‌های آزمایشگاهی، داروها و تجهیزاتی که به هر دلیلی مورداستفاده قرار نگرفته‌اند تا ارائه خدمات تعمیرات، نگهداری تجهیزات و دستگاه‌های پزشکی در منزل را در برگیرد (برتلس و فهل، ۲۰۰۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۳)

امروزه برنامه‌های مراقبت در منزل در پاسخ به نیازهای بیماران در سطح جامعه افزایش پیداکرده است؛ از علت‌های این رشد سریع، اثبات کارایی مراقبت‌های خانگی بیماران در مواجهه با نیازهای مختلف بیماران است که به‌صورت افزایش کارایی و موثربودن این روش به اثبات رسیده است. مطالعه‌ای بر روی ۶۰۰ بیمار انجام شد و نشان داد که ۸۱ درصد بیمارانی که برای بستری شدن در بیمارستان ارجاع می‌شوند می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیزی در منزل تحت درمان قرار گیرند. به‌علاوه، زمان اقامت در بیمارستان به‌طور تقریبی از ۱۲ روز به ۷ روز کاهش پیدا کرد و فقط ۱۲ درصد از بیمارانی که مراقبت در منزل از آن‌ها به عمل می‌آمد دوباره به بستری شدن در بیمارستان نیاز پیدا کردند. با توجه به اهمیت موضوع، در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مسیریابی وسایل نقلیه با چند انباره با پنجره زمانی[۲] و تقاضای فازی[۳] ارائه‌شده است. علاوه بر این، به علت ضرورت خدمات‌رسانی به‌موقع به بیماران با هدف حداقل کردن هزینه، یک مسئله مکان‌یابی جهت تعیین مکان انبارهای دارویی نیز در نظر گرفته‌شده است که سازمان مربوطه برای تامین بهنگام نیاز دارویی بیماران از بین چندین انبار موجود، به نزدیک‌ترین انبار دارویی ممکن بازگردد. ادامه مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲، بررسی اجمالی از پژوهش‌های پیشین درزمینه‌ی سازمان‌های مراقبت از بهداشت خانگی ارائه می‌گردد. در بخش۳، یک مدل ریاضی همراه با نمادها و فرضیات مسئله ارائه می‌گردد. در بخش ۴، روش‌های حل مسئله موردنظر شرح داده‌شده است. در بخش ۵، نتایج محاسباتی و تنظیم پارامتر با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ ارائه می‌گردد و درنهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی در بخش ٦ آورده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه که یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است، اولین بار در مقاله دانتیک در سال ۱۹۵۹ معرفی شد که به‌طور وسیعی موردبررسی قرارگرفته است (دانتیگ و رمسر، ۱۹۵۹). مدل عمومی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه شامل مجموعه‌ای از مشتریان است که تقاضای هر یک از آن‌ها معلوم و هر مشتری تنها یک‌بار و به‌طور کامل خدمت می‌گیرد. فرض می‌شود که همه وسایل نقلیه همگن و شروع و پایان هر وسیله، یک انبار مشخص است؛ هدف اصلی، کمینه‌سازی کل مسافت طی شده توسط تمامی وسایل نقلیه است. با توجه به محدودیت‌های موجود در دنیای واقعی، محدودیت‌هایی به مدل کلاسیک اضافه می‌شود (امبوکای برمن و هانسهار، ۲۰۰۹). ما در این مقاله به مطالعه‌ی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره[۴] می‌پردازیم. تفاوت مسئله چند انباره با مسیریابی کلاسیک در این است که در مسائل چند انباره، دیگر تنها یک انبار به همه‌ی مشتری‌ها خدمت نمی‌دهد، بلکه مشتری‌ها کالاهای خود را از چندین انبار دریافت می‌کنند (بل و همکاران، ۱۹۸۳). در ادامه، به‌مرور تعدادی از مقالات مرتبط با ادبیات موضوع می‌پردازیم.

در سال ۲۰۰۹، پژوهشی با در نظر گرفتن تنها متغیرهای عدد صحیح، به ارائه یک مدل عدد صحیح خالص پرداخت و مسئله مسیریابی خدمه در مراقبت بهداشت خانگی را با الگوریتم شاخه و قیمت[۵] به‌صورت دقیق حل نمود. این مسئله، حالت خاصی از مسئله فروشنده دوره‌گرد تحت محدودیت پنجره زمانی است (کرگوزین و همکاران، ۲۰۰۹). کپنارا و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تاثیر سیاست‌های تولید الگو بر روی تصمیمات برنامه‌ریزی و مسیریابی در مراقبت بهداشت خانگی پرداختند. منظور از الگو در این مقاله مجموعه سناریوهای مشخصی برای تلفیق تصمیمات مختلف است. تورس روماس و همکاران (۲۰۱۴) به ارائه مدل ریاضی برای مسئله

---

[۱] Home Health Care (HHC)
[۲] Time Window
[۳] Fuzzy Demand
[۴] Multi Depots Vehicle Routing Problem (MDVRP)
[۵] Branch and price algorithm ( B&P)

مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت بهداشت خانگی با در نظر گرفتن شیوه‌های درمانی مختلف و پنجره زمانی پرداختند. آن‌ها با ارائه یک مدل عدد صحیح مختلط، مسئله مذکور را به‌طور دقیق حل نمودند. یالسینداگ و همکاران (۲۰۱۴) مسئله مسیریابی و تخصیص در مراقبت بهداشت خانگی را با رویکردی دومرحله‌ای بررسی کردند. در این مقاله، برای تخمین زمان سفر وسیله نقلیه از روش رگرسیونی کرنل استفاده کردند. یوان و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای درزمینه‌ی مسیریابی و زمان‌بندی سازمان‌های مراقبت خانگی باهدف حداقل کردن هزینه‌های کل ارائه کردند. نوآوری‌های ارائه‌شده در این مطالعه، به‌طور هم‌زمان، نیازهای مختلف مشتریان و زمان سرویس تصادفی را در نظر می‌گیرد، همچنین از الگوریتم شاخه و قیمت برای حل مسئله و طراحی و تدوین یک الگوریتم برای حل مشکل قیمت‌گذاری استفاده می‌نماید. درنهایت، اثربخشی الگوریتم پیشنهادشده از طریق آزمایش‌های عددی تایید می‌شود.

بیشتر مقالات موجود درزمینه‌ی مراقبت بهداشت خانگی از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی مسئله در ابعاد بزرگ استفاده کرده‌اند. فریفیتا و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای درزمینه‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش، الگوریتم جستجوی همسایگی[1] را استفاده کردند. هدف آن‌ها از این مسئله، تخصیص بهینه بیماران به پرستاران بود. چنگ و ریچ (۱۹۹۸) مسئله زمان‌بندی پرستاران تحت محدودیت پنجره زمانی را موردبررسی قراردادند و برای بهبود این مسئله از دو روش ابتکاری استفاده کردند. تراساموبزر و هیرش (۲۰۱۱) یک مدل دوهدفه برای مسیریابی و زمان‌بندی مراقبت بهداشت خانگی با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی ارائه کردند. هدف از مسئله، ارائه مسیر و برنامه‌ای مناسب برای پرستاران جهت ارائه خدمات به بیماران با حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی و حداکثر کردن سطح خدمات ارائه‌شده به بیماران است. درنهایت، مقایسه با راه‌حل‌های دقیق بر روی نمونه‌های کوچک نشان می‌دهد که الگوریتم به‌اندازه کافی مشکل موردمطالعه را حل کرده است.

تعدادی از مقالات با تلفیق چندین رویکرد حل و بهینه‌سازی مسئله مراقبت بهداشتی خانگی، در ادامه موردبررسی قرارگرفته‌اند. برتلس و فهل (۲۰۰۶) در تحقیقی، طی رویکرد دومرحله‌ای، در ابتدا با به‌کارگیری برنامه‌ریزی محدودیت، به یک جواب اولیه مناسب برای مسئله برنامه‌ریزی خدمه و مسیریابی در مراقبت بهداشت خانگی دست یافتند. سپس، در مرحله دوم، حل با استفاده از رویکردهای فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید[2] و جستجوی ممنوعه، جواب اولیه را بهبود دادند. جمعی از نویسندگان ازجمله برتلس و فهل (۲۰۰۶)؛ نیکل و همکاران (۲۰۱۲) مسئله تخصیص و مسیریابی پرستاران در بهداشت و درمان خانگی در کشور آلمان را موردپژوهش قرار داده‌اند. آن‌ها از یک رویکرد دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی ارائه خدمات هفتگی استفاده کردند که در آن، در ابتدا با استفاده از رویه‌ای ابتکاری به ایجاد جواب اولیه پرداختند و سپس برنامه زمان‌بندی را بهبود دادند. براکرز و همکاران (۲۰۱۶) بر روی یک مسئله چندهدفه مسیریابی و زمان‌بندی در مراقبت بهداشت خانگی مطالعه کردند. در این پژوهش، آن‌ها برای حل مسئله تلفیقی از رویکرد فرا ابتکاری جستجوی محلی چندجهته و جستجوی همسایگی بزرگ استفاده کردند. این نایلی و همکاران (۲۰۱۵) به تخصیص منابع انسانی و مسیریابی مراقبت بهداشت خانگی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، یک رویکرد چندهدفه مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی[3] ارائه کردند. هدف آن‌ها، پیدا کردن یک طرح کاری عملی مؤثر برای هر یک از منابع به‌صورت روزانه که رضایت کارکنان و بیماران را تضمین کند و درعین‌حال هزینه‌ها را کنترل نماید، بود. برای حل مدل از روش سیپلکس استفاده کردند. نتایج عددی نشان می‌دهد که تعادل خوبی بین ترجیحات بیماران و کارکنان و هزینه سفر با استفاده از روش ارائه‌شده می‌توان ایجاد کرد.

در مقایسه با دیگر کارهای پژوهشی موجود درزمینه‌ی مراقب بهداشت خانگی، کرگوشن و همکاران (۲۰۱٤) مسئله جمع‌آوری نمونه-های آزمایشگاهی بیماران در مراقبت بهداشت خانگی را بررسی کردند. در این مقاله، از دو روش ابتکاری جستجوی ممنوعه و جستجوی همسایگی متغیر برای حل مدل عدد صحیح ارائه‌شده استفاده شد. لیو و همکاران (۲۰۱٤) مسئله مراقبت بهداشت خانگی را از منظر دریافت و رساندن دوره‌ای کالا موردبررسی قرار داده‌اند. نوآوری موجود در این مقاله، تلفیق زمان‌بندی مراجعه به بیمارستان و آزمایشگاه به همراه ارائه خدمت به بیماران است. آن‌ها مدل خود را با استفاده از روش جستجوی ممنوعه و جستجوی محلی شدنی و نشدنی در ابعاد بزرگ حل کردند. با بررسی ادبیات مراقبت بهداشت خانگی درمی‌یابیم که تابه‌حال به‌صورت هم‌زمان، به مکان‌یابی و مسیریابی وسایل نقلیه برای مراقبت بهداشت خانگی با درنظرگرفتن پنجره زمانی و تقاضای فازی پرداخته نشده است. از طرفی، مدلی

[1] Variable Neighborhood Search (VNS)

[2] Simulated Annealing (SA)

[3] Integer Linear Programming

که هم‌زمان با اهداف نام‌برده، به نیازهای متفاوت بیماران با در نظر گرفتن سطح مهارت متفاوت کارکنان پرداخته باشد، ارائه نشده است. ازاین‌رو، در مطالعه پیش رو، مدل ریاضی که اهداف فوق را برآورده نماید، ارائه‌شده است. در ادامه، به‌منظور نشان دادن برتری و نوآوری مطالعه حاضر، ویژگی‌های پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های مشابه در سال‌های اخیر در جدول ۱ نشان داده‌شده است.





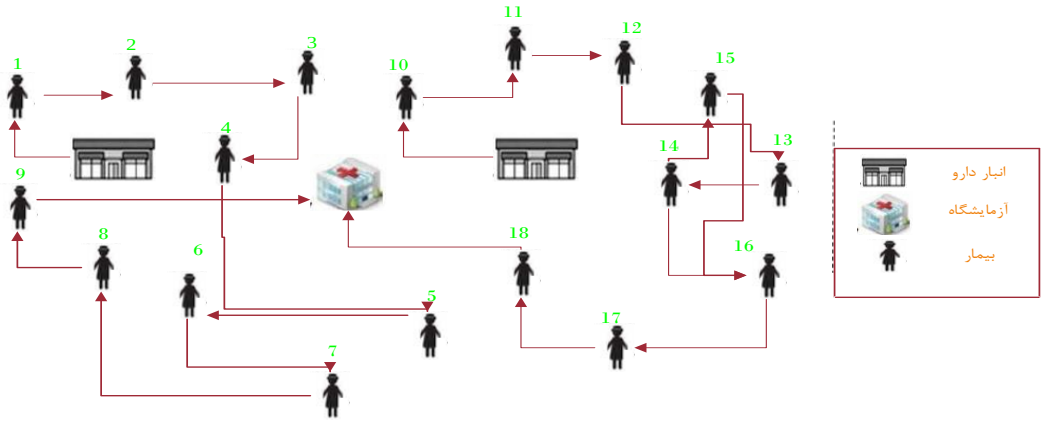
**جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های مشابه در سال‌های اخیر.**

| مراجع | چند انباره | تقاضای فازی | پنجره زمانی | اهداف | روش حل |
|---|---|---|---|---|---|
| برد استورم و همکاران (۲۰۰۸) | - | - | - | حداقل سازی: مجموع وزنی تنظیمات، زمان سفر | MILP Solver, Local Branching Heuristic |
| تراساموپزر و هیرش (۲۰۱۱) | - | - | - | حداقل سازی: مسافت طی شده، نارضایتی مشتریان و پرستاران | Variable Neighborhood Search |
| راسمونسن و همکاران (۲۰۱۲) | - | - | - | حداقل سازی: مجموع هزینه‌های سفر' بازدیدکنندگان پوشش نداده شده 'حداکثر رساندن تنظیمات سرپرست بازدید | Branch-And-Price |
| آلوا و همکاران (۲۰۱۳) | - | - | * | حداقل سازی: تعداد کارکنان | CPLEX-IBM, Mat Heuristic Method |
| منکوسکا و همکاران (۲۰۱۴) | - | - | - | حداقل سازی: هزینه‌ها و حداکثر سازی: کیفیت خدمات | Adaptive Variable Neighborhood Search, Construction Heuristic, Local Search |
| یوان و همکاران (۲۰۱۵) | - | - | - | حداقل سازی: هزینه سفر، هزینه ثابت سرپرستان، هزینه خدمات و هزینه جریمه برای سرویس‌دهی دیر به مشتری | Branch-And-Price Algorithm |
| ان نهلی و همکاران (۲۰۱۶) | - | - | * | حداقل سازی: مدت‌زمان سفر بیماران | Variable Neighborhood Descent Method, Iterated Local Search |
| دسرله و همکاران (۲۰۱۶) | - | - | - | حداقل سازی: هزینه حمل‌ونقل و ساعات کاری | Global Approach, Two-Phases Metaheuristic |
| مطالعه حاضر | * | * | * | حداقل کردن هزینه‌های کل | GAMS,GA,PSO |

## ۳- شرح مسئله

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی، یکی از مسائل چالش‌برانگیز و دشوار است که در دسته مسائل مسیریابی وسایل نقلیه قرار می‌گیرد. این مسئله، با توجه به اهمیت بالایی که به بحث زمان در حل مسائل می‌دهد، در عمل از کاربرد بیشتری برخوردار بوده و لذا توجه بیشتری را در محافل علمی به خود اختصاص داده است. در این مقاله، یک مدل ریاضی مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با در نظر گرفتن پنجره زمانی و تقاضای فازی برای سازمان‌های مراقبت از بیماران ارائه‌شده است. علاوه بر آن، یک مدل مکان یابی-

تخصیص برای تعیین مکان انبارهای دارویی در نظر گرفته‌شده است. در این مدل، چندین مکان برای انتخاب مکان انبارهای دارو کاندید می‌شود، سپس از بین مکان‌های کاندید شده، پنج مکان به‌عنوان محل نهایی انبارهای دارو انتخاب می‌شوند. در مدل ارائه‌شده، پنج انبار، یک آزمایشگاه و تعدادی بیمار برای خدمت‌رسانی وجود دارد. مسیر هر وسیله نقلیه از انبارها شروع می‌گردد، سپس به هر بیمار سرویس رسانی می‌شود؛ درصورتی‌که دارو به‌اندازه موردنیاز بیمار، موجود نباشد به نزدیک‌ترین انبار دارو بازمی‌گردد و به‌اندازه ظرفیت وسیله نقلیه، دارو حمل می‌کند و به سایر بیماران سرویس رسانی انجام می‌گردد. درنهایت، پس از اتمام سرویس‌دهی به کل بیماران تعیین‌شده، به آزمایشگاه بازمی‌گردد. در طول فرآیند تحویل دارو، مقدار داروهای موردنیاز برای هر بیمار، غیرقطعی است و تقاضای هر بیمار، یک متغیر فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ تصویر شماتیک از مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.




**شکل ۱- تصویر شماتیک مدل ریاضی پیشنهادی در این پژوهش.**

## ۳-۱ مفروضات مسئله

مفروضات در نظر گرفته‌شده در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

- *وسایل نقلیه مورداستفاده ناهمگن هستند (ظرفیت وسایل نقلیه است).*
- *مسیر هر خودرو از انبار آغاز می‌شود، سپس هر بیمار را ملاقات می‌کند و خدمات مربوط به هر بیمار انجام می‌گردد؛ درنهایت به آزمایشگاه بازمی‌گردد.*
- *هر وسیله نقلیه بیش از یک‌بار استفاده نمی‌شود.*
- *تقاضای هر بیمار یک متغیر مثلث فازی به‌صورت* $\tilde{d}_i = (d_{1.i}. d_{2.i}. d_{3.i})$ *می‌باشد.*
- *هر پرستار یک مسیر برای فرآیند تحویل دارو طی می‌کند و درصورتی‌که داروهای باقی‌مانده برای سایر بیماران کافی نباشد به نزدیک‌ترین انبار بازمی‌گردد تا داروی موردنیاز سایر بیماران را فراهم نماید.*
- *برخی از بیماران به یک خدمت و برخی دیگر به دو خدمت نیاز دارند.*
- *خدمات دریافتی هر بیمار متفاوت است.*
- *پرسنل دارای مهارت‌های متفاوتی هستند.*

## ۳-۲ نمادهای مسئله

نمادهای استفاده‌شده در این مدل به شرح زیر است:

### اندیس‌ها

- $K= \{1, 2, \cdots k\}$ *اندیس وسایل نقلیه.*
- $i, j= \{1, 2, \cdots. m+n+1\}$ *که* $m$ *بیانگر تعداد انبارها و* $n$ *تعداد بیماران می‌باشد.*

**پارامترها**

- $V$ مجموعه‌ای از وسایل نقلیه.
- $N$ مجموعه نقاط (گره‌ها) شامل انبارها، بیماران و آزمایشگاه.
- $q$ ظرفیت وسیله نقلیه.
- $\tilde{d}_i = (d_{i.1}. d_{i.2}. d_{i.3})$ تقاضای فازی برای بیمار $i$ ام.
- $\mathrm{Q_k}$ ظرفیت وسایل نقلیه $k$ ام.
- $w_i$ زمان خدمت‌دهی دکتر/پرستار به بیمار $i$ ام.
- $t_{ij}$ زمان سفر از بیمار $i$ ام به بیمار $j$ ام.
- $e_i$ زودترین زمان خدمت به بیمار $i$ ام.
- $l_i$ دیرترین زمان خدمت به بیمار $i$ ام.
- $C_{ij}$ فاصله برحسب هزینه سفر از گره $i$ به گره $j$.
- $S$ مجموعه‌ای از بیماران که به دو خدمت نیاز دارند.
- $p$ تعداد انبارها.
- $u_i$ متغیر مصنوعی؛ جهت ایجاد محدودیت زیر تور مورداستفاده قرار می‌گیرد.
- $M$ یک عدد مثبت بزرگ؛ این پارامتر جهت ایجاد محدودیت پنجره زمانی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

**متغیرها**

- $S_{ik}$ زمانی که وسیله نقلیه $k$ ام سرویس‌دهی به بیمار $j$ ام را شروع می‌کند.
- $x_{ijk}$ زمانی که وسیله نقلیه $\mathrm{k}$ ام از گره $\mathrm{i}$ به گره $\mathrm{j}$ سفر کند مقدار ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر است.

$$y_j = \begin{cases} ۱ & \text{انتخاب انبار } j \text{ ام} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

## ۳-۳ مدل ریاضی پیشنهادی

با توجه به پارامترها و متغیرهای تعریف‌شده، مدل ریاضی پیشنهادی متشکل از یک تابع هدف و ۱۳ دسته محدودیت می‌باشد که پس از معرفی مدل ریاضی، توضیحات بیشتری در مورد تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه خواهد شد.

معادله (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. تابع هدف مدل پیشنهادی، حداقل کردن هزینه کل شامل هزینه‌های سفر می‌باشد. محدودیت (۲) نیز به محدودیت زیر تور معروف است؛ یعنی حذف تور یا حلقه‌های احتمالی که فاقد نقطه مبدا می‌باشند. ازجمله مشکلات مسائل مسیریابی وسایل نقلیه وجود زیر تورهاست که یکی از راه‌حل‌های آن استفاده از زیرمجموعه‌ها برای گره‌هاست. محدودیت (۳) بیانگر این است که بیماران عضو مجموعه $S$ نیازمند دو مرتبه سرویس‌دهی هستند. محدودیت (۴) بیانگر آن است که بیمارانی که عضو مجموعه $S$ نیستند نیازمند یک مرتبه سرویس‌دهی می‌باشند. محدودیت (۵) بیانگر این است که پس از سرویس‌دهی به بیمار، پرستار، مکان موردنظر را ترک خواهد کرد (هر بیمار یک‌بار ملاقات می‌شود). محدودیت (۶) نشان‌دهنده این موضوع که تمام وسایل نقلیه پس از سرویس‌دهی به بیماران تعیین‌شده، به آزمایشگاه بازمی‌گردند. محدودیت (۷) بدین معنی است که وسیله نقلیه $j$ ام باید قبل از زمان $S_{ik} + w_i + t_{ij}$ برسد. محدودیت (۸) اشاره به محدودیت پنجره زمانی دارد. محدودیت (۹) بیانگر این است که هیچ وسیله نقلیه‌ای بیش از ظرفیت خودبارگیری نشود. محدودیت (۱۰) جز محدودیت‌های اصلی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه می‌باشد و بیانگر این موضوع است که هر گره یک‌بار ملاقات شود. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) نشان‌دهنده این است که نیازی به وجود مسیر بین انبارها نمی‌باشد. محدودیت (۱۳) نشان‌دهنده این است که درصورتی‌که انبار j ام انتخاب گردد مقدار متغیر یک و

در غیر این صورت مقدار متغیر صفر می‌باشد. محدودی (۱۴) نشان‌دهنده صفر و یک بودن متغیرهای مسئله است. در این مطالعه، با توجه به اینکه تقاضا، متغیر فازی (مثلثی) و غیرقطعی می‌باشد، در این راستا سعی شده است تا به‌صورت متغیر فازی بیان گردد تا از عدم قطعیت مسئله کاسته شود. در این مطالعه، به دلیل کاهش حجم محاسبات و جلوگیری از پیچیده‌تر شدن مدل ریاضی پیشنهادی برای دفازی کردن این پارامتر از معادله (۱۵) استفاده‌شده است.

$$Z = Min\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=m+1}^{N}\sum_{k=1}^{\bar{k}} c_{ij}x_{ijk}y_i + \sum_{i=m+1}^{N}\sum_{j=m+1}^{N}\sum_{k=1}^{\bar{k}} c_{ij}x_{ijk} \quad (۱)$$

$$u_i - u_j + q^*\sum_{k=1}^{k} x_{ijk} \le q - d_{1,j} \quad (۲)$$
$$\forall k \forall h \in N$$
$$\forall i, j = 1,2,...,n+m+1$$

$$\sum_{i\in s}\sum_{k=1}^{k} x_{ijk} = 2 \quad \forall j \in \mathrm{N} \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in\{n+m-s+1\}}\sum_{k=1}^{k} x_{ijk} = 1 \ \forall j \in \mathrm{N} \quad (٤)$$

$$\sum_{i=1}^{n+m+1} x_{ihk} - \sum_{i=1}^{n+m+1} x_{hik} = 0 \quad \forall \mathrm{p,k} \quad (٥)$$

$$\sum\nolimits_{i\in N} x_{i(m+n+1)k} = 1 \quad \forall \mathrm{m,n,k} \quad (٦)$$

$$\mathrm{s_{ik} + w_i + t_{ij} - M\left(1 - x_{ijk}\right) \le s_{jk}} \quad \forall \mathrm{i,j} \in \mathrm{N}, \forall \mathrm{k} \quad (۷)$$

$$e_i \le s_{ik} \le l_i \quad \forall i \in N \ , \forall k \quad (۸)$$

$$Cr(\sum_{i\in N} d_l \sum_{j\in N} x_{ijk} - q \ge 0) \ge DPI \quad \forall K \quad (۹)$$

$$\sum_{k=1}^{k}\sum_{j=m+1}^{n+m+1}\sum_{i=1}^{m} x_{ijk} = 1 \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ijk} \le 1 \quad \forall j,k \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} x_{ijk} = 0 \ \forall k \quad (۱۲)$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & selecting \ \text{depot j} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad j \in s \quad i \in N \quad k \in K \quad (۱٤)$$

$$(a,b,c) = a + \left[\frac{(c-a)+(c-b)}{3}\right] \quad (۱۵)$$

## ٤- روش حل

ترکیب مسئله انتخاب مکان انبار و مسیریابی حرکت خودرو برای یک سازمان، جزو مسائل NP-hard است (پوتوین و روسا، ۱۹۹۵) که حل آن از طریق برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود، مدت‌زمان بالایی را به خود اختصاص می‌دهد؛ لذا برای حل آن در ابعاد بزرگ نیازمند استفاده از روش‌های فرا ابتکاری است. مسائل NP-hard مسائل بهینه‌سازی هستند که برای حل آن‌ها روش ریاضی قطعی کارآمدی وجود ندارد و اکثر مسائل امروزی در هر جامعه‌ای را شامل می‌شود. با توجه به مشکلات مربوط به این مسائل، بیشتر تحقیقات از روش‌های فرا ابتکاری به‌جای روش‌های دقیق ریاضی استفاده کرده‌اند. روش‌های فرا ابتکاری دو دسته‌اند: مبتنی بر جواب و مبتنی بر جمعیت. روش‌های مبتنی بر جمعیت دارای سرعت بهتر و دقت بالاتری است. همچنین در مناطق بهینه محلی نیز گرفتار نمی‌شوند (تالبی، ۲۰۰۹). یکی از روش‌های مبتنی بر جمعیت، الگوریتم ژنتیک است. در مطالعه حاضر از دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده‌شده است.

### ۴-۱ الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی است که از علم زیست‌شناسی مثل وراثت، جهش، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب الهام گرفته است. عموماً راه‌حل‌ها به‌صورت دوتایی صفر و یک نشان داده می‌شوند؛ ولی روش‌های نمایش دیگری هم وجود دارد. تکامل، معمولاً از یک مجموعه تصادفی از موجودیت‌ها شروع و در نسل‌های بعدی اصلاح می‌شود. در هر نسل، مناسب‌ترین‌ها انتخاب می‌شوند نه بهترین‌ها. یک راه‌حل برای مسئله موردنظر، با یک لیست از مشخصه‌ها نشان داده می‌شود که به این لیست، کروموزوم می‌گویند. هریک از مشخصه‌های این کروموزوم، ژن نام دارد که این ژن‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند و یک کروموزوم را تشکیل می‌دهند. در ابتدا چندین کروموزوم یا به‌عبارت‌دیگر چندین ترکیب مختلف از مشخصه‌ها به‌صورت تصادفی برای ایجاد نسل اول بکار گرفته می‌شوند. در طول هر نسل، هر کروموزوم ارزیابی و ارزش تناسب توسط تابع تناسب اندازه گیری می‌شود. گام بعدی ایجاد دومین نسل از مجموعه جواب‌ها بر اساس نسل فعلی است که با استفاده از عملگرهای ژنتیکی صورت می‌پذیرد. این عملگرها عبارت‌اند از: اتصال کروموزوم‌ها به سر یکدیگر (تقاطع) و تغییر (جهش) و تولید مجدد (تالبی،۲۰۰۹). برای هر فرد جدید در نسل جدید یک جفت والد انتخاب می‌شود. انتخاب والدین به‌گونه‌ای است که مناسب‌ترین عناصر انتخاب شوند تا حتی ضعیف‌ترین عناصر هم شانس انتخاب داشته باشند که این امر از محدود شدن به جواب‌های بهینه محلی جلوگیری می‌کند. چندین الگوی انتخاب وجود دارد: چرخ منگنه دار (رولت)، انتخاب مسابقه‌ای... . اتصال دو کروموزوم فرزندی ایجاد می‌کند که به نسل بعدی اضافه می‌شوند. این فرزندها می‌توانند مشخصه‌های (ژن‌ها) خود را به‌صورت تصادفی یا به‌صورت انتخاب بر اساس یک شایستگی، از دو والد خود به ارث برند. این مراحل انجام می‌شوند تا این‌که کاندیداهای مناسبی برای جواب، در نسل بعدی پیدا شوند. مرحله بعد، تغییر دادن فرزندان جدید است. این امر باعث می‌شود که الگوریتم، قسمت‌هایی از فضای مسئله را به‌منظور رسیدن به جواب بهینه جستجو کند. کل فرآیند برای نسل‌های بعدی هم تکرار می‌شود، جفت‌ها برای ترکیب انتخاب می‌شوند، جمعیت نسل سوم به وجود می‌آید و فرآیند تکرار شده تا شرایط توقف حاصل شود.

#### ٤-۱-۱ جواب اولیه موجه

اولین گام در هر رویکرد فرا ابتکاری تولید جواب اولیه می‌باشد. با استفاده از مجموعه کروموزوم‌ها، یک مجموعه جواب اولیه برای الگوریتم ساخته می‌شود. کروموزوم‌های مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی، لیستی از گره‌ها (بیماران، انبارها و آزمایشگاه) هستند، بنابراین مسیرها ترتیب قرار گرفتن بیماران و انبارها و آزمایشگاه در کروموزوم هستند. این نوع کدگذاری کروموزوم‌ها، به‌سادگی بیماران را به ترتیب سرویس‌دهی به آن‌ها فهرست بندی می‌کند. هر مسیر، منتهی به آزمایشگاه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌کنید کروموزوم مدل ارائه‌شده در شکل ۲ آورده شده است که دوسطحی است. تعداد ژن‌های سطح اول (سطح رنگی) برابر است با [۱- وسایل نقلیه + بیماران] و سطح دوم نیز شامل انبارها می‌شود. کروموزوم‌ها، یک مسیر ممکن تصادفی ایجادشده باشد که بر اساس ساختاری به این شرح است: در سطح اول، به‌صورت تصادفی، بیماران به وسایل نقلیه تخصیص داده می‌شوند و هنگامی‌که این عمل انجام شود وسیله نقلیه برای انتخاب انبار به سطح دوم مراجعه می‌کند. به‌عنوان‌مثال، به بیماران ٤، ۱۸ و ۲ با سومین وسیله از انبار شماره ٤ شروع به سرویس‌دهی می‌شود.

| ۱۸ | ۴ | ۲ | ۲۳ | ۱ | ۱۵ | ۱۹ | ۲۱ | ۵ | ۸ | ۱۴ | ۱۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۳ | ۲ | ۴ | ۱ | ۵ | ۲ | ۳ | ۱ | ۱ | ۴ | ۳ |

| ۷ | ۱۱ | ۱۶ | ۳ | ۶ | ۲۲ | ۱۲ | ۱۰ | ۲۰ | ۹ | ۱۳ | ۲۴ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲ | ۱ | ۲ | ۵ | ۴ | ۲ | ۳ | ۴ | ۱ | ۴ | ۲ | ۵ |

**شکل ۲- نمایش جواب اولیه.**

۴-۱-۲ انتخاب

در این پژوهش، از مکانیزم انتخاب رتبه‌بندی شده‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$Select(R)=\left\{r_j \in R / j = p-\left[\frac{-1+\sqrt{1+4rnd\left(p^2+p\right)}}{2}\right]\right\} \quad (۱۶)$$

در رابطه فوق، R جمعیتی به فرم $R=\{r_1, r_2, ..., r_p\}$ است که در آن p تعداد کروموزوم‌های واقع در R می‌باشد که با توجه به مقدار برازندگی به‌صورت صعودی منظم شده‌اند. rnd یک عدد اختیاری در بازه به مقدار برازندگی [۱ و ۰) و علامت [] بیانگر جز صحیح عبارت داخل می‌باشد.

۴-۱-۳ بازترکیبی

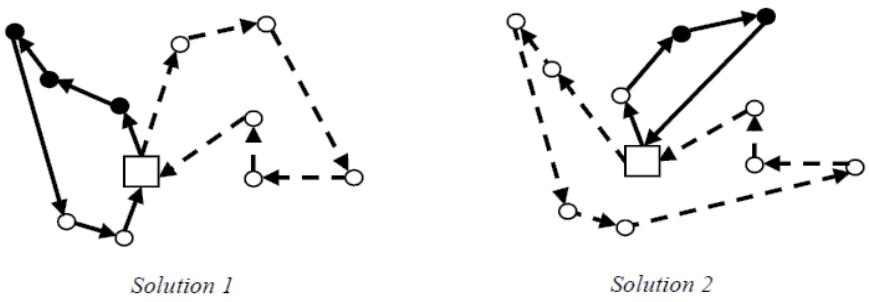
استفاده از اپراتورهای سنتی بازترکیبی در مسائل ترتیبی همانند TPS و VRP مناسب نیست چراکه ممکن است دچار تکرار و یا حذف برخی ژن‌ها شوند که موجه نمی‌باشد (هو و همکاران، ۲۰۰۸)؛ بنابراین در این پژوهش از دو اپراتور Heuristic و Merge به شرح ذیل استفاده‌شده است:

در اپراتور بازترکیبی Heuristic ابتدا یک نقطه تصادفی در هردو کروموزوم انتخاب می‌شود سپس از گره بعد از نقطه تصادفی انتخابی، کوتاه‌ترین فاصله بین دو کناره خروجی از این گره انتخاب می‌شود و این عمل تا جایی که تمام ژن‌ها موردبررسی قرار گیرند ادامه می‌یابد. اپراتور بازترکیبی Merge مشابه عملگر قبل اجرا می‌گردد با این تفاوت که فرزندان به‌جای اینکه بر اساس مسافت تولید شوند بر اساس نظام زمانی تعریف‌شده که از قبل بر مبنای پنجره زمانی تعیین گردیده است تولید می‌شوند. درنتیجه، در این عملگر معیار انتخاب ژن بعدی در فرزند جدید، ژنی است که ازلحاظ تقدم زمانی جلوتر باشد. شایان‌ذکر است که برای اعمال اپراتورهای بازترکیبی از مقدار احتمالی خاصی استفاده نمی‌شود و این اپراتورها روی هر دو جفت والد انتخابی می‌بایست اعمال شوند.

۴-۱-۴ جهش

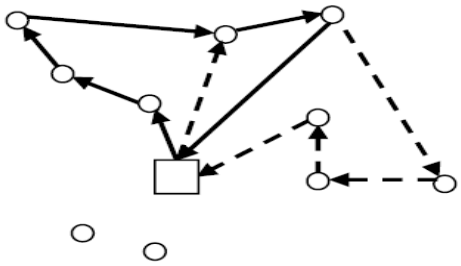
اپراتور جهش، تحت مقدار احتمالی ثابت و کوچکی روی دو کروموزوم حاصله از مرحله بازترکیبی اعمال می‌گردد که در این پژوهش به‌صورت تجربی این مقدار برابر با ۰/۴ تنظیم گردیده است. اپراتور استفاده‌شده به شرح ذیل عمل می‌نماید:

ابتدا مطابق با شکل شماره ۳، دو کروموزوم مربوطه، به دو جواب موجه تبدیل می‌گردند، سپس در هر یک از آن‌ها دو مسیر به‌صورت کاملاً دلخواه روی هر دو مسیر در نظر گرفته می‌شود.




**شکل ۳- تبدیل دو کروموزوم حاصل از بازترکیبی به دو جواب موجه.**

درنتیجه، می‌بایست مشتریان قبل از مقطع در نظر گرفته‌شده در مسیر انتخابی اول به مشتریان بعد از مقطع در نظر گرفته‌شده روی مسیر دوم متصل گشته و باعث ایجاد مسیر جدیدی در جواب اول گردند که تحت عنوان فرزند اول در نظر گرفته می‌شود. همین کار عیناً برای جواب دوم صورت گرفته و فرزند دوم نیز تعیین می‌گردد. شکل ٤ نتیجه اعمال اپراتور را روی جواب اول نمایش می‌دهد.



**شکل ٤- نتیجه اعمال اپراتور روی جواب اول.**

### ٤-٢ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

این الگوریتم با الهام گیری از رفتار اجتماعی گروهی از پرندگان مهاجر که در تلاش برای دستیابی به مقصد ناشناخته‌ای هستند، توسط هو و همکاران (۲۰۰۴) توسعه داده‌شده است. برخلاف الگوریتم ژنتیک، در فرآیند تکاملی الگوریتم مذکور، پرندگان جدیدی از نسل قبل (جواب‌های جدید از جواب‌های قبلی) ایجاد نمی‌گردد، بلکه هر پرنده رفتار اجتماعی خود را با توجه به تجربیاتش و رفتار سایر پرندگان گروه تکامل بخشیده و مطابق آن حرکت خود را به‌سوی مقصد بهبود می‌دهد؛ به‌عبارت‌دیگر در این الگوریتم، عملگرهای تکاملی چون تقاطع و جهش وجود ندارد (جیائو و همکاران، ۲۰۰۸)

الگوریتم PSO با گروهی از جواب‌های (ذرات) تصادفی آغاز و سپس با به همگام‌سازی ذرات در هر تکرار به دنبال جواب بهینه می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۴). اگر متغیرهای تصمیم و به‌نوبه آن موقعیت ذرات، از نوع صفر و یك باشند، بردارهای سرعت و موقعیت هریک از ذرات در هر تکرار الگوریتم، طبق روابط (۱۷) الی (۲۰) محاسبه می‌شوند (انگلبرکت، ۲۰۰٦).

$$V_{it} = w.V_{it-1} + c_1.r_1.(pBest_i - x_{it}) + c_2.r_2.(nBest_i - x_{it}) \quad (۱۷)$$

$$-V_{\max} \le V_{it} \le V_{\max} \quad (۱۸)$$

$$s_i = 1/1 + e^{-V_{it}} \quad (۱۹)$$

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \rho \le s_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۲۰)$$

طبق رابطه (۱۷) بردار سرعت جدید هر ذره بر اساس سرعت قبلی خود ذره، ($V_{i(t-1)}$)، بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن دست‌یافته است، ($pBest_i$)، موقعیت بهترین ذره در همسایگی ذره که تابه‌حال به‌دست‌آمده است، ($nBest_i$)، محاسبه می‌گردد؛ درصورتی‌که همسایگی هر ذره شامل تمام ذرات گروه باشد، آنگاه $nBest_i$ بیانگر موقعیت بهترین ذره در میان گروه است که با gBest به آن اشاره می‌شود. $r_1$ و $r_2$ دو عدد تصادفی (با توزیع یکنواخت بین [0,1]) هستند که مستقل از یکدیگر تولید می‌شوند. $c_1$ و $c_2$ که با نام ضرایب یادگیری به آنان اشاره‌شده است، تأثیر pBest و nBest را بر فرآیند جستجو کنترل می‌نمایند؛ w بیانگر ضریب وزنی اینرسی است. بردار سرعت ذرات با مقدار $V_{max}$ محدودشده است. $V_{max}$ به‌عنوان محدودیتی است که قابلیت جستجوی جهانی گروه ذرات را کنترل می‌کند. با استفاده از رابطه (۱۹) بردار سرعت هریک از ذرات به بردار احتمال تغییر، تبدیل می‌شود. در رابطه فوق، $s_i$ بیانگر احتمال آن است که $x_{it}$ برابر با ۱ شود، سپس با استفاده از رابطه (۲۰) بردار موقعیت هریک از ذرات بهنگام می‌گردد. در رابطه فوق، $\rho$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک است.

## ۵-نتایج محاسباتی

در این بخش جواب‌های اولیه الگوریتم تنظیم پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم‌ها و نتایج محاسباتی الگوریتم‌های فرا ابتکاری و نرم‌افزار GAMS و مقایسه روش‌ها ارائه‌شده است.





### ۵-۱ تنظیم پارامترها

در تحقیق حاضر جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری مورداستفاده، از متدولوژی سطح پاسخ در نرم‌افزار Design expert6.0.6 استفاده‌شده است. این روش مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. بدین منظور چندین مسئله نمونه انتخاب گردید و برای هر یک تعداد آزمایش‌های لازم بر اساس طرح مرکب مرکزی انجام گردید و درنهایت میانگین پارامترها محاسبه‌شده است. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در جدول (۲) زیر آورده شده است.

**جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترها با استفاده از روش متدولوژی سطح پاسخ.**

| الگوریتم‌ها | پارامترها | | | |
|---|---|---|---|---|
| ژنتیک | npop=۷۷ | pc=۰/۵ | pm=۰/۲۱۷ | Iteration=۲۰۰ |
| بهینه‌سازی ازدحام ذرات | w=۰/۵۴ | C1=۰/۷ | C2=۱/۴۲ | |

### ۵-۲ نتایج عددی، اعتبار مدل و مقایسه روش‌ها

در این بخش برای اعتبار سنجی مدل ریاضی پیشنهادی، پنج مسئله با ابعاد کوچک با نرم‌افزار GAMS حل‌شده است. درنهایت، نتایج حاصله از نرم‌افزار GAMS با نتایج حاصله از دو الگوریتم فرا ابتکاری به‌کاربرده شده مقایسه شده است. تمام الگوریتم‌های پیشنهادی، در محیط نرم‌افزار MATLAB ۷/۵ برنامه‌نویسی و در کامپیوتری با مشخصات پردازنده AMD، ٦٤ بیتی، ۳ گیگاهرتز، ویندوز ۷ و ۲ گیگابایت رم، اجراشده‌اند.

**جدول ۳- نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و نرم افزار GAMS برای مسائل با ابعاد کوچک.**

| شماره مسئله | ویژگی‌های مسئله | | | Cost PSO | Cost GA | GAMS | Gap GA | Gap PSO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | p | d | v | | | | | |
| ۱ | ۸ | ۲ | ۲ | ۷۴۵۳ | ۷۴۵۳ | ۷۴۵۳ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۱۰ | ۲ | ۳ | ۸۱۲۴ | ۸۱۲۴ | ۸۱۲۱ | ۰ | ۰ |
| ۳ | ۱۱ | ۳ | ۳ | ۸۵۶۸۶ | ۸۳۴۵۶ | ۸۲۱۲۴ | ۱/۵۹ | ۴/۱۵ |
| ۴ | ۱۲ | ۳ | ۴ | ۹۴۸۹ | ۹۳۶۷ | ۹۰۸۷ | ۲/۹۹ | ۴/۲۳ |
| ۵ | ۱۵ | ۳ | ۴ | ۱۰۹۲۴ | ۱۰۷۲۴ | ۱۰۰۴۲ | ۶/۹۷ | ۸/۰۷ |

در جدول‌های فوق $p$، $d$، $v$ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد بیماران، تعداد انبارها و تعداد وسایل نقلیه هست؛ میزان شکاف نیز محاسبه‌شده است. در برخی از موارد، میزان شکاف بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری و Games مساوی با صفر می‌باشد که این نشان‌دهنده این است که روش‌ها راه‌حل‌های دقیق را ارائه می‌دهند. همچنین فرمول محاسبه شکاف به‌صورت زیر می‌باشد.

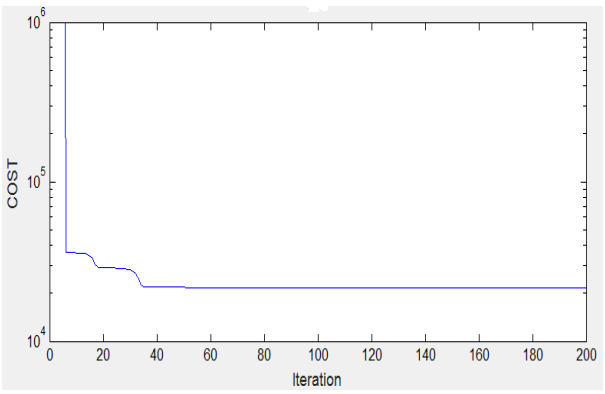
$$\text{شکاف} = \frac{\text{مقدار تابع هدف حاصل از گمز} - \text{مقدار تابع هدف حاصل از الگوریتم}}{\text{مقدار تابع هدف حاصل از گمز}} \quad (۲۱)$$

**جدول ۴- نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای مسائل با ابعاد بزرگ.**

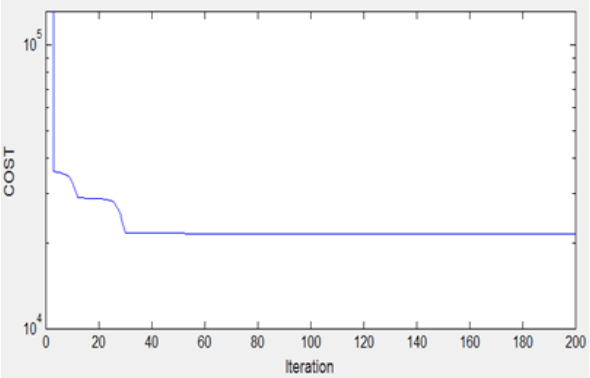
| شماره مسئله | ویژگی‌های مسئله | | | Cost PSO | Cost GA |
|---|---|---|---|---|---|
| | p | d | v | | |
| ۱ | ۲۰ | ۴ | ۶ | ۱۴۸۲/۳۴ | ۱۵۷۸/۲۳ |
| ۲ | ۴۰ | ۵ | ۵ | ۱۸۸۰/۶۷ | ۱۷۰۳/۱۲ |
| ۳ | ۵۰ | ۵ | ۶ | ۲۵۹۰۳/۸۷ | ۲۴۷۳ |
| ۴ | ۷۰ | ۱۰ | ۸ | ۳۶۷۵/۱۲ | ۳۶۵۴ |
| ۵ | ۱۰۰ | ۱۰ | ۱۲ | ۴۱۵۶ | ۴۰۱۵/۴۳ |
| ۶ | ۱۱۰ | ۱۲ | ۱۰ | ۵۰۵۶/۶۵ | ۴۷۶۵/۶۵ |
| ۷ | ۱۲۰ | ۱۵ | ۱۵ | ۵۶۷۴/۳۸ | ۵۰۴۵/۸۹ |
| ۸ | ۱۵۰ | ۲۰ | ۱۸ | ۶۵۴۵/۲۵ | ۶۱۴۵/۳۲ |
| ۹ | ۱۶۰ | ۲۵ | ۲۵ | ۹۵۱۲/۵۷ | ۸۵۴۳ |
| ۱۰ | ۱۷۵ | ۳۰ | ۲۵ | ۱۲۶۳ | ۱۰۲۳۴ |

در جدول ٤ جهت نشان دادن کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی، حل ۱۰ مسئله با ابعاد بزرگ موردبررسی قرارگرفته است؛ همچنین برای تعیین الگوریتم کاراتر از بین دو الگوریتم پیشنهادی، میانگین هزینه هر دو الگوریتم محاسبه‌شده است. مطابق نتایج، عدد ٤٨١٥/٧٦٤ مربوط به میانگین هزینه الگوریتم ژنتیک و عدد ٦٥١٤/٩٥٨ مربوط به میانگین هزینه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است که عدد مربوط به الگوریتم ژنتیک کمتر می‌باشد؛ ازاین‌رو الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم کارا شناسایی گردید.

شکل‌های ٥ و ٦ نمودار همگرایی الگوریتم‌های GA و PSO برای مسئله با ۱۰۳ گره را نمایش می‌دهد.




**شکل ٥- نمودار همگرایی الگوریتم GA.**




**شکل ٦- نمودار همگرایی الگوریتم PSO**

## ٦- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این مقاله، یک مدل مکان‌یابی مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی سخت، کاربردی در بهینه‌سازی مراقبت بهداشت خانگی سالمندان، ارائه گردید. وسیله نقلیه در این مدل، منزل بیماران و در صورت لزوم انبارهای دارویی شرکت را طی می‌کند و درنهایت به آزمایشگاه بازمی‌گردد. با تاکید بر اهمیت و حساسیت ارائه خدمات بهداشتی و درمانی و عدم قطعیت موجود در تقاضا، از رویکرد منطق فازی برای برخورد با عدم قطعیت استفاده شد. تعداد زیاد مشتریان سیستم و پراکندگی آن‌ها در چنین مسئله‌ای تصمیم‌گیری مسیریابی را دشوار می‌سازد. به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای مسئله، استفاده از روش‌های حل دقیق به‌ویژه برای مسائل با ابعاد بزرگ در زمان محاسباتی معقول، امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین در این مقاله دو الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌سازی گروه ذرات و الگوریتم ژنتیک مورداستفاده قرار گرفت. جهت تنظیم پارامترها از روش نسبتاً جدید و کارآمد متدولوژی سطح پاسخ استفاده شد. همچنین، تعدادی مسئله در ابعاد کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز حل گردید. کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی با استفاده از مسائل نمونه متعددی که به‌صورت تصادفی ایجاد شدند، مقایسه گردید. تمام الگوریتم‌ها، راه‌حل‌های منطقی را نشان می‌دهند اما الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات داشته است. به‌عنوان یکی از زمینه‌های آتی تحقیق می‌توان عدم قطعیت را بر روی پارامترهای دیگر همچون زمان سفر اعمال نمود. علاوه بر آن، روش‌های دیگری جهت مقابله با عدم قطعیت به‌کاربرده شد. یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقات آتی این پژوهش می‌تواند در نظر گرفتن اهداف دیگری نظیر سطح رضایت مشتریان در مدل ریاضی و مدل‌سازی آن به‌صورت برنامه‌ریزی چندهدفه باشد. می‌توان زمان انتظار را به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده سطح رضایت مشتریان و هدف دوم مدل در نظر گرفت. همچنین مدل مذکور را می‌توان درزمینه‌های کاربردی مشابهی نظیر مراقبت بهداشت خانگی بیماران سرطانی و ... استفاده نمود. در چنین مدلی با توجه به نیازمندی‌ها و شرایط بیماران باید مفروضات به خصوصی در نظر گرفته شوند.

## منابع


Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L., & Calvo, R. W. (2013). A matheuristic approach for solving a home health care problem. *Electronic notes in discrete mathematics*, 41, 471-478 .

Amirsadi, A., & Soleimani, H. (2005). Evaluating the phenomenon of aging and its consequences in Iran. *Journal of health and wellbeing*, *1*(2), 19-35.

Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., ... & Prutzman, P. J. (1983). Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, *13*(6), 4-23.

Bertels, S., & Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem. *Computers & operations research*, *33*(10), 2866-2890.

Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European journal of operational research*, *248*(2), 428-443.

Bredström, D., & Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European journal of operational research*, *191*(1), 19-31.

Cappanera, P., Scutellà, M. G., & Visintin, F. (2014). Home Care Services delivery: equity versus efficiency in optimization models. *Proceedings of the international conference on health care systems engineering*. Springer.

Cheng, E., & Rich, J. L. (1998). *A home health care routing and scheduling problem*. Retrieved from CAAM Technical Reports.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science, 6*(1), 80-91.

Decerle, J., Grunder, O., El Hassani, A. H., & Barakat, O. (2016). A two-phases matheuristic for the home care routing and scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine, 49*(12), 1484-1489.

En-nahli, L., Afifi, S., Allaoui, H., & Nouaouri, I. (2016). Local search analysis for a vehicle routing problem with synchronization and time windows constraints in home health care services. *IFAC-PapersOnLine, 49*(12), 1210-1215.

Engelbrecht, A. P. (2006). *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons.

En-nahli, L., Allaoui, H., & Nouaouri, I. (2015). A multi-objective modelling to human resource assignment and routing problem for home health care services. *IFAC-PapersOnLine, 48*(3), 698-703.

Frifita, S., Masmoudi, M., & Euchi, J. (2017). General variable neighborhood search for home healthcare routing and scheduling problem with time windows and synchronized visits. *Electronic notes in discrete mathematics*, 58, 63-70.

Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S. M., Yaghoubi, S., & Jokar, A. (2017). Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows. *RAIRO-operations research, 51*(4), 1151-1176.

Ho, W., Ho, G. T., Ji, P., & Lau, H. C. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering applications of artificial intelligence, 21*(4), 548-557.

Hu, X., Shi, Y., & Eberhart, R. (2004, June). Recent advances in particle swarm. *Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No.04TH8753)*. Portland, OR, USA: IEEE.

Jiao, B., Lian, Z., & Gu, X. (2008). A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm. *Chaos, solitons & fractals, 37*(3), 698-705.

Kergosien, Y., Lenté, C., & Billaut, J.-C. (2009). Home health care problem: An extended multiple traveling salesman problem. *Proceedings of the 4th multidisciplinary international conference on scheduling: Theory and applications (MISTA'09)*. Dublin (Irlande).

Kergosien, Y., Ruiz, A., & Soriano, P. (2014). A routing problem for medical test sample collection in home health care services. *Proceedings of the international conference on health care systems engineering* (pp. 29-46). Springer.

Liu, R., Xie, X., Augusto, V., & Rodriguez, C. (2013). Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *European journal of operational research, 230*(3), 475-486.

Liu, R., Xie, X., & Garaix, T. (2014). Hybridization of tabu search with feasible and infeasible local searches for periodic home health care logistics. *Omega, 47*, 17-32.

Mankowska, D. S., Meisel, F., & Bierwirth, C. (2014). The home health care routing and scheduling problem with interdependent services. *Health care management science, 17*(1), 15-30.

Nickel, S., Schröder, M., & Steeg, J. (2012). Mid-term and short-term planning support for home health care services. *European journal of operational research, 219*(3), 574-587.

Ombuki-Berman, B., & Hanshar, F. T. (2009). Using genetic algorithms for multi-depot vehicle routing. *Bio-inspired algorithms for the vehicle routing problem* (pp. 77-99). Berlin, Heidelberg: Springer.

Potvin, J. Y., & Rousseau, J. M. (1995). An exchange heuristic for routeing problems with time windows. *Journal of the operational research society, 46*(12), 1433-1446.

Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A., & Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *European journal of operational research, 219*(3), 598-610.

Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons.

Torres-Ramos, A., Alfonso-Lizarazo, E., Reyes-Rubiano, L., & Quintero-Araújo, C. (2014). Mathematical model for the home health care routing and scheduling problem with multiple treatments and time windows. *Proceedings of the 1st international conference on mathematical methods & computational techniques in science & engineering (MMCTSE 2014).*

Trautsamwieser, A., & Hirsch, P. (2011). Optimization of daily scheduling for home health care services. *Journal of applied operational research, 3*(3), 124-136.

Yalçındağ, S., Matta, A., Şahin, E., & Shanthikumar, J. G. (2014). A two-stage approach for solving assignment and routing problems in home health care services. *Proceedings of the international conference on health care systems engineering*. Springer.

Yuan, B., Liu, R., & Jiang, Z. (2015). A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements. *International journal of production research, 53*(24), 7450-7464.

نشریه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۳، شماره (۲)، تابستان ۱۳۹۷، صفحه: ۱۱۴-۱۲۷