

## یک الگوریتم ژنتیک کارا برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن مهارت تیم‌های کاری

مرتضی کیانی<sup>۱</sup>، هانی صیدگر<sup>۲</sup>، ایرج مهدوی<sup>۳\*</sup>، رضا توکلی مقدم<sup>۴</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران

۳. استاد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران

۴. استاد دانشکده مهندسی صنایع و مرکز پژوهشی بهینه‌سازی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۲/۰۹/۰۴ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۴/۰۳/۱۲ - تاریخ تصویب ۹۴/۰۳/۱۸)

### چکیده

در این پژوهش، مدل ریاضی جدیدی برای مسئله ترکیبی نیروی انسانی- مسیریابی وسایل نقلیه، با در نظر گرفتن تیم‌هایی با سطوح مختلف مهارت به‌عنوان عوامل خدمت‌دهنده، ارائه شده است. وجود تیم‌هایی با مهارت‌های متفاوت، موجب انجام کارهای مختلف مشتریان در زمان و هزینه‌های متفاوت و افزایش انعطاف‌پذیری برنامه‌ریزی می‌شود. جابه‌جایی این تیم‌ها با استفاده از گروهی از وسایل نقلیه با سرعت و هزینه‌های متفاوت انجام می‌شود و برای ارائه خدمت به هریک از مشتریان، موعد خاصی در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله، کمینه‌سازی هزینه‌های کل خدمت‌دهی از طریق تیم‌ها، جابه‌جایی وسایل نقلیه و جریمه دیرکرد است. برای حل مسئله، از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ذرات انبوه استفاده شده و پارامترهای آن به روش تاگوچی تنظیم شده است. نتایج بیانگر کارایی مطلوب الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در کیفیت جواب‌ها و زمان محاسباتی است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات، الگوریتم ژنتیک، مسیریابی وسایل نقلیه، مهارت تیم‌ها، نیروی انسانی.

### مقدمه

نیروها به خدمت‌دهی به مشتریان و مسیریابی وسایل نقلیه جابه‌جاکننده آن‌ها می‌پردازد. تصمیم‌گیری در مورد تخصیص و نحوه جابه‌جایی نیروهای انسانی بین مکان‌ها، در حوزه‌های مختلفی مانند مدیریت تیم‌های تعمیرات، مراقبت‌های خانگی و مدیریت بحران کاربرد دارد. مسئله ترکیبی نیروی انسانی- مسیریابی وسایل نقلیه، به‌عنوان تعمیمی از مسئله کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه، جزء مسائل پیچیده و مربوط به رده مسائل NP-Hard است [۲]. در ادبیات موضوعی، پژوهش‌های اندکی، مؤلفه‌های انسانی را در قالب تیم‌های کاری یا رانندگان وسایل نقلیه در نظر گرفته‌اند. از میان آن‌ها می‌توان به لیم و همکاران [۳]

مسیریابی وسایل نقلیه<sup>۱</sup>، مشخص کردن مجموعه بهینه‌ای از مسیرهاست که از طریق ناوگانی از وسایل نقلیه، برای ارائه خدمات به مشتریان با حداقل هزینه انجام می‌شود. این مسئله را نخستین بار دانتزیگ و رامسر [۱] به صورت فرمول ریاضی ارائه دادند و برای حل آن از روش‌های دقیق استفاده کردند. در مسائل کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه، اغلب انتقال و جابه‌جایی کالا به‌عنوان خدمت نهایی و وسایل نقلیه به‌عنوان عوامل خدمت‌دهنده در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که مسئله ترکیبی مسیریابی وسایل نقلیه- نیروی انسانی با در نظر گرفتن نیروهای انسانی به‌عنوان عوامل ارائه خدمت، به برنامه‌ریزی هم‌زمان تخصیص این

نویسندگان از رویه حل دومرحله‌ای برای تعیین جواب‌های شدنی تخصیص زوج راننده و ماشین به هر سفر استفاده کردند. زاپل و بول [۹]، مدلی کاربردی از توزیع نامه به صورت محلی را در نظر گرفتند که در آن، برنامه‌ریزی، هم برای وسایل و هم رانندگان، با در نظر گرفتن قوانین اتحادیه اروپا انجام می‌شود. مسئله، به صورت ابتکاری با تجزیه به یک مسئله کلی مسیریابی با پنجره زمانی حل شد. در سایر پژوهش‌ها نیز هولیس و همکاران [۱۰] و درکس و همکاران [۱۱] به بررسی برنامه‌ریزی هم‌زمان مسیریابی وسایل نقلیه و رانندگان پرداختند.

در حوزه خدمات مراقبت‌های خانگی می‌توان به پژوهش راس موسن و همکاران [۱۲] اشاره کرد. آن‌ها یکی از مسائل برنامه‌ریزی کارکنان مراقبت‌های خانگی را در شرایط اولویت‌های ملاقاتی در نظر گرفتند که در آن، خدمتکاران باید یک یا چند خدمت مراقبتی را به ترتیب و در زمان مشخصی، در محل زندگی افراد نیازمند نگهداری انجام دهند؛ به طوری که سطح کلی رضایت از خدمات، حداکثر شود. تامسون [۱۳] این مسئله را به همراه پنجره زمانی در نظر گرفت و از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای حل آن استفاده کرد. لسل [۱۴] رویه‌ای دومرحله‌ای را اتخاذ کرد که در مرحله اول، ملاقات‌ها براساس موقعیت جغرافیایی، ترجیح و توانایی دسته‌بندی می‌شوند و در مرحله دوم، هر دسته به صورت یک مسئله مسیریابی در نظر گرفته و حل می‌شود. از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به برتلز و فاهل [۱۵] و دهن و همکاران [۱۶] اشاره کرد.

در این پژوهش، تیم‌های کاری با مهارت‌های متفاوت، به عنوان عوامل خدمت‌دهی در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند خدمات مختلفی را در زمان و هزینه‌های متفاوت ارائه کنند. همچنین بعضی از تیم‌ها یا وسایل نقلیه، ممکن است توانایی سفر و ارائه خدمت به یک یا چند مشتری را نداشته باشند؛ بنابراین، برنامه‌ریزی تخصیص تیم‌ها و جابه‌جایی وسایل به صورت جداگانه، اما هماهنگ انجام می‌شود. تابع هدف مدل نیز به گونه‌ای در نظر گرفته شده که بین هزینه‌های جابه‌جایی، خدمت‌دهی و دیرکرد، تعادل ایجاد شود.

ادامه پژوهش شامل بخش‌های زیر است. در بخش دوم،

اشاره کرد که مسئله تخصیص و برنامه‌ریزی جابه‌جایی تعمیرکاران را در نظر گرفتند. در مسئله آن‌ها، هر مشتری باید با توجه به درخواستش، از سوی یک یا چند نفر از تعمیرکاران خدمت‌دهی شود؛ به طوری که هدف، کمینه‌سازی تعداد تعمیرکاران، زمان معطلی و کل مسافت طی شده باشد. آن‌ها برای حل مسئله، رویکرد ترکیبی لیست ممنوع و شبیه‌سازی تبرید را به کار گرفتند. پس از آن‌ها، لی و همکاران [۴] محدودیت تیم‌های کاری را معرفی کردند. در مدل آن‌ها، برای انجام دسته‌ای از کارها در مکان هر مشتری، کارکنان متفاوتی مورد نیاز است و هر تیم مخصوص از کارکنان باید با هم ترکیب شوند و به مکان مشتری انتقال یابند. آن‌ها برای حل مسئله، از روش شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند. بهریس و توماس [۲] رویه‌ای ابتکاری نیز برای مسئله مسیریابی و تدارکات نیروی انسانی ارائه کردند؛ به طوری که در آن، باید پول‌هایی از دستگاه‌های فروش یک منطقه جمع‌آوری شوند.

دهن و همکاران [۵] مسئله برنامه‌ریزی کارهای حمل بار در بعضی فرودگاه‌های اروپایی را مطالعه کردند. مسئله آن‌ها نیازمند تخصیص نیروهای انسانی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های تیم‌های کاری و پنجره زمانی است. آن‌ها رویه شاخه و هزینه را برای حل مسئله‌شان ارائه دادند. برداستورم و روکوئیست [۶]، محدودیت‌های پیش‌نیازی و تطابقی را به مسئله ترکیبی مسیریابی و برنامه‌ریزی افزودند. محدودیت پیش‌نیازی موجب می‌شود وسیله‌ای پس از وسیله دیگر به مشتری خدمت کند؛ درحالی‌که محدودیت تطابقی سبب می‌شود دو وسیله، در یک زمان در کنار مشتری باشند. آن‌ها یک رویکرد ابتکاری بهینه‌سازی را برای حل مدلشان پیشنهاد کردند. از دیگر مسائل ترکیب برنامه‌ریزی وسایل حمل‌ونقل و نیروی انسانی می‌توان به تحقیق کیم و همکاران [۷] اشاره کرد. آن‌ها مسئله ترکیبی مسیریابی وسایل نقلیه و برنامه‌ریزی تیم‌های کاری را بررسی کردند؛ به طوری که باید تعدادی کار با ترتیب مشخص در مکان هر مشتری انجام شود.

لارنت و ها [۸] برنامه‌ریزی هم‌زمان وسایل حمل‌ونقل و رانندگان را برای شرکت اجاره ماشین‌های لیموزین در نظر گرفتند. هدف برنامه‌ریزی جابه‌جایی برای سوار و پیاده کردن مشتریان در یک پنجره زمانی ارائه شده است.

• هریک از مشتریان به دریافت یک خدمت نیاز دارند و برای هریک از آن‌ها موعده تحویل و جریمه دیرکرد در نظر گرفته شده است. در صورتی که خدمت‌دهی بعد از این موعده انجام شود، هزینه‌ای به صورت جریمه دیرکرد در نظر گرفته می‌شود که میزان آن برای هر مشتری متفاوت است.

• چند وسیله نقلیه از هر نوع تیم در مرکز وجود دارد. هریک از تیم‌ها مهارت‌های متفاوتی در انجام کارهای مشتریان دارند و ممکن است امکان خدمت‌دهی به بعضی از مشتریان را نداشته باشند. همچنین هر مشتری، تنها توسط یک تیم خدمت‌رسانی می‌شود.

• وسایل نقلیه، از نظر سرعت جابه‌جایی و هزینه انتقال با یکدیگر متفاوت اند و هریک در هر زمان، قادر به جابه‌جایی یک تیم هستند.

برای درک مسئله می‌توان یک شرکت نصب و تعمیر تجهیزات سنگین را در نظر گرفت که تیم‌هایی فنی در سه رده حرفه‌ای، متوسط و تازه‌کار دارد و تیم‌های رده‌های مختلف، از نظر توان و دستمزد با یکدیگر متفاوت‌اند. همچنین جابه‌جایی این تیم‌ها، از طریق سه دسته وسیله نقلیه سواری، وانت و کامیون انجام می‌شود که از نظر سرعت و هزینه جابه‌جایی با یکدیگر تفاوت دارند. هدف، ارائه خدمات به مشتریان با توجه به درخواست و موعده تحویل، با کمترین هزینه است. یکی از مهم‌ترین فرضیه‌های این پژوهش آن است که با توجه به کمبود نیروهای انسانی متخصص در حوزه خدمت‌دهی به مشتریان، چندمهارت‌بودن آن‌ها و نیز تجهیزات و امکانات لازم برای اجرای هریک از خدمات مورد تقاضای مشتریان که حمل‌ونقل آن‌ها تنها با وسایل نقلیه مخصوص که به میزان محدود (به‌علت محدودیت مالی و فنی شرکت خدمت‌دهنده) در سازمان امکان‌پذیر است، نیروهای متخصص، پس از تکمیل هریک از خدمات و بازگشت به مرکز توزیع باید با توجه به اولویت مشتریان و میزان تخصص و مهارت آن‌ها برای مشتریان دیگر فرستاده شوند.

شکل ۱ نحوه نمایش گرافیکی یک جواب با هفت مشتری، سه وسیله نقلیه و سه نوع تیم را نشان می‌دهد. تور حرکت وسایل نقلیه به این صورت است که وسیله نقلیه اول، از مرکز به همراه تیم نوع ۱ به ترتیب به سمت

به تعریف مسئله ترکیبی نیروی انسانی - مسیریابی وسایل نقلیه پرداخته می‌شود. در بخش سوم ویژگی‌های مدل ساخته شده و مدل ریاضی ارائه می‌شود. طراحی الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> برای حل مسئله و تنظیم پارامترهای آن، به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم بررسی می‌شوند. نتایج محاسباتی و بررسی آن‌ها در بخش ششم انجام می‌گیرد. در نهایت، در بخش هفتم نتیجه‌گیری و زمینه پژوهش‌های آینده مطرح می‌شود.

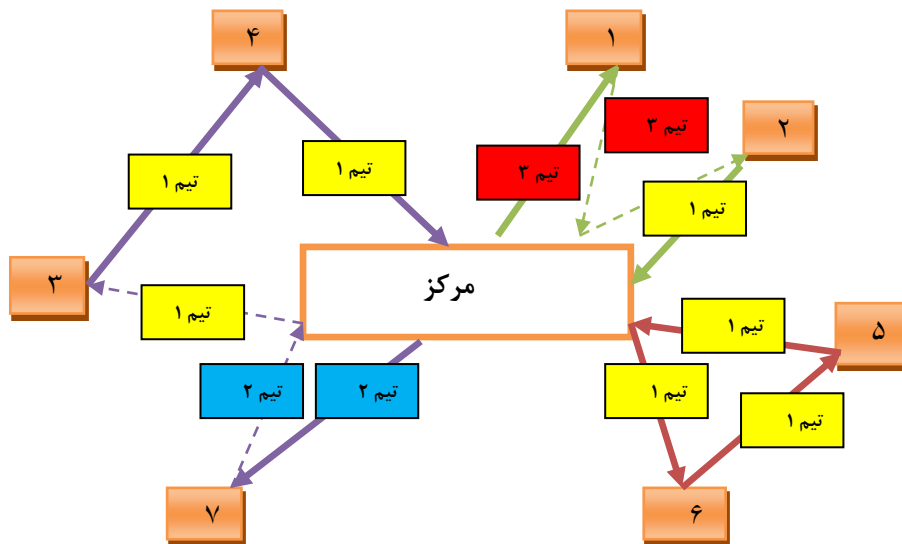
### تعریف مسئله

در مسئله ترکیبی نیروی انسانی - مسیریابی وسایل نقلیه در این پژوهش، تیم‌ها توانایی‌های مختلف و منعطفی دارند؛ بنابراین می‌توانند کارهای مشتریان را با سطوح مختلفی از مهارت انجام دهند و مهارت تیم‌ها در زمان ارائه خدمت، تأثیرگذار فرض شده است. هرچه مهارت تیم برای ارائه خدمت به یک مشتری بیشتر باشد، آن را در مدت کوتاه‌تری انجام می‌دهد. همچنین هریک از تیم‌ها ممکن است توانایی خدمت‌رسانی به یک یا چند مشتری را نداشته باشند و از این جهت، محدودیت‌هایی در به‌کارگیری انواع تیم وجود دارد. وسایل نقلیه نیز از نظر نوع، سرعت و هزینه، با یکدیگر متفاوت‌اند و بعضی از وسایل ممکن است امکانات لازم برای سفر به مکان یک یا چند مشتری را نداشته باشند. وسایل نقلیه ممکن است در طول مسیر، برای تعویض تیم‌ها به مرکز برگردند. از این‌رو، برای حل مسئله، علاوه بر مشخص کردن تیم‌های خدمت‌دهنده به هریک از مشتری‌ها و همین‌طور مسیریابی وسایل جابه‌جاکننده آن‌ها، باید بین ادامه مسیر یک وسیله یا یک تیم به سمت مشتری بعدی به صورت مستقیم یا بازگشت به مرکز و سپس انتقال تیم جدید از مرکز به مشتری بعدی (حرکت غیرمستقیم) تصمیم‌گیری شود. انتخاب‌های بهینه، به ایجاد تعادل بین هزینه‌های جابه‌جایی وسایل، هزینه‌های خدمت‌دهی تیم‌ها و همین‌طور هزینه‌های دیرکرد منجر می‌شود. به‌طور کلی، فرضیه‌های زیر برای مسئله در نظر گرفته شده است:

• تیم‌ها و وسایل نقلیه، از یک مرکز پخش، کار خود را آغاز می‌کنند و پس از ارائه خدمت، در انتهای مسیر به آن بازمی‌گردند. موقعیت جغرافیایی مرکز و مشتری‌ها مشخص است و فواصل به صورت مستقیم محاسبه می‌شوند.

بازمی‌گردد. وسیله نقلیه سوم نیز ابتدا تیم نوع ۳ را به مکان مشتری ۱ می‌برد. پس از آن به مرکز بازمی‌گردد، تیم نوع ۳ را با تیم نوع ۱ تعویض می‌کند و سپس به همراه تیم نوع ۱ به مشتریان ۲ سفر می‌کند.

مشتری‌های ۵ و ۶ سفر می‌کند و به مرکز بازمی‌گردد. وسیله نقلیه دوم نیز، ابتدا تیم نوع ۲ را به مکان مشتری ۷ می‌برد. سپس به مرکز بازمی‌گردد و تیم نوع ۲ را با تیم نوع ۱ تعویض می‌کند. پس از آن به همراه تیم نوع ۱ به ترتیب به سمت مشتریان ۳ و ۴ سفر می‌کند و سپس به مرکز



|                      |   |
|----------------------|---|
| مسیر وسیله نقلیه اول | ← |
| مسیر وسیله نقلیه دوم | ← |
| مسیر وسیله نقلیه سوم | ← |

شکل ۱. نمایش گرافیکی جواب

ماتریس  $P$  نشان داده می‌شود. این ماتریس دارای ابعاد  $R * N$  است که  $N$  تعداد مشتریان و  $R$  تعداد انواع تیم‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، وسایل نقلیه از نظر سرعت جابه‌جایی و هزینه انتقال، انواع متفاوتی دارند و برای سفر هر یک از وسایل نقلیه به مکان مشتریان نیز محدودیت‌هایی وجود دارد که با ماتریس  $G$  نشان داده می‌شود. این ماتریس دارای ابعاد  $V * N$  است که در آن،  $V$  تعداد وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. در مدل پیشنهادی، باید به تمام مشتریان سیستم خدمت‌رسانی شود و برای هر یک از مشتریان، موعدی برای ارائه خدمت در نظر گرفته شده است. در صورتی که زمان اتمام خدمت‌دهی به هر مشتری، بعد از این موعد باشد، هزینه‌ای به صورت جریمه دیرکرد به سیستم تحمیل می‌شود.

## ارائه مدل ریاضی خصوصیت مدل

برای مدل پیشنهادی، دو متغیر تصمیم‌گیری بیانگر نوع حرکت وسایل تعریف شده است: متغیر اول  $X_{ij}^{mk}$  است که جابه‌جایی‌های مستقیم بین مکان‌ها را نشان می‌دهد و در صورتی مقدار یک می‌گیرد که تیم نوع  $m$  از طریق وسیله نقلیه  $k$  از مکان  $i$  به مکان  $j$  منتقل شود. متغیر دوم  $Y_{ij}^{mm'k}$  است که بیانگر جابه‌جایی‌های غیرمستقیم بین مکان‌هاست و در صورتی مقدار یک می‌گیرد که وسیله  $k$ ، تیم  $m$  را از مکان  $i$  به مرکز ببرد و پس از تعویض تیم  $m$  با تیم  $m'$ ، تیم  $m'$  را از مرکز به مکان  $j$  منتقل سازد. مهارت هر یک از انواع تیم‌ها برای خدمت به هر مشتری، از طریق

### اندیس‌ها

$A_{im}$ : توانایی تیم نوع  $m$  برای خدمت‌دهی به مشتری  $i$  که به صورت ماتریسی با اعداد بین صفر و یک نمایش داده می‌شود؛  
 $G_{ki}$ : قابلیت وسیله نقلیه  $k$  برای سفر به مشتری  $i$  که ماتریسی با اعداد صفر و یک است. مقدار یک به این معناست که وسیله  $k$  قابلیت سفر به مشتری  $i$  را دارد؛ در غیر این صورت، مقدار آن برابر صفر است؛  
 $D_i$ : موعد انجام خدمت به مشتری  $i$ ؛  
 $W_i$ : جریمه دیرکرد خدمت‌دهی به مشتری  $i$ ؛  
 $M$ : یک عدد دلخواه بزرگ؛

$N$ : تعداد مشتریان سیستم  
 $V$ : حداکثر تعداد وسیله نقلیه سیستم  
 $R$ : حداکثر تعداد انواع تیم‌های سیستم  
 $i, j$ : شاخص‌های نشان‌دهنده مکان (مشتری‌ها و مرکز پخش)  
 به طوری که در  $i, j = 0, 1, 2, \dots, N$  مقدار صفر مربوط به مرکز است  
 $m, m'$ : شاخص‌های نشان‌دهنده نوع تیم به طوری که:  
 $m, m' = 1, 2, 3, \dots, R$   
 $k$ : شاخص نشان‌دهنده وسیله نقلیه به طوری که:  
 $k = 1, 2, 3, \dots, V$

### متغیرهای تصمیم

$X_{ij}^{mk}$ : در صورتی که تیم نوع  $m$  با وسیله نقلیه  $k$  از مکان  $i$  به مکان  $j$  منتقل شود، مقدار یک می‌گیرد؛  
 $Y_{ij}^{mm'k}$ : در صورتی که وسیله  $k$  تیم  $m$  را از مکان  $i$  به مرکز ببرد و پس از تعویض این تیم با تیم  $m'$  تیم  $m'$  را از مرکز به مکان  $j$  منتقل کند، مقدار یک می‌گیرد؛  
 $F_i$ : زمان اتمام خدمت‌دهی به مشتری  $i$ ؛  
 $L_i$ : میزان تأخیر در برآورده‌سازی خدمت مشتری  $i$ ؛

### پارامترهای ورودی

$T_{ijk}$ : زمان لازم برای جابه‌جایی بین مکان‌های  $i$  و  $j$  توسط وسیله  $k$   
 $CV_k$ : هزینه جابه‌جایی وسیله  $k$  در واحد زمان؛  
 $P_{im}$ : زمان انجام خدمت مشتری  $i$  ام توسط تیم  $m$   
 $CT_m$ : هزینه خدمت‌دهی تیم  $m$  در واحد زمان؛

### مدل ریاضی

$$\text{Min } z = \sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N X_{ij}^{mk} \times (T_{ijk} \times CV_k + P_{im} \times CT_m) + \sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{m'=1}^R \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Y_{ij}^{mm'k} \times ((T_{i0k} + T_{0jk}) \times CV_k + P_{im'} \times CT_{m'}) + \sum_{i=0}^N W_i \times L_i \quad (1)$$

S. t.

$$\sum_{m=1}^R \sum_{j=1}^N X_{0j}^{mk} = 1 \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^R \sum_{i=1}^N X_{i0}^{mk} = 1 \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{j=0, \neq i}^N X_{ij}^{mk} + \sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{m'=1, \neq m}^R \sum_{j=1, \neq i}^N Y_{ij}^{mm'k} = 1 \quad \forall i \neq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{i=1, \neq j}^N X_{ij}^{mk} + \sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R \sum_{m'=1, \neq m}^R \sum_{i=1, \neq j}^N Y_{ij}^{mm'k} = 1 \quad \forall j \neq 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=0, \neq j}^N X_{ij}^{mk} + \sum_{i=1, \neq j}^N \sum_{m'=1, \neq m}^R Y_{ij}^{mm'k} = \sum_{h=0, \neq j}^N X_{jh}^{m'k} + \sum_{h=1, \neq j}^N \sum_{m''=1, \neq m'}^R Y_{jh}^{m''k} \quad \forall j \neq 0, m, k \quad (6)$$

$$s_j \geq s_i + 1 - M \times (1 - \sum_{k=1}^V \sum_{m=1}^R X_{ij}^{mk} - \sum_{k=1}^V \sum_{m'=1}^R \sum_{m=1}^R Y_{ij}^{mm'k}) \quad \forall i \neq 0, j \neq 0, i \neq j \quad (7)$$

$$F_j \geq F_i + T_{ijk} + P_{jm} + M \times (X_{ij}^{mk} - 1) \quad \forall i, j \neq 0, i \neq j, m, k \quad (8)$$

$$F_j \geq F_i + T_{i0k} + T_{0jk} + P_{jm'} + M \times (Y_{ij}^{mm'k} - 1) \quad \forall i, j \neq 0, i \neq j, m, m', k \quad (9)$$

$$X_{ij}^{mk} + Y_{ij}^{mm'k} \leq G_{kj} \quad \forall i, j, m, m', k \quad (10)$$

$$X_{ij}^{mk} + Y_{ij}^{m'k} \leq A_{jm} \quad \forall i, j, m, m', k \quad (11)$$

$$L_i \geq F_i - D_i \quad \forall i \quad (12)$$

$$L_i \geq 0 \quad \forall i \quad (13)$$

$$X_{ij}^{mk}, Y_{ij}^{mm'k} \in \{0,1\} s_i, L_i, F_i \geq 0 \quad (14)$$

فرایند تکاملی، عملگر تقاطع<sup>۳</sup>، جهش<sup>۴</sup>، رقابت و انتخاب هستند. روش متداول پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک بدین- ترتیب است که مجموعه‌ای از جواب‌ها (کروموزوم‌ها) که جمعیت نامیده می‌شوند، تولید و به‌طور متناوب با جواب‌های جدیدی جایگزین می‌شوند. در هر بار تکرار، تمامی جواب‌ها با استفاده از یک تابع تناسب ارزیابی می‌شوند. آن‌گاه تعدادی از بهترین جواب‌ها با استفاده از یک تابع احتمال انتخاب می‌شوند و جمعیت جدید را تشکیل می‌دهند. تعدادی از این جواب‌ها به‌همان‌صورت و باقی آن‌ها با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی نظیر تقاطع و جهش برای تولید فرزندان<sup>۵</sup> به‌کار می‌روند [۱۷].

### نحوه نمایش جواب‌ها

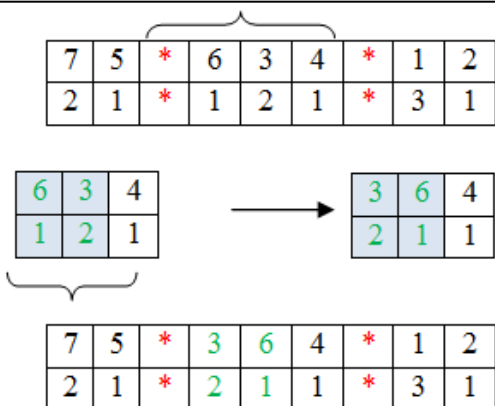
برای نمایش جواب، از یک ماتریس با دو سطر و  $N+V-1$  ستون استفاده شده است؛ به‌طوری‌که  $N$  نشان‌دهنده تعداد مشتریان و  $V$  نشانگر تعداد وسایل نقلیه است. عددهای سطر اول، شماره مشتریان و عددهای سطر دوم، انواع تیم‌ها را نشان می‌دهند. برای تفکیک مسیرهای هر وسیله نقلیه، از علامت \* استفاده شده است؛ بنابراین، برای تولید یک جواب امکان‌پذیر،  $V=1$  ستاره مورد نیاز است. شکل ۲ نمایش ماتریسی جواب گرافیکی شکل ۱ است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مشتریان ۵ و ۶ در تور وسیله نقلیه اول، مشتریان ۳، ۴ و ۷ در تور وسیله نقلیه دوم و مشتریان ۱ و ۲ در تور وسیله نقلیه سوم قرار دارند. همین‌طور خدمت مشتریان ۶، ۵، ۷، ۳، ۴، ۱ و ۲ به‌ترتیب به‌دست تیم‌های ۱، ۱، ۲، ۱، ۱، ۳ و ۱ انجام می‌شود. متفاوت‌بودن تیم‌های مربوط به دو مشتری متوالی از تور یک وسیله نقلیه، به این معناست که آن وسیله باید برای تعویض تیم به مرکز بازگردد. در غیر این صورت، به‌معنای حرکت مستقیم بین دو مشتری متوالی است.

معادله ۱ نشان‌دهنده تابع هدف مدل است که شامل هزینه‌های خدمت‌دهی تیم‌ها به مشتریان و هزینه‌های جابه‌جایی از طریق وسایل نقلیه و هزینه‌های دیرکرد می‌شود. محدودیت‌های ۲ و ۳ تضمین می‌کنند که تمام وسایل نقلیه از مرکز پخش، مسیر خود را آغاز کنند و در انتهای مسیرشان به مرکز پخش بازگردند. محدودیت‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که برای هر مشتری، تنها یک وسیله و یک تیم وارد و از آن خارج می‌شود. محدودیت ۶ بیان‌کننده آن است که همان وسیله و تیم ورودی به محدوده هر مشتری، باید از آن خارج شود. محدودیت ۷ برای جلوگیری از ایجاد زیرتور است. محدودیت‌های ۸ و ۹ ارتباط بین زمان خدمت‌دهی مشتریان متوالی در یک تور را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، محدودیت‌های امکان‌پذیر بودن مسئله‌اند و به‌ترتیب، به توانایی وسیله نقلیه و توانایی تیم برای خدمت‌دهی به یک مشتری مربوط می‌شوند. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳، ارتباط بین زمان اتمام خدمت‌دهی به هر مشتری و موعد تعریف‌شده برای آن را نشان می‌دهند.

### الگوریتم‌های پیشنهادی

#### الگوریتم ژنتیک

قواعد اساسی الگوریتم ژنتیک را نخستین‌بار هالند [۱۶] در سال ۱۹۷۵ معرفی کرد که تاکنون کاربردهای فراوانی در بهینه‌سازی انواع توابع خطی، غیرخطی، مشتق‌ناپذیر، گسسته و... داشته است. الگوریتم ژنتیک، تکنیک جست‌وجوی فراگیر هدفمندی است که بر عمل ژنتیک طبیعی استوار شده و بدین‌معناست که تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین ویژگی‌ها را داشته باشند و آن‌هایی که این صفات را نداشته باشند، به‌تدریج و طی زمان از بین می‌روند. اجزای زیرساختی



شکل ۴. عملگر جهش

**الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات**

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) از روش‌های محاسبات تکاملی است و با تقلید از پرواز پرندگان و تبادل اطلاعات میان آن‌ها ابداع شده است. در PSO هر راه‌حل، تنها یک پرنده در فضای جست‌وجوست و عضو نامیده می‌شود. تمام پرندگان، یک مقدار شایستگی دارند که از طریق تابع شایستگی - که باید بهینه شود - ارزیابی می‌شود؛ علاوه بر این، هر پرنده  $i$  دارای یک موقعیت در فضای  $D$  بعدی مسئله است که در تکرار  $t$  ام، با یک بردار به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$$

همچنین این پرنده سرعتی دارد که پروازش را هدایت می‌کند و در تکرار  $t$  ام با بردار زیر نشان داده می‌شود:

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$$

و این پرنده نیز در هر تکرار یک حافظه از بهترین موقعیت قبلی خودش را دارد که با بردار  $P$  نمایش داده می‌شود:

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)$$

در هر تکرار جست‌وجو، هر عضو با در نظر داشتن دو مقدار بهترین بروزرسانی می‌شود. مورد اول مربوط به بهترین راه‌حلی است که پرنده تاکنون آن را تجربه کرده است (مقدار شایستگی بهترین راه‌حل نیز ذخیره می‌شود). این مقدار را بهترین  $p$  یا در اصطلاح  $P\_best$  می‌نامند. مورد دوم، بهترین راه‌حلی است که با PSO دنبال می‌شود و نیز بهترین موقعیتی که تاکنون در جمعیت به دست آمده است. این مقدار بهینه عمومی است و در اصطلاح،  $G\_best$  نامیده می‌شود. زمانی که یک عضو، بخشی از جمعیت را به عنوان

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶ | ۵ | * | ۷ | ۳ | ۴ | * | ۱ | ۲ |
| ۱ | ۱ | * | ۲ | ۱ | ۱ | * | ۳ | ۱ |

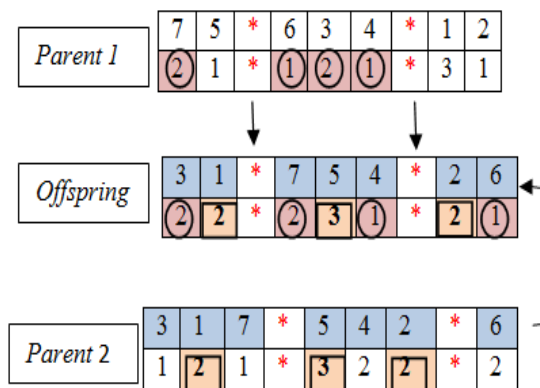
شکل ۲. نمایش ماتریسی جواب

**عملگر تقاطع**

در عملیات تقاطع، ابتدا مکان ستاره‌ها - که تعیین کننده تور وسایل نقلیه هستند - از والد اول ( $p1$ ) گرفته می‌شوند و در مکان متناظر خود در ماتریس نمایش دهنده فرزند قرار می‌گیرند. سپس مکان‌های باقیمانده از سطر اول - که نشان دهنده ترتیب مشتریان ملاقات شده هر وسیله نقلیه است - از والد دوم ( $p2$ ) گرفته می‌شوند و در مکان‌های متناظر قرار می‌گیرند. پس از آن، مکان‌های مربوط به سطر دوم - که نشان دهنده تیم‌های خدمت‌دهنده به هر مشتری است - به صورت یک‌درمیان، از والد اول و دوم انتخاب می‌شوند و در جای خود قرار می‌گیرند. شکل ۳ این رویکرد را نشان می‌دهد.

**عملگر جهش**

عملگر جهش در الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که ترتیب ملاقات مشتریان در یک مسیر عوض می‌شود. بدین منظور پس از انتخاب یک کروموزوم، تور یکی از وسایل نقلیه - که در آن، بیش از یک مشتری ملاقات شده است - انتخاب و سپس بخشی از این مسیر به صورت تصادفی معکوس می‌شود. شکل ۴ عملگر جهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمایش عملگر تقاطع

به‌طور شایان توجهی تعداد آزمایش‌های ضروری برای بررسی را با حفظ اطلاعات مورد نیاز، کاهش می‌دهد. در این پژوهش، فاکتورهای کنترلی روش تاگوچی، شامل پارامترهای الگوریتم ژنتیک است. این پارامترها عبارت‌اند از: نرخ تقاطع، نرخ جهش، ترکیب اندازه جمعیت اولیه و تعداد نسل. سطوح مختلف این فاکتورها در جدول‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. فاکتورهای الگوریتم ژنتیک به‌همراه سطوحشان

| سطوح    | شاخص سطوح | نماد | عامل‌ها           |
|---------|-----------|------|-------------------|
| ۰/۶     | ۱         | A    | نرخ تقاطع         |
| ۰/۷     | ۲         |      |                   |
| ۰/۸     | ۳         |      |                   |
| ۰/۱۵    | ۱         | B    | نرخ جهش           |
| ۰/۱۵    | ۲         |      |                   |
| ۰/۲۵    | ۳         |      |                   |
| ۸۰×۱۵۰  | ۱         | C    | تعداد جمعیت و نسل |
| ۱۰۰×۲۰۰ | ۲         |      |                   |
| ۱۵۰×۳۰۰ | ۳         |      |                   |

جدول ۲. فاکتورهای الگوریتم تجمع ذرات به‌همراه سطوحشان

| سطوح    | شاخص سطوح | نماد | عامل‌ها                |
|---------|-----------|------|------------------------|
| ۰/۸     | ۱         | D    | حداکثر مقدار وزن داخلی |
| ۰/۸۵    | ۲         |      |                        |
| ۰/۹     | ۳         |      |                        |
| ۰/۰۱    | ۱         | E    | حداقل مقدار وزن داخلی  |
| ۰/۰۳    | ۲         |      |                        |
| ۰/۰۵    | ۳         |      |                        |
| ۸۰×۱۵۰  | ۱         | F    | تعداد ذرات و نسل       |
| ۱۲۰×۲۰۰ | ۲         |      |                        |
| ۱۵۰×۲۵۰ | ۳         |      |                        |

جدول ۳. آرایه معامد  $L9 (4^3)$

| آزمایش | سطوح عوامل کنترلی |    |    |
|--------|-------------------|----|----|
|        | L1                | L2 | L3 |
| ۱      | ۱                 | ۱  | ۱  |
| ۲      | ۲                 | ۳  | ۲  |
| ۳      | ۳                 | ۲  | ۳  |
| ۴      | ۱                 | ۳  | ۳  |
| ۵      | ۲                 | ۲  | ۱  |
| ۶      | ۳                 | ۱  | ۲  |
| ۷      | ۱                 | ۲  | ۲  |
| ۸      | ۲                 | ۱  | ۳  |
| ۹      | ۳                 | ۳  | ۱  |

توپولوژی همسایگانش در نظر می‌گیرد، بهترین مقدار، یک بهترین محلی است و  $L\_best$  نامیده می‌شود. پس از اینکه دو مقدار بهترین پیدا شدند، موقعیت و سرعت هر عضو از طریق فرمول‌های زیر بروزسانی می‌شود:

$$V_i^{t+1} = w \times V_i^t + C_1 \times r_1^t \times (G_{best} - X_i^t) + C_2 \times r_2^t \times (P_{best} - X_i^t) \quad (15)$$

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{t_{max}} \times t \quad (16)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (17)$$

در فرمول‌های فوق،  $t$  بیانگر شماره تکرار است و متغیرهای  $c1$  و  $c2$  فاکتورهای یادگیری هستند که اغلب برابر ۲ هستند و میزان جابه‌جایی یک پرنده را در یک بار تکرار کنترل می‌کنند.  $r1$  و  $r2$  دو عدد تصادفی یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  هستند.  $w$  یک وزن جبری است که به صورت نوعی در بازه  $[0, 1]$  مقداردهی اولیه می‌شود. وزن جبری بزرگ‌تر، استکشاف عمومی و وزن جبری کوچک‌تر، استکشاف محلی را تسهیل می‌سازد.  $t$  و  $t\_max$  به ترتیب، ماکزیمم تعداد تکرارها و نسل جاری هستند. همچنین  $W_{max}$  و  $W_{min}$  حداقل و حداکثر مقداری هستند که هریک از وزن‌های خارجی دریافت می‌کنند. در الگوریتم PSO استاندارد، جمعیت با راه‌حل‌های تصادفی، مقداردهی اولیه می‌شود و تا رسیدن به شرط خاتمه، شایستگی جمعیت به صورت تکراری از طریق مقادیر  $P_{best}$  و  $G_{best}$  محاسبه می‌شود. سپس سرعت و موقعیت به ترتیب بروزسانی می‌شوند. در آخر هم  $G\_best$  و مقدار شایستگی‌اش، به‌عنوان خروجی بیان می‌شوند. شرط خاتمه ممکن است رسیدن به ماکزیمم تعداد نسل‌ها یا رسیدن به مقدار خاص شایستگی در  $G\_best$  باشد.

### تنظیم پارامترها به روش تاگوچی

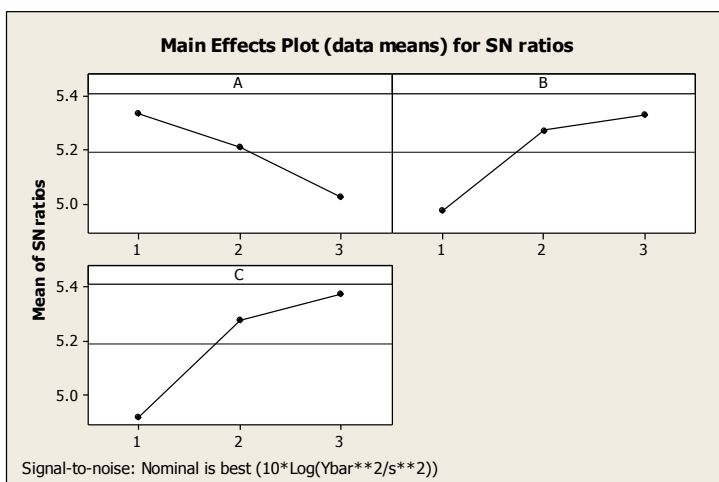
کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری، ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد؛ به طوری که انتخاب صحیح مقادیر پارامترها، سبب افزایش کارایی الگوریتم می‌شود. روش‌های آماری متنوعی برای طراحی آزمایش‌ها مطرح شده است، اما در استفاده از رویکرد جامعی مانند آزمایش‌های عاملی کامل با افزایش تعداد عامل‌های مورد بررسی، انجام محاسبات، پیچیده و بسیار زمان‌بر می‌شود. تاگوچی [۱۸] دسته‌ای از آزمایش‌های عاملی کسری را معرفی کرد که



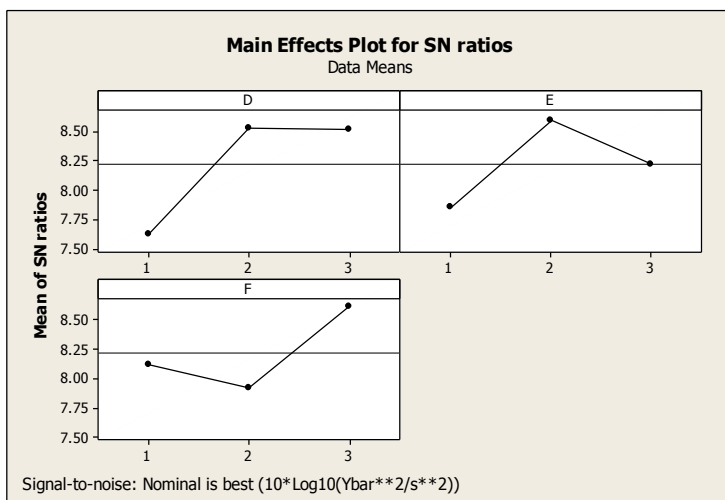
$$\frac{S}{N} = -10 \times \text{Log}_{10}(\text{Objective function})^2 \quad (18)$$

برای اجرای آزمایش‌ها، پنج مسئله نمونه در نظر گرفته شده است. هریک از نه آزمایش مختلف طراحی شده در آرایه متعامد، برای هریک از مسائل، پنج بار اجرا شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر S/N برای سطوح مختلف الگوریتم‌های پیشنهادی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش انحراف‌های الگوریتم، زمانی است که پارامترهای مسئله، برای هریک از الگوریتم‌ها به مقادیر زیر تنظیم شوند: نرخ تقاطعی سطح ۱، نرخ جهشی سطح ۳، ترکیب تعداد جمعیت اولیه و نسل سطح ۳، حداقل مقدار وزن خارجی سطح ۲، حداکثر مقدار وزن خارجی سطح ۲ و ترکیب تعداد ذرات و نسل سطح ۳.

برای عوامل در نظر گرفته شده، از جدول‌های استاندارد آرایه‌های متعامد، مناسب‌ترین آرایه L9 است که در جدول ۳ مشاهده می‌شود. مقادیر عدد صحیح داخل هر ستون، نشان‌دهنده سطح آن در هر آزمایش است. هدف در این روش، یافتن سطوح بهینه عامل‌های مهم قابل کنترل و کمینه کردن اثر فاکتورهای اغتشاش است. ویژگی‌های کیفی مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها به نسبت سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌شود. این نرخ، نشان‌دهنده میزان انحراف‌های نمایش داده شده در متغیر پاسخ است. مقدار تابع هدف این مسئله (مجموع هزینه‌ها) از جنس «هرچه کمتر بهتر» هستند و به همین دلیل، نسبت S/N دارای ویژگی «هرچه بزرگ‌تر بهتر» است. در روش تاگوچی، این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۵. نرخ S/N برای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در سطوح مختلف عامل‌ها



شکل ۶. نمودار نرخ S/N برای الگوریتم تجمع ذرات پیشنهادی در سطوح مختلف عامل‌ها

## نتایج محاسباتی

اکنون که سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم پیشنهادی برای مدل مسئله با استفاده از روش تاگوچی تنظیم شده است، می توان نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی را با راه-حل های دقیق برنامه CPLEX، از نظر مقدار تابع هدف و همین طور زمان حل مقایسه کرد. در این پژوهش، برای تعیین تعداد گره ها و موقعیت مکانی آن ها و همین طور زمان خدمت دهی به هر مشتری، از نمونه مسائل تولید شده در مقاله [۱۹] استفاده شده است. همچنین سطوح مختلفی برای کارکرد و هزینه های وسایل نقلیه و تیم ها به صورت تابع تصادفی به شکل جدول ۴ ایجاد شده است.

جدول ۴. سطوح فاکتورهای مسئله

| سطوح     | پارامترها              |
|----------|------------------------|
| U[۱۰,۲۰] | سرعت وسایل نقلیه       |
| U[0.4,۱] | توانایی تیم ها         |
| U[۲,۸]   | هزینه استفاده از وسایل |
| U[۱۰,۲۰] | هزینه تیم ها           |
| U[۱,۳]   | جریمه دیرکرد           |

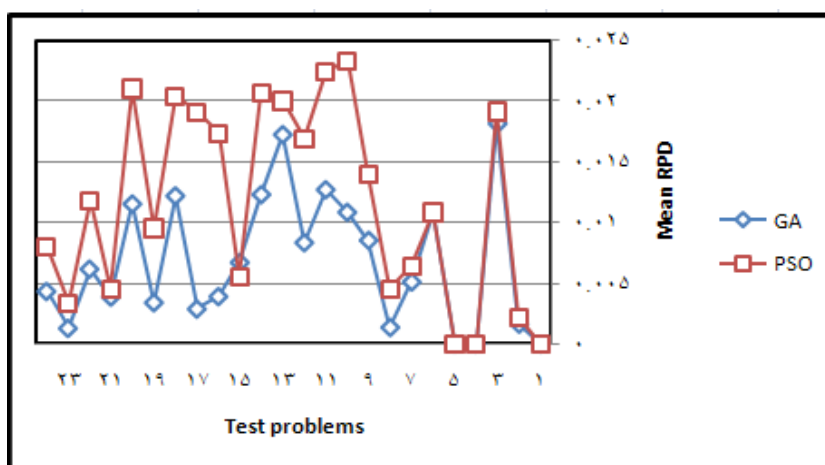
در جدول ۵ نتایج الگوریتم های پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین به ترتیب، مقادیر میانگین و بهترین جواب حاصل از پنج بار اجرای الگوریتم های پیشنهادی، در ستون های Mean و Best مشاهده می شود. در ستون

s(CPU)، متوسط زمان حاصل از پنج بار اجرای الگوریتم های پیشنهادی (به ثانیه) آمده است. متوسط شاخص RPD برای هریک از الگوریتم های مورد بررسی در جدول ۵ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$RPD = \frac{(Alg_{sol}) - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \quad (19)$$

که  $Alg_{sol}$  ارزش هدفی است که به ازای یک آزمایش از طریق یک الگوریتم به دست می آید و  $Min_{sol}$  نیز بهترین مقداری است که به ازای هر آزمایش، از طریق تمامی الگوریتم های پیشنهاد شده محاسبه می شود.

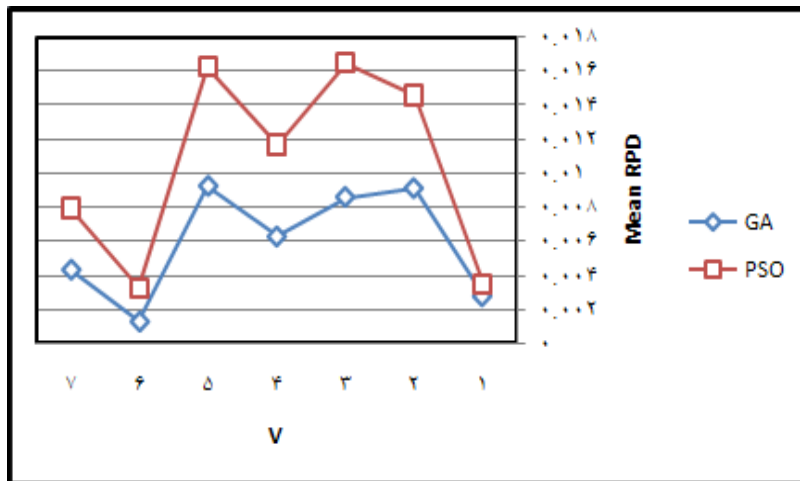
برنامه CPLEX برای مسائل ۱۹ به بعد، قادر به ارائه هیچ جوابی در زمان تعیین شده نیست و این موضوع با خط تیره نمایش داده شده است. الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات ارائه شده<sup>۷</sup> برای مسائل تا شماره ۱۲ در زمان کوتاهی به جواب هایی با انحراف به ترتیب به طور میانگین ۰/۶۵ درصد و ۰/۹۹ درصد دست می یابد. همچنین در مسائل ۱۵ به بعد، الگوریتم های ارائه شده، در مقایسه با برنامه CPLEX، در زمان بسیار کوتاه تر به جواب های بهتر دست می یابند (در این مسائل، CPLEX در جواب های محلی می ماند یا در زمان تعیین شده به هیچ جوابی نمی رسد). همچنین اختلاف مقادیر بهینه و میانگین الگوریتم های پیشنهادی ژنتیک و تجمع ذرات، به ترتیب ۰/۶۸ درصد و ۱/۱۷ درصد است. شکل ۷ به مقایسه مقدار انحراف های الگوریتم های پیشنهادی و الگوریتم دقیق می پردازد.



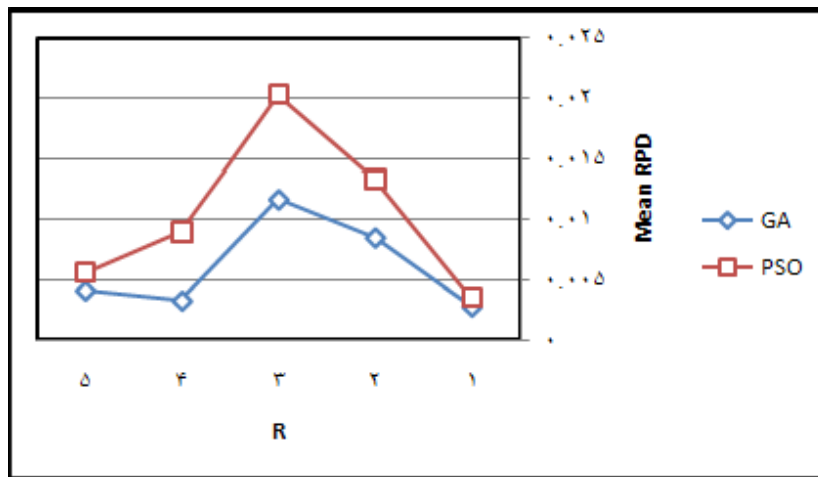
شکل ۷. مقایسه الگوریتم های پیشنهادی از طریق شاخص RPD

جدول ۵. نتایج محاسباتی الگوریتم‌های پیشنهادی

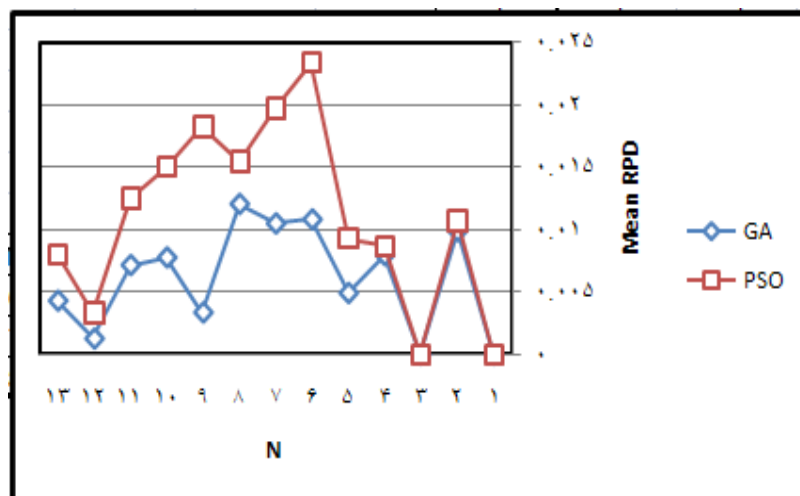
| Trial | Mathematical Model  |          |   | Proposed GA        |                    |          | Proposed PSO      |                     |                     |          |                    |
|-------|---------------------|----------|---|--------------------|--------------------|----------|-------------------|---------------------|---------------------|----------|--------------------|
|       | Best <sub>fit</sub> | CPU Time | R | Mean <sub>GA</sub> | Best <sub>GA</sub> | CPU Time | RPD <sub>GA</sub> | Mean <sub>PSO</sub> | Best <sub>PSO</sub> | CPU Time | RPD <sub>PSO</sub> |
| ۱     | ۹۵۹۵                | ۱        | ۲ | ۹۵۹۵               | ۹۵۹۵               | ۲۰       | .                 | ۹۵۹۵                | ۹۵۹۵                | ۳۲       | .                  |
| ۲     | ۱۲۸۵۴               | ۶        | ۲ | ۱۲۸۷۵              | ۱۲۸۵۴              | ۲۵       | ./۰.۱۶۳۳۳۳        | ۱۲۸۸۲               | ۱۲۸۵۴               | ۴۱       | ./۰.۲۱۷۸۴۱         |
| ۳     | ۱۶۱۳۴               | ۳۱       | ۳ | ۱۶۴۲۷              | ۱۶۱۳۴              | ۲۹       | ./۰.۱۸۱۶۰۴۰۷      | ۱۶۴۴۴               | ۱۶۱۳۴               | ۵۲       | ./۰.۱۹۱۵۲۱۰۱       |
| ۴     | ۱۸۶۲۰               | ۱۸       | ۲ | ۱۸۶۲۰              | ۱۸۶۲۰              | ۳۱       | .                 | ۱۸۶۲۰               | ۱۸۶۲۰               | ۵۷       | .                  |
| ۵     | ۱۷۷۷۲               | ۷۴       | ۳ | ۱۷۷۷۲              | ۱۷۷۷۲              | ۳۹       | .                 | ۱۷۷۷۲               | ۱۷۷۷۲               | ۵۹       | .                  |
| ۶     | ۲۱۹۳۷               | ۱۶۴      | ۲ | ۲۲۱۸۵              | ۲۲۱۸۵              | ۲۹       | ./۰.۱۰۸۴۴۳۰۷      | ۲۲۱۸۵               | ۲۲۳۴۱               | ۳۷       | ./۰.۱۰۸۴۴۳۰۷       |
| ۷     | ۱۹۹۸۳               | ۱۳۲      | ۳ | ۲۰۰۸۵              | ۲۰۰۴۷              | ۲۸       | ./۰.۵۱۰۴۳۳۹       | ۲۰۱۱۱               | ۲۰۰۴۷               | ۴۲       | ./۰.۵۴۰۵۴۴۵        |
| ۸     | ۲۵۷۲۶               | ۱۷۸      | ۲ | ۲۵۷۶۱              | ۲۵۷۲۶              | ۳۳       | ./۰.۱۱۶۵۰۴۹۱      | ۲۵۸۴۲               | ۲۵۷۲۶               | ۴۵       | ./۰.۴۵۰۹۰۵۷        |
| ۹     | ۲۲۸۵۱               | ۹۰۱      | ۳ | ۲۳۰۴۶              | ۲۲۸۷۲              | ۲۸       | ./۰.۸۵۳۳۵۳۳       | ۲۳۱۷۱               | ۲۲۹۹۴               | ۵۱       | ./۰.۱۴۰۰۳۳۶۴       |
| ۱۰    | ۲۸۲۰۶               | ۱۸۰۹     | ۳ | ۲۸۵۱۲              | ۲۸۴۲۴              | ۲۱       | ./۰.۱۰۸۴۷۵۶       | ۲۸۸۶۳               | ۲۸۵۰۱               | ۴۶       | ./۰.۳۳۲۹۹۱۶        |
| ۱۱    | ۳۳۹۹۹               | ۴۲۹      | ۴ | ۳۴۳۰۴              | ۳۴۲۷۵              | ۶۸       | ./۰.۱۲۰۰۸۸۶۳      | ۳۴۵۳۷               | ۳۴۳۱۲               | ۶۷       | ./۰.۲۲۴۱۷۶۰۱       |
| ۱۲    | ۳۷۲۰۸               | ۱۰۶۷     | ۳ | ۳۷۴۳۵              | ۳۷۴۰۴              | ۶۰       | ./۰.۸۴۴۳۱۳۴       | ۳۷۶۶۸               | ۳۷۳۹۵               | ۸۹       | ./۰.۱۶۹۰۶۷۹۲       |
| ۱۳    | ۳۴۴۳۸               | ۷۲۰۰     | ۴ | ۳۴۹۲۰              | ۳۴۴۳۸              | ۱۱۳      | ./۰.۱۷۴۵۳۹۷       | ۳۵۰۱۶               | ۳۴۳۸۴               | ۱۸۵      | ./۰.۲۰۰۴۱۹۴۸       |
| ۱۴    | ۳۴۳۰۸               | ۷۲۰۰     | ۴ | ۳۴۷۰۴              | ۳۴۷۸۲              | ۱۱۸      | ./۰.۱۳۰۹۶۶۷       | ۳۴۹۹۱               | ۳۴۴۲۵               | ۱۶۳      | ./۰.۲۰۶۸۱۴۰۷       |
| ۱۵    | ۳۵۸۷۱               | ۷۲۰۰     | ۶ | ۳۵۲۶۶              | ۳۵۰۳۱              | ۱۰۲      | ./۰.۶۷۰۸۳۴۴       | ۳۵۲۲۵               | ۳۵۱۲۶               | ۱۵۹      | ./۰.۵۵۳۷۹۵۲        |
| ۱۶    | ۴۲۴۴۳               | ۷۲۰۰     | ۴ | ۴۰۱۱۸              | ۳۹۹۶۲              | ۸۲       | ./۰.۳۹۰۳۷۰۹       | ۴۰۶۵۴               | ۴۰۱۱۲               | ۱۲۶      | ./۰.۱۷۳۱۶۶۵۱       |
| ۱۷    | ۴۰۸۲۹               | ۷۲۰۰     | ۵ | ۴۰۱۱۹              | ۴۰۰۰۴              | ۷۸       | ./۰.۲۸۷۷۱۳        | ۴۰۷۶۸               | ۴۰۲۳۳               | ۱۱۸      | ./۰.۱۹۰۹۸۰۹        |
| ۱۸    | ۵۶۱۱۸               | ۷۲۰۰     | ۴ | ۴۵۰۵۵              | ۴۴۶۸۳              | ۸۶       | ./۰.۱۲۱۹۸۵۸       | ۴۵۴۱۹               | ۴۴۵۱۲               | ۱۹۸      | ./۰.۲۰۳۷۶۵۱۸       |
| ۱۹    | ۶۰۹۳۱               | ۷۲۰۰     | ۵ | ۴۵۱۵۳              | ۴۵۰۰۰              | ۱۴۴      | ./۰.۰۰۳۴          | ۴۵۲۲۹               | ۴۵۲۲۷               | ۲۳۹      | ./۰.۹۵۳۳۳۳۳        |
| ۲۰    | -                   | ۷۲۰۰     | ۴ | ۶۸۶۷۰              | ۶۷۸۸۷              | ۱۰۷      | ./۰.۱۱۵۳۳۸۷۲      | ۶۹۲۱۵               | ۶۹۰۷۶               | ۲۲۶      | ./۰.۲۱۰۳۴۹۵۵       |
| ۲۱    | -                   | ۷۲۰۰     | ۵ | ۶۵۱۶۶              | ۶۴۹۱۵              | ۱۲۷      | ./۰.۳۸۶۶۵۹۵       | ۶۵۲۰۷               | ۶۵۱۱۲               | ۲۵۳      | ./۰.۴۴۹۸۱۹         |
| ۲۲    | -                   | ۷۲۰۰     | ۶ | ۶۴۹۸۰              | ۶۴۵۸۲              | ۳۴۵      | ./۰.۰۶۱۶۲۷۰۸      | ۶۵۳۳۳               | ۶۶۶۰۱               | ۴۳۷      | ./۰.۱۱۷۸۳۶۶۹       |
| ۲۳    | -                   | ۷۲۰۰     | ۶ | ۷۵۴۶۱              | ۷۵۴۹۱              | ۳۹۵      | ./۰.۰۰۱۲۸۷۰۸۷     | ۷۵۶۱۳               | ۷۵۴۶۴               | ۴۸۷      | ./۰.۳۳۰۲۹۶۵        |
| ۲۴    | -                   | ۷۲۰۰     | ۶ | ۱۰۷۴۷۳             | ۱۰۷۰۱۰             | ۸۸۶      | ./۴۳۳۶۶۸          | ۱۰۷۸۶۵              | ۱۰۷۰۹۹              | ۱۰۱۲     | ./۰.۷۹۸۹۹۰۷        |
| Mean  |                     |          |   |                    |                    | ۱۲۴.۷۵   | ./۰.۰۶۸۰۶۴۷۲      |                     |                     | ۱۷۵.۸۷   | ./۰.۱۱۷۰۴۴۳۷       |



شکل ۸. مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی به‌ازای تغییر تعداد وسایل نقلیه



شکل ۹. مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی به‌ازای تغییر تعداد تیم‌های کاری

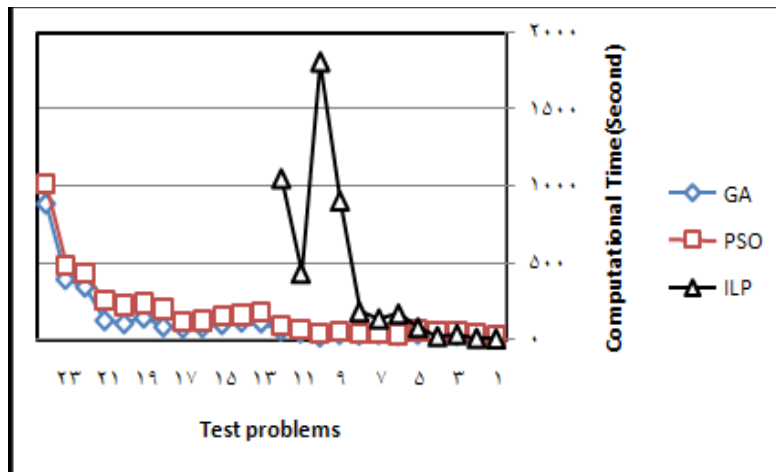


شکل ۱۰. مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی به‌ازای تغییر تعداد مراکز کاری

پیچیدگی‌های حل مسئله با افزایش تعداد مراکز، تعداد ماشین‌ها و تیم‌های کاری است و نیز نشان می‌دهد GA در مقایسه با به PSO، در زمان محاسباتی، محدودیت کمتری دارد.

شکل‌های ۸ الی ۱۰، به ترتیب نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی را به‌زای افزایش تعداد ماشین‌ها، تیم‌های خدمت‌رسانی و مراکز نمایش می‌دهند.

شکل ۱۱ به مقایسه زمان‌های حل الگوریتم‌های پیشنهادی می‌پردازد. این شکل نشانگر افزایش



شکل ۱۱. زمان محاسباتی الگوریتم‌های پیشنهادی

آزمون t، فرض‌های آماری زیر را در سطح اطمینان ۰/۹۵ آزمایش می‌کنیم.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهاد شده در زمان محاسباتی کمتر، به جواب‌هایی با کیفیت بهتر می‌رسد. برای مقایسه دقیق‌تر الگوریتم‌های مزبور با استفاده از

$$H_0 = \text{The average error of GA} = \text{The average error of PSO}$$

$$H_1 = \text{The average error of GA} > \text{The average error of PSO}$$

ژنتیک و تجمع ذرات استفاده شده و تنظیم پارامترهای آن به‌روش تاگوچی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، در زمان مناسب قادر به دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت مطلوب است. برای بسط این مدل می‌توان تیم‌ها و وسایل نقلیه را به‌صورت سیار فرض کرد که در مکان‌های مختلف مستقرند و از یک یا چند مرکز اطلاعاتی کنترل می‌شوند. ممکن است مشتریان به دریافت بیش از یک خدمت توسط تیم‌های مختلف در بازه‌های زمانی متفاوت و به ترتیب نیازمند باشند. همچنین اگر امکان بهنگام کردن موقعیت تیم‌ها و وسایل نقلیه در مدل پیش‌بینی شود، می‌توان به جامعیت بیشتری رسید و در الگوریتم‌های ابتکاری از آن استفاده کرد.

فرض صفر برای تمامی ترکیب‌های مورد بررسی در سطح اطمینان ۰/۹۵ رد می‌شود؛ بنابراین، متوسط شاخص RPD در الگوریتم GA به‌صورت آماری از PSO کمتر است. به‌عبارت دیگر، GA در بیشتر مسائل از PSO بهتر عمل می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل ارائه‌شده با در نظر گرفتن تیم‌های کاری به‌عنوان عوامل خدمت‌دهنده، کمینه‌سازی هزینه‌ها با برنامه‌ریزی برای مسیریابی وسایل حمل‌ونقل و جابه‌جایی تیم‌ها به‌صورتی انجام می‌شود که خدمات مربوط به هر مشتری، در زمان مناسب و با توجه به موعد مورد نظر مشتری صورت پذیرد. برای حل مسائل، از الگوریتم‌های

## مراجع

1. Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). "The truck dispatching problem." *Management Science*, Vol. 6, No.1, 80-91.
2. Bohoris, G.A. and Thomas, J. A. (1998). "A heuristic for vehicle routing and manpower Planning." *Industrial Applications of Combinatorial Optimization*, Vol.16, No.1, 256–271.
3. Lim, A., Rodrigues, B. and Song, L. (2004). "Manpower allocation with time windows." *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 55, No. 11, 1178–1186.
4. Li, Y., Lim, A. and Rodrigues, B. (2005). "Manpower Allocation with Time Windows and Job-Teaming Constraints." *Naval Research Logistics*, Vol.52, No.4, 598–610.
5. Dohn, A., Kolind, E. and Clausen, J. (2009). "The manpower allocation problem with time windows and job-teaming constraints: A branch-and-price approach." *Computers & Operations Research*, Vol.36, No.4, 1145-1157.
6. Bredstrom, D. and Ronnqvist, M. (2008). "Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints." *European Journal of Operational Research*, Vol.191, No.1, 212-221.
7. Kim, B.I., Koo, J. and Park, J. (2010). "The combined manpower-vehicle routing problem for multi-staged services." *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No.12, 8424–8431.
8. Laurent, B. and Hao, J. (2007). "Simultaneous vehicle and driver scheduling: A case study in a limousine rental company." *Computers & Industrial Engineering*, Vol.53, No.3, 542-558.
9. Zapfel, G. and Bogl, M. (2008). "Multi-period vehicle routing and crew scheduling with outsourcing options." *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, No.2, 980-996.
10. Hollis, B., Forbes, M. and Douglas, B. (2006). "Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia post." *European Journal of Operational Research*, Vol.173, No.1, 133-150.
11. Drexl, M., Rieck, J., Sigl, T. and Berning, B. (2013). "Simultaneous vehicle and crew routing and scheduling for partial and full load long-distance road transport." *BuR - Business Research*, Vol.6, No.2, 242-264.
12. Rasmussen, M.S., Justesen, T., Dohn, A. and Larsen, J. (2012). "The home care crew scheduling problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies." *European Journal of Operational Research*, Vol. 219, No.3, 273–289.
13. Thomsen, K. (2006). Optimization on home care, *Informatics and Mathematical Modelling*.
14. Bertels, S. Fahle, T. (2006). "A hybrid setup for a hybrid scenario: Combining Heuristics for the home health care problem." *Computers & Operations Research*, Vol.33, No.10, 2866–2890.
15. Dohn, A., Rasmussen, M.S. and Larsen, J. (2011). "The vehicle routing problem with time windows and temporal dependencies." *Networks*. Vol.58, No. 4, 273–289.
16. Holland, J.H.(1975). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, MIT Press, Cambridge. (2<sup>nd</sup> edition in 1992).
17. Gen, M. and Cheng, R. (1997). "Genetic Algorithms & engineering design." *A Wiley Inter Science Publication*.
18. Taguchi, G. (1986). "Introduction to quality engineering." *White Plains: Asian Productivity Organization*.
19. Solomon, M.M. (1987). "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints." *Operation Research*, Vol. 35, No.2, 254-265.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Manpower Vehicle Routing Problem
2. Genetic Algorithm
3. Cross Over
4. Mutation
5. Offsprings
6. Particle
7. Particle Swarm Optimization