

## مدل سازی ریاضی جدید برای مسئله مکان یابی تسهیلات و مسیریابی وسائط نقلیه و حل آن با الگوریتم رقابت استعماری تلفیقی

نرگس نوروزی<sup>۱</sup>، رضا توکلی مقدم<sup>۲\*</sup>، محسن صادق عمل نیک<sup>۳</sup>، صادق خائفی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۳/۳/۲۴ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۳/۱۰/۱۹ - تاریخ تصویب ۹۳/۱۰/۲۸)

### چکیده

یکی از اهداف سیستم‌های یکپارچه لجستیکی، که به مثابه یک فلسفه مدیریتی جدید طی چند دهه گذشته پدید آمده، افزایش کارایی توزیع محصولات است. این نوع مسائل معمولاً در دو بخش بررسی می‌شوند؛ مکان‌یابی تسهیلات برای سیاست‌های بلندمدت و مسیریابی وسائط نقلیه برای پاسخگویی بیشتر به تقاضای مشتریان در تصمیم‌های عملیاتی. این دو جزء به صورت جداگانه قابل حل است؛ اما این حل ممکن است به جواب بهینه مسئله اصلی منجر نشود و برای هر زیرمسئله جواب بهینه پیدا کند. این تحقیق، به تعیین همزمان مسائل مکان تسهیلات و مسیریابی وسائط نقلیه برای بازدید از تسهیلات مورد نظر، که باید سرویس‌دهی شوند، می‌پردازد. از آنجا که مسئله مورد بررسی از نوع مسائل NP-Hard است، به منظور حل آن در ابعاد بزرگ از الگوریتم رقابت استعماری تلفیقی استفاده می‌شود. برای نشان‌دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی تعدادی از مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ با این الگوریتم و روش حل دقیق به کمک نرم‌افزار CPLEX حل می‌شود. مقایسه این دو روش نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی است. در پایان نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** الگوریتم رقابت استعماری تلفیقی، مسیریابی وسائط نقلیه، مکان‌یابی تسهیلات.

### مقدمه

(VRP)، که مسیر هر وسیله را از انبار یا دپو به تسهیلاتی که باید سرویس‌دهی شوند مشخص می‌کند، بررسی شد. یوچنور و دمیرال [۳] نیز یک الگوریتم خوشه‌زنی بر پایه الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله VRP همراه چند انبار ارائه دادند و کارایی این الگوریتم را برای مسائل مختلف بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده زمان محاسباتی پایین همراه با کیفیت بالاست.

مقاله بالداجی و همکاران او [۴] حاوی مرور و مقایسه جامع الگوریتم‌های دقیق توسعه‌داده‌شده در حل مسئله VRP با پنجره زمانی است که می‌تواند به منزله یک منبع مناسب برای مطالعات این الگوریتم‌ها در نظر گرفته شود. برای حالت چندهدفه مسئله VRP همراه پنجره زمانی، که کمتر به اهمیت این موضوع پرداخته شده، ناجرا و بولیناریا [۵] یک الگوریتم تکاملی چندهدفه کارا بر پایه مقایسه شباهت میان جواب‌ها برای حل این مسئله ارائه دادند. کریتیکوس و یونانو [۶] یک مسئله VRPTW را در

طراحی یک سیستم مناسب تدارکات، با توجه به سهم شایان توجه هزینه‌های توزیع نسبت به کل هزینه‌های زنجیره تأمین، یکی از موضوعات بسیار مهم در دنیای رقابتی امروز است. از لحاظ طراحی و اداره سیستم‌های لجستیکی، مکان‌یابی تسهیلات مسئله‌ای مشترک است که مدیران لجستیک با آن مواجه‌اند. چنین مفهومی وابستگی بین مکان‌یابی تسهیلات (مراکز پشتیبانی) و تخصیص مشتریان به تسهیلات و نیز ساختار مسیریابی وسائط نقلیه را تعیین می‌کند. این نوع مسائل معمولاً در دو بخش بررسی می‌شوند؛ مکان‌یابی تسهیلات برای سیاست‌های بلندمدت و مسیریابی وسائط نقلیه برای پاسخگویی بیشتر به تقاضای مشتریان در تصمیم‌های عملیاتی. این دو جزء به صورت جداگانه قابل حل‌اند؛ اما این حل ممکن است به جواب بهینه مسئله اصلی منجر نشود و برای هر زیرمسئله جواب بهینه پیدا کند. از این رو، در این تحقیق مکان‌یابی تسهیلات (FLP) و مسئله مسیریابی وسائط نقلیه<sup>۲</sup>

مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی توأم آن را شکل داده‌اند. از آنجا که این مسئله NP-hard است، ارائه روشی دقیق برای حل آن در ابعاد واقعی ممکن نیست. با پیشرفت‌های اخیر در حل این‌گونه مسائل و با در نظر گرفتن مفروضات و قیود پیچیده‌تر روش‌های فراابتکاری همانند روش بهینه‌سازی انبوه ذرات [۱۲]، کلونی مورچگان [۱۳]، و جست‌وجوی پراکنده [۱۴] در سال‌های اخیر توسعه داده شدند.

مسئولان پشتیبانی و خرید در واحدهای تولیدی اغلب به دنبال چیدمان بهینه تسهیلات نصب‌شده جهت تأمین محصولات مورد نیاز در فضای موجودند تا هزینه و زمان حمل‌ونقل مواد و محصولات را کمینه کنند. در این میان گاهی لازم است با محدودیت‌هایی از قبیل قیود پیش‌نیازی، فضای در دسترس، و حداقل و حداکثر فاصله پذیرفتنی بین تسهیلات روبه‌رو شوند. پس از طراحی چیدمان تسهیلات، نوبت به طراحی خط تولید و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل برای بهینه‌سازی جریان مواد می‌رسد. در این مرحله مهندسان و طراحان با معضلاتی از قبیل محدودیت پتانسیل حمل‌ونقل، محدودبودن وسایل نقلیه، پنجره‌های زمانی، و محدودیت ظرفیت روبه‌رو هستند. مدل پیشنهادی زیر به منظور ارائه توأم طراحی بهینه چیدمان تسهیلات، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مواد، و جابه‌جایی تسهیلات نصب‌شده معرفی می‌شود.

فضای کارخانه با  $m$  مکان بالقوه جهت قرار گرفتن تسهیلات در نظر گرفته شده است. لازم است  $n$  ماشین (تسهیلات) در گزیده‌ای از این مکان‌ها نصب شوند ( $m \geq n$ ). در این میان مکان نصب برخی تسهیلات در تصمیم‌گیری لحاظ نشده و بنا بر محدودیت‌هایی جای آن‌ها از پیش مشخص است.  $v$  خودرو برای سرویس‌دهی و بازدید  $m$  تسهیلات نصب‌شده در دسترس اند. قرار است آن‌ها به گونه‌ای برنامه‌ریزی شوند که زمان سرویس‌دهی همه تسهیلات کمینه شود. در این تحقیق، مسیریابی حمل‌ونقل به صورت باز در نظر گرفته شد؛ به گونه‌ای که حرکت خودروها از یک مرکز خاص شروع و به آن ختم نشود. در حقیقت ابتدا و انتهای مسیر خودروها باز باشد. همچنین تعدادی محدودیت‌های پیش‌نیازی وجود دارد؛ به گونه‌ای که لازم است بعضی ماشین‌ها پیش از بعضی دیگر توسط خودرویی یکسان بازدید شوند. پنجره‌های زمانی برای بازدید هر یک از تسهیلات در نظر گرفته شد. در ادامه مدل ریاضی مسئله فوق برای یافتن بهینه‌ترین چیدمان تسهیلات در مکان‌های بالقوه و تخصیص بهینه خودروها جهت سرویس‌دهی تسهیلات در کمترین زمان ممکن ارائه می‌شود.

نظر گرفته‌اند که دارای دو ویژگی منحصر به فرد است: خودروها دارای ظرفیت‌های متفاوت‌اند و همچنین امکان بارگیری اضافه برای هر خودرو وجود دارد. سپس با تخصیص یک مقدار جریمه برای هر اضافه‌بار هزینه نهایی به کمک یک الگوریتم ابتکاری کمینه می‌شود.

میرایی و همکاران او [۷] رویکرد ترکیبی ابتکاری تصادفی کارآمدی را برای حل مسئله VRP با چند انبار ارائه کردند. هدف این تحقیق کمینه کردن زمان بازگشت ماشین‌ها به انبار بود. رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق ترکیبی از روش‌های توسعه‌یافته قطعی و تصادفی و رویکرد شبیه‌سازی تبرید SA<sup>۳</sup> است. آن‌ها نتایج این رویکرد را بهترین رویکرد شناخته‌شده معرفی کردند.

روان و همکاران او [۸] راه‌حلی ترکیبی برای مسئله VRP ظرفیت‌دار با محدودیت‌های بارگذاری سه‌بعدی ارائه کردند. هدف این راه‌حل کمینه کردن هزینه حمل‌ونقل در زمان سرویس‌دادن به مشتری بود. رویکردهای استفاده‌شده، که ترکیبی از الگوریتم زنبور عسل و شش الگوریتم ابتکاری بارگذاری بود، در همه آزمون‌ها بهترین جواب را برای سناریوهای مختلف به دست آورد. فاضل زرنندی و همکاران او [۹] در زمینه مسائل تعیین تسهیلات در شرایط پنجره زمانی و عدم قطعیت تحقیق کردند. تقاضای مشتری و زمان سفر در پژوهش ایشان متغیرهای فازی در نظر گرفته شدند. برای حل این مسئله از مدل فازی برنامه‌نویسی محدودشده شانس (CCP)<sup>۴</sup> و ترکیبی از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و همچنین روش ابتکاری الگوریتم خوشه‌بندی c میانگین (FCM)<sup>۵</sup> استفاده شد. نتایج اجرای رویکردها بیانگر مؤثر بودن آن‌ها بود.

ژو و همکاران او [۱۰] یک مدل ریاضی و روش حل کارا برای مسئله تخصیص دومعیاری در حالت چندانباری با ظرفیت‌های مختلف ارائه کردند. در روش حل، الگوریتم ژنتیک به کار رفت که به منظور یافتن جواب‌های بهینه پارتو برای دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت طراحی شد. همچنین اسکوبار و همکاران او [۱۱] یک الگوریتم دومرحله‌ای ترکیبی برای حل مسئله مسیریابی تسهیلات ارائه کردند.

## تعریف مسئله

طراحی و تحلیل شبکه تأمین یکی از مسائل بسیار مهم در زنجیره تأمین چندسطحی است. در سال‌های اخیر دو مسئله اصلی در طراحی شبکه‌های تأمین، مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه همزمان، در نظر گرفته شده و مدل

**اندیس ها**

$i, j$  ماشین ها  $(0, \dots, m)$

$k, l$  نقاط استقرار  $(0, \dots, n)$

$v$  اندیس خودروها  $(1, \dots, v)$

$$\sum_{i=0}^m y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \quad (9)$$

$$a_j \geq a_i \times \theta_{ij} \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^m x_{iiv} \geq \sum_{i=0}^m x_{ijv} \times \theta_{ij} \quad \forall i, j, v \quad (11)$$

$$y_{ik} \geq \lambda_{ik} \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$t_{ij} = y_{ik} \times y_{jl} \times d_{kl} \quad \forall i, j, k, l \quad (13)$$

**پارامترها و متغیرهای تصمیم**

$e_i$  زودترین زمان ورود پذیرفتنی برای ماشین  $i$ ؛

$l_i$  دیرترین زمان ورود پذیرفتنی برای ماشین  $i$ ؛

$f_{iv}$  زمان بارگیری توسط خودروی  $v$  برای ماشین  $i$ ؛

$d_{kl}$  زمان مورد نیاز برای پیمودن نقطه  $k$  به  $l$ ؛

$\theta_{ij}$  اگر ماشین  $i$  قبل از ماشین  $j$  ملاقات شود؛  
در غیر این صورت

$\lambda_{ik}$  اگر مکان  $k$  پیش فرض ماشین  $i$  محل  $k$  باشد؛  
در غیر این صورت

$t_{ij}$  زمان مورد نیاز برای پیمودن نقطه  $i$  به  $j$ ؛

$a_i$  زمان رسیدن به ماشین  $i$ ؛

$x_{ijv}$  اگر خودروی  $v$  ماشین  $i$  را به مقصد ماشین  $j$  ترک کند؛  
در غیر این صورت

$y_{ik}$  اگر ماشین  $i$  در محل  $k$  مستقر شود؛  
در غیر این صورت

از آنجا که مدل ارائه شده غیر خطی است و به دلیل آنکه مدل های غیر خطی سخت تر از مدل های خطی حل می شوند، در این قسمت مدل به صورت زیر خطی سازی می شود:

$$xx_{ijv} = x_{ijv} \times (a_i + t_{ij}) \Rightarrow$$

$$xx_{ijv} + M(1 - x_{ijv}) \geq a_i + t_{ij} \quad (14)$$

$$\forall i, j, v$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{i=0}^m x_{ijv} (a_i + t_{ij} + f_{iv}) \leq a_j \Rightarrow$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{i=0}^m (xx_{ijv} + f_{iv} \times x_{ijv}) \leq a_j \quad (15)$$

$$\forall j > 0$$

$$z_v = \max \left\{ \sum_{i=1}^m x_{i0v} (a_i + t_{i0} + f_{iv}) \right\} \Rightarrow$$

$$z_v \geq \sum_{i=1}^m (xx_{i0v} + f_{iv} \times x_{i0v}) \quad \forall v \quad (16)$$

$$t_{ij} = y_{ik} \times y_{jl} \times d_{kl} \Rightarrow$$

$$t_{ij} + M(2 - (y_{ik} + y_{jl})) \geq d_{kl} \quad \forall i, j, k, l \quad (17)$$

$$t_{ij}, a_i \geq 0, x_{ijv}, \theta_{ij}, \lambda_{ik}, y_{ik} \in [0, 1] \quad (18)$$

همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، هدف از مدل سازی فوق طراحی چیدمان و تخصیص بهینه خودروهاست، به نحوی که امکان سرویس دهی به همه ماشین ها (تسهیلات) در کمترین زمان ممکن فراهم شود. از آنجا که مسئله مورد بحث یک مسئله مسیریابی باز است و بازگشت به مبدأ حرکت الزامی نیست، مکان و ماشینی مجازی با اندیس ۰ در نظر گرفته شده است که فاصله آن ها تا سایر نقاط و ماشین ها برابر ۰ است. همچنین محدودیت  $y_{00}=0$  متضمن این است که ماشین مجازی حتماً در مکان مجازی با اندیس ۰ قرار گیرد. در این حالت، هر خودرو با حرکت از ماشین مجازی و بازگشت به آن در واقع مسیر بازی را طی خواهد کرد و مبدأ و مقصد حرکت آن یکسان نخواهد بود. زمان سرویس دهی برای هر

**مدل ریاضی پیشنهادی**

$$\text{Min } Z = \max \left\{ \sum_{i=1}^m x_{i0v} (a_i + t_{i0} + f_{iv}) \right\}$$

s.t.

$$\sum_{i=0}^m x_{ijv} = \sum_{i=0}^m x_{jiv} \quad \forall j, v \quad (1)$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{i=0}^m x_{ijv} = 1 \quad \forall j > 0 \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{i=0}^m x_{jiv} = 1 \quad \forall j > 0 \quad (3)$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{j=1}^m x_{0jv} = v \quad (4)$$

$$\sum_{v=1}^v \sum_{i=0}^m x_{ijv} (a_i + t_{ij} + f_{iv}) \leq a_j \quad \forall j > 0 \quad (5)$$

$$e_i \leq a_i \leq l_i \quad \forall i > 0 \quad (6)$$

$$f_{0v} = 0 \quad \forall v \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n y_{ik} = 1 \quad \& \quad y_{00} = 1 \quad \forall i > 0 \quad (8)$$

## الگوریتم حل پیشنهادی

در ارائه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به‌رغم توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی و به مثابه پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل توجه چندانی نشده است. الگوریتم رقابت استعماری با الهام گرفتن از تکامل اجتماعی انسان، جهت بهینه‌سازی توابع پیچیده، توسعه داده شد. این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درمی‌آورد و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهد. عملگر جذب برای حرکت دادن مستعمرات به طرف قوی‌ترین کشور هر امپراتوری استفاده می‌شود. رقابت استعماری شبیه‌ساز رفتار کشورهای استعمارگر برای زیر سلطه درآوردن سایر کشورهاست. قدرت کلی امپراتوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به‌اضافه درصدی از قدرت میانگین مستعمرات آن تعریف می‌شود. یکی از شروط توقف این الگوریتم از بین رفتن همه امپراتوری‌های ضعیف و یکی شدن همه آن‌هاست [۱۵]. از طرفی الگوریتم رقابت استعماری، به‌رغم عملکرد درخشان، در جست‌وجوی فضاهای پیوسته، به‌تنهایی در بهینه‌سازی مسائل گسسته ناتوان است. بنابراین، در این تحقیق روشی جهت تلفیق قدرت جست‌وجوی الگوریتم رقابت استعماری و توانایی ابزارهای الگوریتم ژنتیک در بهبود جواب‌های گسسته ارائه می‌شود. در واقع این روش تلفیقی نتیجه هماهنگ شدن عملگرهای جذب، رقابت استعماری، ترکیب، جهش، و تولید تصادفی است. شبه‌کد الگوریتم طراحی شده در شکل ۱ می‌آید.

در ابتدای الگوریتم طراحی شده امپراتوری‌های اولیه شکل می‌گیرد و قدرت هر امپراتوری محاسبه می‌شود.

- تولید تصادفی: ابتدا، با توجه به اطلاعات موجود در صورت مسئله، مجموعه‌ای از مسیرها بر مبنای روابط پیش‌نیازی ساخته می‌شود؛ به گونه‌ای که تسهیلات پیش‌نیاز و پس‌نیاز در قالب رشته‌های عددی به صورت متوالی بیابند. بر مبنای محدودیت‌های مسئله، می‌دانیم هر مسیر می‌تواند فقط و فقط توسط یک خودرو بازدید شود. بنابراین، در ادامه، به منظور تولید جواب‌های تصادفی، مسیرها به شکل تصادفی به خودروهای موجود تخصیص می‌یابند. پس از آن، با

خودرو برابر زمان بازگشت آن خودرو به ماشین ۰ است. در نتیجه، تابع هدف فوق به کمینه‌سازی طولانی‌ترین زمان سرویس خودروها منجر می‌شود.

با اعمال اولین محدودیت، اطمینان حاصل می‌شود که هیچ خودرویی در هیچ گره خاصی باقی نمانده و پس از سرویس آن از آنجا خارج می‌شود. بر مبنای محدودیت‌های ۲ و ۳ و ۴ لازم است همه ماشین‌ها به غیر از ماشین مجازی فقط و فقط توسط یک خودرو بازدید شود. در مقابل، برنامه‌ریزی خودروها باید به گونه‌ای باشد که ماشین مجازی را همه خودروها بازدید کنند. محدودیت ۵ گویای این واقعیت است که هر گاه ماشین  $z$  بلافاصله بعد از ماشین  $i$  و توسط خودرویی یکسان بازدید شود، زمان ورود به ماشین  $i$  برابر زمان ورود به ماشین  $i$  به‌علاوه زمان سرویس ماشین  $i$  و زمان لازم برای جابه‌جایی بین این دو ماشین است. محدودیت ۶ محدودیت پنجره زمانی (زودترین و دیرترین زمان) برای بازدید هر ماشین است. طبق محدودیت ۷ زمان سرویس ماشین مجازی توسط همه خودروها برابر ۰ است. بر مبنای محدودیت ۸ هر ماشین باید در یک مکان نصب شود و ماشین مجازی لازم است در مکان مجازی قرار داده شود. از طرفی محدودیت ۹ دلالت بر این موضوع دارد که در هر مکان حداکثر نصب یک ماشین امکان‌پذیر است. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ محدودیت‌های پیش‌نیازی نامیده می‌شوند. بر مبنای این محدودیت‌ها هرگاه بازدید ماشین  $i$  پیش‌نیاز بازدید ماشین  $z$  باشد، لازم است هر دو توسط یک خودرو بازدید شوند و زمان بازدید ماشین  $i$  کوچک‌تر از ماشین  $z$  باشد. محدودیت ۱۲ نشان‌دهنده لزوم قرارگرفتن برخی ماشین‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده است. طبق محدودیت ۱۳ فاصله زمانی بین دو ماشین برابر فاصله زمانی مکان‌های آن‌هاست.

از عبارات ۱۴ و ۱۵ برای خطی‌سازی محدودیت ۵، از عبارات ۱۴ و ۱۶ برای خطی‌سازی تابع هدف، و از محدودیت ۱۷ جهت جایگزینی رابطه غیر خطی به کاررفته در محدودیت ۱۳ استفاده شد. در نتیجه این خطی‌سازی همه عبارات به کاررفته در مدل خطی شد؛ ولی به علت وجود متغیرهای ۰ و ۱ و عدد صحیح متعدد مدل فوق کماکان به شکل یک مدل مختلط عدد صحیح مطرح است که حل آن با روش‌های دقیق بسیار زمان‌بر و در اغلب موارد ناممکن است. همچنین محدودیت ۱۸ نوع متغیرهای مدل را نشان می‌دهد.

یک امپراتوری باقی می‌ماند. امپراتور باقی‌مانده به منزله بهترین جواب ذخیره می‌شود و به نمایش درمی‌آید.

۱. داده‌های صورت مسئله را بخوان.
۲. پارامترهای الگوریتم را مقداردهی کن.
۳. امپراتوری‌های اولیه را بساز.
  - ۱-۳. کشورهای اولیه را به صورت تصادفی بساز.
  - ۲-۳. قدرت هر کشور را با توجه به مقدار تابع هدف آن برازش کن.
  - ۳-۳. امپراتورها و مستعمراتشان را بر مبنای قدرت کشورها مشخص کن.
  - ۳-۴. قدرت هر امپراتوری را بر مبنای قدرت امپراتور و مستعمراتش محاسبه کن.
۴. حلقه زیر را تا آنجا تکرار کن که فقط یک امپراتوری باقی بماند (حلقه اصلی الگوریتم).
  - ۱-۴. عملیات زیر را برای هر امپراتوری انجام بده.
    - ۱-۴. عملگر جذب را فعال کن: مستعمرات را با امپراتوری‌هایشان ترکیب کن و آن‌ها را به سمت امپراتور حرکت بده.
    - ۲-۴. از عملگر جهش برای جست‌وجوی موضعی امپراتورها و برخی مستعمراتشان استفاده کن.
    - ۳-۴. درصد از پیش تعیین شده‌ای از جمعیت را به صورت تصادفی جایگزین کن.
    - ۴-۴. قدرت هر کشور را با توجه به مقدار تابع هدف آن برازش کن.
    - ۵-۴. قوی‌ترین کشور را در هر امپراتوری به منزله امپراتور جدید مشخص کن.
    - ۶-۴. قدرت هر امپراتوری را بر مبنای قدرت امپراتور و مستعمراتش محاسبه کن.

شکل ۱. شبه‌کد الگوریتم تلفیقی رقابت استعماری

### نتایج محاسباتی

در این قسمت عملکرد الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌شود. به همین منظور، دو نمونه مسئله، یکی در ابعاد کوچک و دیگری در ابعاد بزرگ، طراحی شد. در نمونه اول شانزده نمونه از مسائل نمونه کوچک با الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل و جواب‌ها با جواب‌های حاصل از حل مدل با نرم‌افزار CPLEX مقایسه می‌شود. هدف این آزمایش

توجه به مقادیر پارامتر  $n$ ، برخی ماشین‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده قرار می‌گیرند. در نهایت، ماشین‌های باقی‌مانده به شکلی احتمالی در مکان‌های خالی نصب می‌شوند. احتمال قرارگرفتن هر ماشین در هر مکان خالی بسته به ماشین‌های مجاور و خودروهای بازدیدکننده آن‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شود که ماشین‌هایی که توسط خودرویی یکسان بازدید می‌شوند با احتمالی بالا در مجاورت یکدیگر قرار گیرند.

در بدنه اصلی الگوریتم تلفیقی مورد بحث عملگر جذب از طریق ترکیب مستعمرات با امپراتورها فعال می‌شود.

• ترکیب: ماشین‌های منتخب جهت بازدید توسط هر خودروی خاص به صورت ترکیبی از ماشین‌های بازدیدشده توسط آن خودرو در کروموزوم‌های والدین تعیین می‌شوند. بعد از ترکیب بازدیدها نوبت به مکان‌یابی آن‌ها می‌رسد. در این مرحله ماشین‌های جدیدی که قرار است توسط هر خودرو بازدید شوند جایگزین مکان ماشین‌های قدیمی بازدیدشده توسط آن خودرو می‌شوند.

به منظور جست‌وجوی محلی جهت ارتقای بهترین جواب‌های موجود، تعدادی از مستعمرات همراه همه امپراتورها انتخاب می‌شوند و جهش می‌یابند.

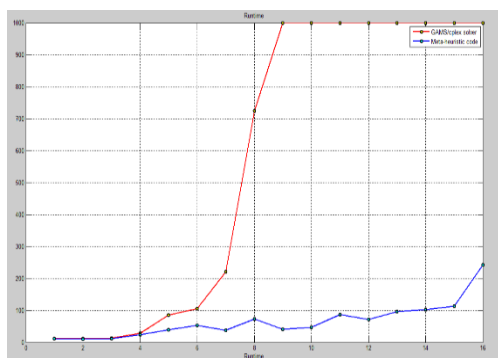
• جهش: دو خودرو متفاوت از کروموزوم اولیه در نظر گرفته می‌شوند و برخی مسیرهای تخصیص‌یافته به آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب و تعویض می‌شوند. همانند عملگر ترکیب، در اجرای عملگر جهش نیز ماشین‌های جدیدی که قرار است توسط هر خودرو بازدید شوند جایگزین مکان ماشین‌های قدیمی بازدیدشده توسط آن خودرو می‌شوند.

اکنون بخشی از مستعمرات به صورت تصادفی انتخاب و کشورهای تصادفی جدیدی جایگزین آن‌ها می‌شوند. سپس، قدرت هر کشور بر مبنای تابع هدف معرفی شده در مدل ریاضی محاسبه و قوی‌ترین کشورها در هر امپراتوری به منزله امپراتور جدید شناخته می‌شوند. اکنون نوبت فعال کردن عملگر رقابت استعماری بین امپراتورهاست.

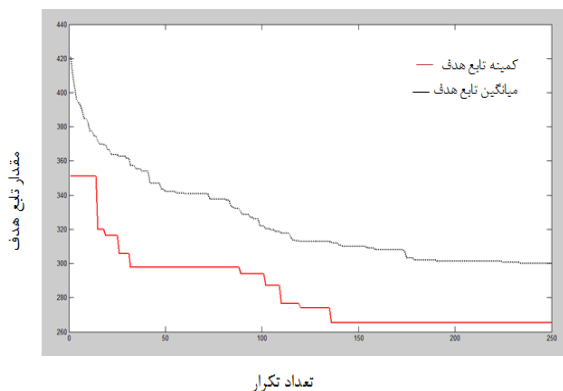
• رقابت استعماری: در این مرحله ضعیف‌ترین امپراتوری شناسایی و بخشی از مستعمرات آن با توجه به قدرت محاسبه شده برای سایر امپراتوری‌ها به شکلی احتمالی بین آن‌ها تقسیم می‌شود.

الگوریتم فوق تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که همه امپراتوری‌های ضعیف به مرور زمان از هم می‌پاشد و فقط

طراحی شده قبل از نرم افزار CPLEX به همگرایی می‌رسد؛ اما میزان رشد زمان حل برای این نرم افزار با بزرگ شدن ابعاد مسئله به مراتب بزرگ تر از این میزان برای روش فراابتکاری است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش تلفیقی معرفی شده امکان حل مسائل واقعی را با دقت بالا در زمانی بسیار کمتر از زمان مورد نیاز توسط نرم افزار CPLEX فراهم می‌آورد. در ادامه، به منظور مشاهده عملکرد الگوریتم فراابتکاری در حل مسائل بزرگ با ابعاد نسبتاً واقعی، سه مسئله نمونه با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ تولید و توسط روش تلفیقی گذشته در نرم افزار متلب حل شدند. سه مسئله نمونه با ۳۰ تا ۵۰ ماشین جهت مکان‌یابی و برنامه‌ریزی حمل و نقل به صورت تصادفی ساخته شدند. روند تکامل جواب به دست آمده برای مسئله P17 در شکل ۴ می‌آید. روند تکامل و بهبود جواب از هر دو مقدار کمینه و میانگین قابل مشاهده است؛ طوری که شیب حاصله برای کمینه جواب‌ها بیشتر از شیب به دست آمده برای میانگین جواب‌هاست. این مسئله نشان دهنده عملکرد مناسب و هوشمند روش تلفیقی در حل مسائل فوق است.



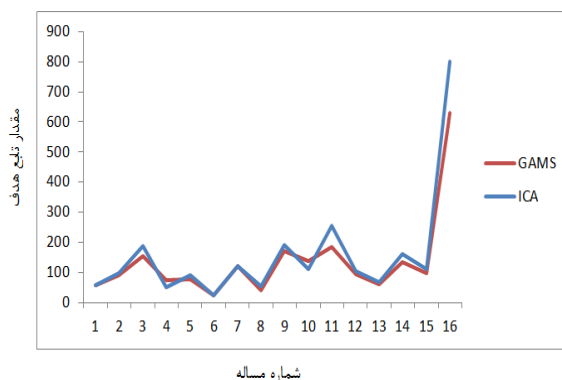
شکل ۳. مقایسه زمان‌های حل برای الگوریتم ICA پیشنهادی و نرم افزار CPLEX



شکل ۴. روند بهبود در حل مسئله توسط الگوریتم ICA پیشنهادی در مسئله P17

سنجش اعتبار مدل پیشنهادی و بررسی توانایی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی به منظور یافتن جواب‌های بهینه در مقایسه با حل مدل توسط روش‌های دقیق است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تعداد تسهیلات بیشترین تأثیر را بر سختی حل این‌گونه مسائل دارد؛ به طوری که نرم افزار CPLEX نمی‌تواند محاسبات خود را برای یافتن جواب بهینه مسائل با بیش از ۱۰ ماشین (تسهیل) در کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه انجام دهد.

الگوریتم فراابتکاری با حل این مسائل در ۴ تا ۹۹ درصد از زمان CPLEX توانایی بالایی از خود نشان داده است. علاوه بر زمان اجرای بسیار پایین الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با مدل تحقیق در عملیات خطی شده، این الگوریتم حتی در برخی موارد توانسته جواب به دست آمده توسط نرم افزار CPLEX را تا ۳۱ درصد بهبود بخشد. در کل، با توجه به نتایج حل شانزده مسئله نمونه، الگوریتم تلفیقی عملکرد بسیار خوبی در مقایسه با نرم افزار CPLEX در حل این دسته از مسائل از خود نشان داده است. شکل‌های ۲ و ۳ جهت مقایسه آسان تر زمان اجرا و کیفیت جواب‌های به دست آمده دو الگوریتم ارائه می‌شود.



شکل ۲. مقایسه جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم ICA پیشنهادی و نرم افزار CPLEX

در شکل ۲ نمودار آبی نشان دهنده جواب‌های به دست آمده با الگوریتم فراابتکاری است و رنگ قرمز برای نمایش دادن جواب‌های به دست آمده از نرم افزار CPLEX. همان‌طور که مشاهده می‌شود جواب‌های به دست آمده با هر دو روش بسیار نزدیک به هم‌اند؛ طوری که در برخی موارد جواب‌های CPLEX تحت الشعاع روش فراابتکاری قرار گرفته و در سایر موارد بالعکس.

در شکل ۳ نیز از رنگ آبی برای روش فراابتکاری و از رنگ قرمز برای نرم افزار CPLEX استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همواره روش فراابتکاری

## نتیجه گیری

مسئله زنجیره تأمین چندسطحی شاخه مهمی از مسائل زنجیره تأمین است که به آن بسیار توجه می شود. یکی از تصمیم گیری های مهم در این دست مسائل مکان یابی مراکز توزیع مواد و محصولات مورد نیاز است؛ در حالی که لازم است ترتیب بازدید این مراکز نیز با توجه به محدودیت های موجود به شکلی بهینه انتخاب شود. پس از تعریف صورت مسئله، مدل تحقیق در عملیات آن ارائه می شود و سپس به منظور سهولت حل مدل ارائه شده با نرم افزار CPLEX عبارات غیر خطی موجود در مدل با بهره گیری از روش های خطی سازی از بین می روند. با وجود متغیرهای گسسته متعدد و طبیعت پیچیده مدل خطی شده، نیاز به طراحی الگوریتمی فراابتکاری جهت حل

کارای مسائل با ابعاد نسبتاً واقعی احساس می شود. در همین زمینه، از تلفیق الگوریتم رقابت استعماری با ابزارهای الگوریتم ژنتیک به منظور استفاده توأمان از قدرت جست و جوی الگوریتم رقابت استعماری و توانایی ابزارهای الگوریتم ژنتیک در بهبود جواب های گسسته بهره گرفته شد. در نهایت، اعتبار مدل تحقیق در عملیات ارائه و روش فراابتکاری مذکور با تولید شانزده مسئله نمونه کوچک و متوسط و سپس حل آن ها به هر دو روش سنجیده شد.

توانایی الگوریتم فراابتکاری در حل مسائل مذکور در ۴ تا ۹۹ درصد زمان حل مورد نیاز توسط نرم افزار CPLEX نشان از کارایی بالای این الگوریتم در حل مسائل واقعی با ابعاد بزرگ دارد.

جدول ۱. مقایسه نتایج برای مسائل با ابعاد کوچک

Test problems	No. of machines	No. of nodes	No. of vehicles	CPLEX		Hybrid ICA		Comparison	
				Objective value	Running time	Objective value	Running time	Running time (%): (meta-CPLEX)/CPLEX	Objective value gap (%): (meta-CPLEX)/CPLEX
p1	۵	۱۰	۳	۵۵,۷۷	۱۰,۹	۵۸,۲۳	۱۰,۸	۹۹	۴,۴
p2	۵	۸	۱	۹۰,۸۳	۱۱,۲	۹۵,۸	۱۰,۷	۹۵	۵,۴
p3	۶	۱۰	۱	۱۵۵,۳۲	۱۲,۴	۱۸۷,۱۹	۱۱,۵	۹۳	۲۰,۵
p4	۷	۱۱	۲	۷۴,۴۵	۲۸,۲	۵۱,۶۵	۲۳,۷	۸۴	-۳۰,۶
p5	۸	۱۵	۳	۷۸,۸۶	۸۵,۳	۹۰,۲۳	۴۰	۴۷	۱۴,۴
p6	۷	۱۵	۴	۲۲,۷۱	۱۰۵,۵	۲۳,۸۷	۵۳,۸	۵۱	۵,۱
p7	۸	۱۱	۲	۱۱۹,۳۴	۲۲۰,۴	۱۲۲,۲۲	۳۷,۴	۱۷	۲,۴
p8	۷	۲۰	۴	۴۰,۳	۷۲۳,۵	۵۲,۷۴	۷۳,۵	۱۰	۳۰,۸
p9	۹	۱۳	۳	۱۷۲,۶۱	۱۰۰۰	۱۸۹,۸۹	۴۰,۵	۴	۱۰,۰
p10	۱۰	۱۴	۳	۱۳۶,۷۵	۱۰۰۰	۱۱۲,۱۳	۴۷,۴	۵	-۱۸,۰
p11	۱۰	۱۸	۴	۱۸۴,۶۲	۱۰۰۰	۲۵۳,۷۵	۸۶,۴	۹	۳۷,۴
p12	۹	۲۰	۳	۹۴,۰۳	۱۰۰۰	۱۰۲,۹۳	۷۱,۴	۷	۹,۴
p13	۱۰	۲۰	۳	۶۱,۵۵	۱۰۰۰	۶۶,۷۶	۹۵,۶	۱۰	۸,۴
p14	۹	۲۰	۴	۱۳۲,۹۱	۱۰۰۰	۱۶۱,۹۸	۱۰۱,۷	۱۰	۲۱,۸
p15	۱۰	۲۰	۴	۹۵,۶۸	۱۰۰۰	۱۱۰,۸۳	۱۱۲,۴	۱۱	۱۵,۸
p16	۲۰	۴۰	۴	۶۳۱,۴۱	۱۰۰۰	۸۰۱,۸۹	۱۸۲,۲	۱۸	۲۶,۹
Min.	۵	۸	۱	۲۲,۷۱	۱۰,۹	۲۳,۸۷	۱۰,۷	۴	۵,۱
Mean	۸,۷۵	۱۶,۵۶	۳	۱۴۱,۹۹	۵۷۴,۸	۱۵۸,۶۹	۶۶,۲	۳۶	۱۱,۷
Max.	۲۰	۴۰	۴	۶۳۱,۴۱	۱۰۰۰	۸۵۸,۸۵	۲۴۱,۶	۹۹	۳۶,۰

جدول ۲. نتایج محاسباتی مسائل با ابعاد بزرگ

Test problems	No. of machines	No. of nodes	No. of vehicles	Hybrid ICA	
				Objective value	Running time
P17	۳۰	۶۰	۵	۲۶۶,۸۴	۴۶۷,۱۲
P18	۴۰	۷۰	۷	۱۹۹,۱۴	۴۸۸,۳۴
P19	۵۰	۸۵	۵	۱۰۶۳,۵۵	۵۳۴,۳۸
Minimum	۳۰	۶۰	۵	۱۹۹,۱۴	۴۶۷,۱۲
Mean	۴۰	۷۱,۶۷	۵,۶۷	۵۰۹,۸۴	۴۹۶,۶۱
Maximum	۵۰	۸۵	۷	۱۰۶۳,۵۵	۵۳۴,۳۸

پژوهش در دست ضروری می‌نماید. گفتنی است در دنیای واقعی با معیارهای بی‌شمار، از جمله کیفیت و ریسک و هزینه‌های جانبی و شاخص‌های سبز و زیست‌محیطی، در مسائل زنجیره تأمین روبه‌رویم که با لحاظ این معیارها در صورت مسئله این تحقیق می‌توان تا حدودی شرایط آن را به دنیای واقعی نزدیک کرد. با وجود عملکرد بسیار خوب الگوریتم تلفیقی طراحی شده در این پژوهش، لازم است عملکرد سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نیز برای حل این دست مسائل در پژوهش‌های آتی محک بخورد.

از طرفی جواب‌های به‌دست‌آمده با الگوریتم تلفیقی در برخی موارد جواب‌های به‌دست‌آمده با نرم‌افزار CPLEX را تا ۳۱ درصد بهبود داده و در برخی دیگر تا ۳۷ درصد از جواب‌های CPLEX فاصله گرفته است. با توجه به زمان حل و بهینگی جواب‌های به‌دست‌آمده با الگوریتم فراابتکاری، می‌توان آن را بسیار کارا ارزیابی کرد. همچنین روند تکامل مشاهده شده برای این الگوریتم در حل مسائل بزرگ با ابعاد نسبتاً واقعی شاهد دیگری بر این ادعاست. در نظر گرفتن خصوصیات انواع گوناگون مسائل زنجیره تأمین، اعم از مسائل مسیریابی و مکان‌یابی، به منظور بسط

## REFERENCES

1. Ting, C. and Chen, C. H. (2013). "A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem." *Int. J. of Production Economics*, 141, 34–44.
2. Xu, Y., Wang, L., and Yang, Y. (2012). "A new variable neighborhood search algorithm for the multi depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows." *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 289–296.
3. Yücenur, G. N. and Demirel, N. Ç. (2011). "A new geometric shape-based genetic clustering algorithm for the multi-depot vehicle routing problem." *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11859–11865.
4. Baldacci, R., Mingozzi, A., and Roberti, R. (2012). "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints." *European J. of Operational Research*, 218(1), 1–6.
5. Garcia-Najera, A. and Bullinaria, J. A. (2011). "An improved multi-objective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with time windows." *Computers & Operations Research*, 38(1), 287–300.
6. Kritikos, M. N. and Ioannou, G. (2013). "The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows." *Int. J. of Production Economics*, 144(1), 68–75.
7. Mirabi, M., FatemiGhomi, S. M. T., and Jolai, F. (2010). "Efficient stochastic hybrid heuristics for the multi-depot vehicle routing problem." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26, 564–569.
8. Ruan, Q., Zhang, Z., Miao, L., and Shen, H. (2011). "A hybrid approach for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints." *Computers & Operations Research*, 40, 1579–1589.
9. Fazel-Zarandi, M. H., Hemmati, A., Davari, S., and Turksen, I. B. (2012). "Capacitated location-routing problem with time windows under uncertainty." *Knowledge-Based Systems*, 3, 480–489.
10. Zhou, G., Min, H., and Gen, M. (2003). "A genetic algorithm approach to the bi-criteria allocation of customers to warehouses." *Int. J. of Production Economics*, 86, 34–45.
11. Escobar, J. W., Linfati, R., and Toth, P. (2012). "A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem." *Computers & Operations Research*, 40, 70–79.
12. Norouzi, N., Razmi, J., and Sadegh-Amalnick, M. (2013). "A vehicle routing problem with minimizing fuel



- consumption and number of vehicles by improved particle swarm optimization.” *J. of Industrial Engineering*, 47(1), 105-112.
13. Razmi, J., Haleh, H., and Ezzati, B. (2011). “Solving the dynamic vehicle routing problem with AntNet algorithm.” *Int. J. Logistics Systems and Management*, 26, 65-70.
14. Razmi, J. and Yosefi, M. (2012). “Introducing a novel mathematical model for school vehicle routing problem and proposing a new algorithm to solve it.” *J. of Industrial Engineering*, 46(2), 185-194.
15. Lucas, C., Nasiri-Gheidari, Z., and Tootoonchian, F. (2010). “Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor.” *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1407–1411.

### واژگان لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Facility Location Problem (FLP)
2. Vehicle Routing Problem (VRP)
3. Simulated Annealing
4. Chance Constrained Programming (CCP)
5. Fuzzy C-Means (FCM)