

# بهینه سازی مسیریابی در برنامه ریزی توزیع با استفاده از

## الگوریتم جستجوی ممنوع

عبدالحمید مدرس، استادیار، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

E-mail: modares@sharif.edu

دریافت: ۱۳۸۷/۰۹/۳۰ - پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۰۸

### چکیده

هدف این تحقیق، توسعه الگوریتم بهینه سازی برای حل مسئله مسیریابی در برنامه ریزی توزیع با کارآیی و انعطاف پذیری زیاد است. در این مقاله ابتدا با بکارگیری مدلی جامع، انواع مسایل موجود در برنامه ریزی توزیع مورد دسته بندی قرار گرفته و سپس مسئله مسیریابی مشخصی که به مسایل واقعی در برنامه ریزی توزیع بسیار نزدیک است، انتخاب شده است. با توجه به نتایج چشمگیر ارایه شده توسط روشهای ابتکاری پیشرفته، روش جستجوی ممنوع برای توسعه الگوریتم مورد نظر انتخاب شده و الگوریتم جدیدی با ویژگی های ابتکاری برای حل این مسئله توسعه یافته است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج این الگوریتم با موفق ترین روشهای ارایه شده در این حوزه مقایسه شده است. نتایج این ارزیابی نشان می دهد که این الگوریتم توانایی لازم را برای ارایه جوابهای قابل مقایسه با بهترین الگوریتم هایی که تاکنون ارایه شده اند، دارد.

واژه های کلیدی: برنامه ریزی توزیع، مسیریابی، روش های ابتکاری، جستجوی ممنوع.

### ۱. مقدمه

کاهش دهد، حل مسئله برنامه ریزی توزیع از نظر کاربردی دارای اهمیت بسیاری است. تا کنون مقالات متعددی در ارتباط با مسئله برنامه ریزی توزیع منتشر شده است، اما اغلب این مقالات بر روی مسایل فرضی با چند محدودیت استاندارد و بدون در نظر گرفتن پیچیدگی های موجود در مسایل عملی متمرکز بوده اند [1]. از طرف دیگر نرم افزارهای متنوعی برای حل مسایل واقعی با توانایی بسیار زیاد در بازار وجود دارند. اما کمتر، محتوی و الگوریتم های بکار رفته در آنها منتشر شده است. هدف این مقاله، توسعه روشی کاربردی برای حل مسایل مسیریابی در برنامه ریزی توزیع با بکارگیری روش های پیشرفته بهینه سازی است. مسئله مسیریابی و مسائل نقلیه<sup>۱</sup> (VRP) مسئله پایه برای برنامه ریزی توزیع است. در مسئله VRP، به فرم ساده، مجموعه ای از وسایل نقلیه جهت انتقال کالا از یک مرکز توزیع، به تعدادی نقاط تقاضای معلوم، در دسترس هستند. هدف مسئله، کمینه سازی هزینه انتقال مواد به نقاط مورد تقاضاست. البته در عمل این مسئله دارای پیچیدگی

با گسترش روزافزون فناوری اطلاعات، امکان ارتباط اطلاعاتی بین بخش های مختلف یک سازمان و همچنین سازمان های مرتبط فراهم شده است. همچنین گسترش زیر ساخت های ارتباطی امکان استفاده همزمان از داده های مورد نیاز در گستره وسیعی از سازمان ها را ایجاد کرده است. از آنجا که بسیاری از تصمیمات و برنامه ریزی های سازمان ها در مدیریت عملیات، بازاریابی، مالی و نیروی انسانی با استفاده از مدل های بهینه سازی صورت می گیرد، این مطلب متضمن بزرگ شدن اندازه مسایل بهینه سازی که در عمل وجود دارند، خواهد بود. آشکار است که در این شرایط لزوم بکارگیری روش های کارآمدی که بتوانند با سرعت زیاد مسایل بسیار بزرگ را با کیفیت قابل قبول حل کنند بیش از پیش احساس می شود. از طرفی با توزیع امکانات تولید در سراسر جهان و توسعه تجارت الکترونیک، روز به روز بر حجم فعالیت های توزیع افزوده می شود. با توجه به حجم هزینه های صرف شده در بخش توزیع و با توجه به این نکته که حل این مسایل می تواند درصد قابل قبولی از هزینه های سازمان ها را

ناوگانی از وسایل نقلیه و از طریق شبکه‌های ارتباطی " تعریف کرد. در این تعریف به صورت مشخص اجزاء برنامه‌ریزی توزیع بیان شده اند. این اجزاء که در حقیقت ارکان اصلی برنامه‌ریزی توزیع هستند، عبارتند از کالا (انسان)، مکان، وسیله نقلیه و شبکه ارتباطی.

همان گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد، هر یک از اجزاء اصلی برنامه‌ریزی توزیع توسط یک پیوند به یکدیگر مربوط می‌شوند. هر پیوند نیز به عنوان یکی از اجزاء مسئله با مشخصات خود مطرح است. پیوند بین کالا و وسیله نقلیه محموله نامیده می‌شود. در حقیقت محموله مجموعه کالاهایی است که توسط وسیله نقلیه مورد نظر منتقل می‌شود. همچنین پیوند بین وسیله نقلیه و شبکه ارتباطی، سفر نامیده می‌شود که شامل مجموعه مسیرهایی است که یک کامیون باید بپیماید. پیوند بین شبکه ارتباطی و امکانات مسیر نامیده می‌شود که شامل مجموعه کمانهایی است که مکانها را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. نهایتاً پیوند بین مکان و کالا که بیانگر مجموعه کالاهایی است که باید بین نقاط مورد نظر جابجا شود، تقاضا یا عرضه نامیده می‌شود. همچنین هر یک از اجزاء نیز احتمالاً دارای مالک هستند که مالک در مورد چگونگی عرضه یا استفاده از جزء مربوطه تصمیم‌گیری می‌کند. به عنوان مثال راننده را می‌توان به عنوان مالک وسیله نقلیه و عرضه کننده یا مشتری را به عنوان مالک کالا در نظر گرفت.

بسیار زیادی در مقایسه با فرم ساده فوق است. در بخش بعد دسته بندی مسایل موجود در این حوزه ارایه خواهد شد. در ادامه این مقاله در بخش بعدی، چارچوبی برای دسته‌بندی مسایل برنامه ریزی توزیع ارایه شده و فرمولاسیون مسئله مورد توجه در این تحقیق ارایه خواهد شد. در بخش ۳ پس از مروری بر رویکرد های موجود برای حل این دسته از مسایل، جزئیات الگوریتم پیشنهادی ارایه می‌شود. بخش ۴ نتایج پیاده سازی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با بهترین الگوریتم های موجود در این حوزه را در بر دارد. در پایان در بخش ۵ جمع بندی و تحقیقات آتی در این حوزه ارایه می‌شود.

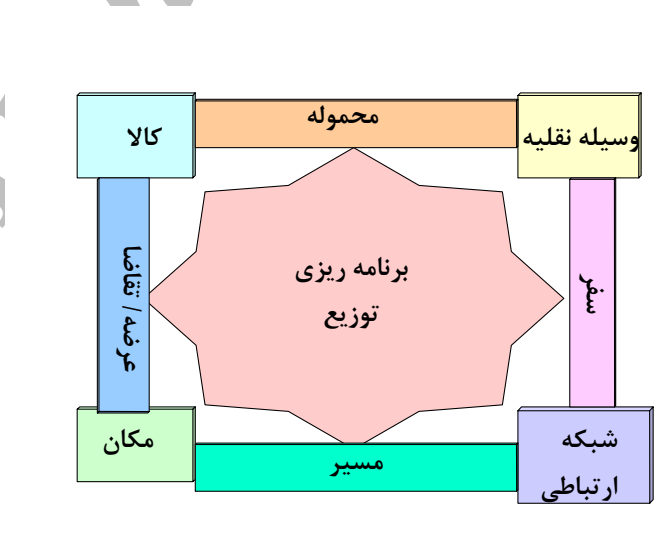
## ۲. دسته بندی مسایل برنامه ریزی توزیع و

### فرمولاسیون مسئله مسیریابی

با توجه به محدوده گسترده و تنوع مسایل در این حوزه، چارچوبی برای دسته‌بندی این مسایل مورد نیاز است [2]. در این بخش بر مبنای ویژگی‌های اجزاء اصلی این مسئله چارچوبی برای دسته‌بندی مسایل این حوزه توسعه می‌یابد و سپس فرمولاسیون مسئله مسیریابی مورد توجه در این تحقیق ارایه می‌شود.

### ۱-۲ دسته بندی مسایل برنامه ریزی توزیع:

به بیان ساده می‌توان برنامه‌ریزی توزیع را "برنامه‌ریزی به منظور انتقال کارآمد کالا یا انسان بین مکان‌های مورد نظر به وسیله



شکل ۱. اجزاء برنامه ریزی توزیع

جدول ۱. ویژگیهای نمونه اجزاء مدل برنامه ریزی توزیع

ردیف	اجزاء/پیوند ها	ویژگی
۱	مکان	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع</li> <li>• تعداد</li> <li>• زمان شروع و خاتمه فعالیت</li> <li>• امکانات بارگیری/تخلیه</li> <li>• زمان انتظار متوسط</li> <li>• زمان استراحت(تعطیلی بین کار)</li> <li>• وابستگی به مکان دیگر</li> <li>• محدوده جغرافیائی</li> </ul>
۲	وسیله نقلیه	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ظرفیت(حجمی/وزنی/تعدادی)</li> <li>• تعداد</li> <li>• نوع مالکیت(متعلق به سازمان/اجاره ای)</li> <li>• نوع وسیله</li> <li>• تجهیزات</li> <li>• تقسیم بندی فیزیکی ظرفیت</li> <li>• وابستگی به وسیله نقلیه دیگر</li> <li>• وابستگی به مکان</li> <li>• هزینه انتقال</li> <li>• راننده:</li> <li>• محل شروع و خاتمه کار راننده</li> <li>• ساعات کارکرد روزانه</li> <li>• ساعات استراحت</li> <li>• نحوه پرداخت</li> </ul>
۳	شبکه ارتباطی	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع راهها</li> <li>• مسیرهای یکطرفه</li> <li>• گردش به چپ</li> <li>• امکان عبور انواع وسایل نقلیه</li> <li>• سرعت در هر راه</li> <li>• هزینه استفاده از راه</li> <li>• تغییر سرعت در طول زمان</li> </ul>
۴	کالا	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع</li> <li>• تنوع</li> <li>• حجم/ وزن/ تعداد</li> <li>• عدم همخوانی با کالای دیگر</li> <li>• نیاز به وسیله نقلیه خاص</li> <li>• اولویت در ارسال</li> </ul>
۵	محموله	<ul style="list-style-type: none"> <li>• محتوی/حجم</li> <li>• نحوه تقسیم</li> <li>• اولویت در ارسال</li> <li>• وابستگی به محموله دیگر</li> </ul>
۶	سفر	<ul style="list-style-type: none"> <li>• تعداد برای هر وسیله</li> <li>• تعداد توقف</li> <li>• محدوده جغرافیائی</li> <li>• وابستگی به سفر دیگر</li> <li>• وجود توقف تعیین شده در سفر</li> </ul>
۷	مسیر	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع راه انتخاب شده</li> <li>• زمان/مسافت</li> </ul>
۸	تقاضا/عروضه	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع(برداشت/تحويل)</li> <li>• مبدا</li> <li>• مقصد</li> <li>• مقدار</li> <li>• قطعیت در حجم</li> <li>• وابستگی به دیگر مشتریان</li> <li>• زمان مورد نظر برای دریافت سفارش</li> <li>• زمان اطلاع از تقاضا</li> <li>• محل تامین</li> <li>• اولویتها برای مشتری</li> <li>• نحوه ارسال تقاضا(یکباره/چند مرحله)</li> </ul>

کمینه‌سازی باشد، مانند کمینه کردن هزینه یا مسیر طی شده توسط کامیونها. همچنین ممکن است تابع هدف، فرم حداقل-حداکثر داشته باشد، مانند توازن بین ساعات کارکرد رانندگان.

البته در عمل تابع هدف فرم ترکیبی از تمام موارد فوق را دارد. شکل ۲ یک مثال واقعی از شبکه تولید و توزیع را نشان می‌دهد. این شبکه دارای چند واحد تولیدی واقع در نقاط مختلف است. همچنین در این شبکه انبار توزیع مرکزی و چندین انبار توزیع محلی به منظور ارایه محصولات به مشتری نهایی وجود دارد. این مجموعه دارای ناوگان اختصاصی خود برای انتقال مواد به واحدهای تولیدی و انتقال محصولات به انبار توزیع و انبارهای محلی و نهایتاً به فروشگاه‌هاست. با توجه به تنوع محصولات و فعالیت‌ها، در برنامه‌ریزی انتقال مواد و محصولات این شبکه وجود کلیه محدودیت‌های یادآوری شده در جدول فوق متصور است.

در این بخش با بکارگیری چارچوبی جامع، انواع مسایل موجود در برنامه‌ریزی توزیع دسته‌بندی شد. هدف این بخش دسته‌بندی نیازها در انواع مسایل مطرح در برنامه‌ریزی توزیع در صنایع مختلف است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، مسئله مسیریابی، عمده‌ترین موضوع در برنامه‌ریزی توزیع است. بنابراین با توجه به ویژگی‌های هر یک از اجزاء برنامه‌ریزی توزیع، مسئله مسیریابی مربوطه دارای پیچیدگی‌ها و محدودیت‌های خاص خود است.

بنابراین، بر اساس این مدل مجموعه محدودیت‌های برنامه‌ریزی توزیع را که بر پایه مشخصات اجزاء و پیوند‌ها شکل می‌گیرند می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد.

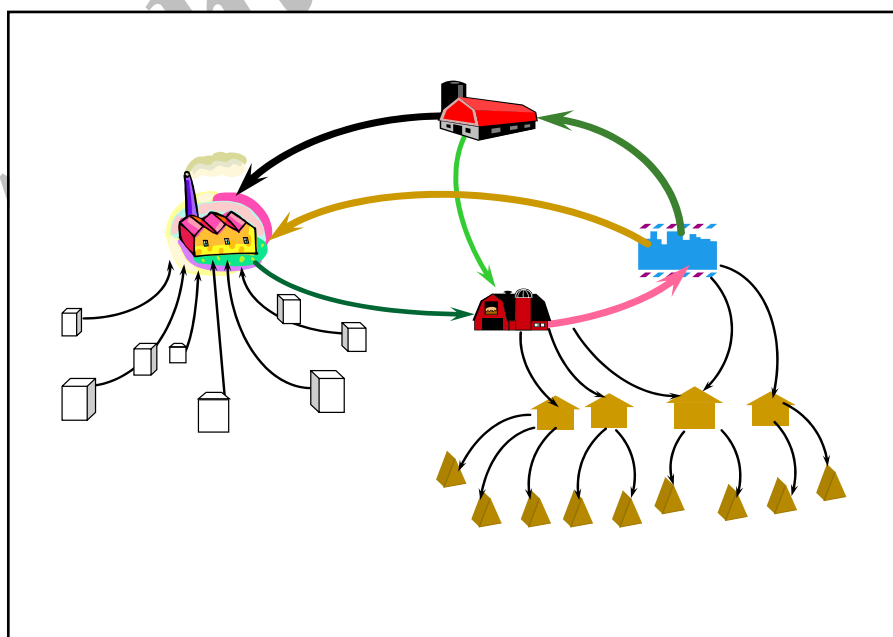
۱- محدودیتهایی که بر مبنای ویژگیهای اجزاء مدل شکل می‌گیرند: مانند محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه.

۲- محدودیتهایی که بر مبنای مشخصات پیوندها تعریف می‌شوند: مانند سازگاری بین کالا و وسیله نقلیه. به عنوان مثال کالاهای منجمد را تنها با وسایل نقلیه دارای یخچال می‌توان حمل کرد.

۳- محدودیتهایی که بر مبنای سازگاری عضوهای یکی از اجزاء یا پیوندها تعریف می‌شوند. به عنوان نمونه محدودیت حمل و نقل همزمان دو نوع کالا مانند کالاهای شیمیایی و خوراکی.

۴- محدودیتهایی که بر پایه نیازهای مالکین اجزاء تعریف می‌شوند، مانند محدودیت در ساعات کار رانندگان.

به منظور ارایه تصویر روشن‌تر از اجزاء این مدل، در جدول ۱ مثالهایی از مشخصات هر یک از اجزاء، ارایه شده است. ویژگی هر یک از اجزاء و پیوندها می‌تواند مبنای تعریف محدودیت برای مسئله باشد. با بکارگیری چارچوب ارایه شده در فوق می‌توان انواع مسایل برنامه‌ریزی توزیع را تعریف کرد. همچنین تابع هدف مسئله نیز می‌تواند بر اساس تابعی از ویژگیهای اجزاء مسئله تعریف شود. ممکن است هدف، بیشینه‌سازی باشد، مانند بیشینه کردن استفاده از ظرفیت و یا ممکن است هدف



شکل ۲. نمونه‌ای از یک شبکه تولید و توزیع

## ۲-۲ فرمولاسیون مسئله

در بخش قبل، برای تشریح گستردگی مسایل مسیر یابی موجود در برنامه ریزی توزیع، با استفاده از مدلی مفهومی انواع مسایل مطرح در این حوزه ارائه شد. آشکار است که توسعه الگوریتم باید برای مسئله مشخص و کاملاً تعریف شده ای صورت پذیرد. در این بخش با ارائه فرمولاسیون مسئله انتخاب شده در این تحقیق، مشخصات مسئله مسیر یابی به دقت ترسیم می شود. مسئله مسیر یابی با محدودیت ها و پیچیدگی های مختلفی توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله مسیریابی در ساده ترین شکل خود با عنوان VRP شناخته می شود و با افزودن محدودیت های جدید مسئله با عنوان متفاوتی متمایز می شود. به عنوان مثال، مسئله مسیریابی با محدودیت زمان سرویس (VRPTW)<sup>۲</sup> مسئله ای است که در آن برای ارائه سرویس به هر یک از مشتریان محدوده زمانی مشخصی در نظر گرفته می شود. همچنین مسئله مسیریابی چند دوره ای (MPVRP)<sup>۳</sup> مسئله ای است که در آن برای یک دوره زمانی مشخص مثلاً یک هفته برنامه مسیر یابی تعیین می شود.

هدف این مقاله توسعه الگوریتمی است که بتواند مسایل مسیریابی را در حوزه برنامه ریزی توزیع حل کند. به این منظور در مدلسازی و فرمولاسیون سعی شده است بخشی از شرایطی که در عمل اتفاق می افتند، در نظر گرفته شوند. لازم به یادآوری است که با توجه به تنوع مسایل و انواع محدودیتهای موجود که در بخش قبل به تفصیل بیان شد، در نظر گرفتن تمامی شرایط و ارائه برای حل آن بسیار دشوار است. گرچه در فرآیند طراحی الگوریتم برای حل مسئله انعطاف پذیری توجه خاص معطوف شده است، لیکن در این تحقیق به مسئله ای که در زیر فرمولاسیون آن ارائه می شود، پرداخته شده است.

فرض کنید تعداد مشخصی کامیون با ظرفیت  $Q$  که به آنها مجموعه  $V$  اطلاق می شود، به منظور انتقال کالا از یک انبار مرکزی به مجموعه مشتریان  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  که توسط یک گراف کامل با مجموعه کمان  $A$  به یکدیگر مرتبط هستند، در اختیار باشد. برای هر کمان  $(i, j) \in A$  مسافت  $d_{ij}$  و زمان سفر  $t_{ij}$  تعریف شده است.

هر مشتری  $i \in N$  دارای تقاضای مشخص  $q_i$  و زمان سرویس  $s_i$  است که بیان کننده مدت زمانی است که برای تحویل کالا در محل مشتری مورد نیاز است. هر مشتری  $i$  دارای یک محدوده زمانی قابل قبول برای تحویل کالا<sup>۴</sup>  $[a_i, b_i]$  است.  $a_i$  زودترین زمان و  $b_i$  دیرترین زمان قابل قبول برای تحویل کالا است. در هر روز هر کامیون می تواند چند سفر را که از انبار مرکزی شروع شده و چند مشتری را در برمی گیرد، انجام دهد.

مجموعه این سفرها توسط مجموعه  $K$  در بر گرفته می شود. تعداد این سفرها  $(|K|)$  باید به اندازه ای بزرگ در نظر گرفته شود که حداکثر سفرهای ممکن برای ناوگان را در برگرد. طبیعتاً بعضی از این سفرها می تواند خالی باشد.

به این ترتیب تعداد سفرهای کامیونها در عمل می تواند متفاوت انتخاب شود. برای فرمولاسیون فرض می شود که سفرها برای یک کامیون به ترتیب صعودی انجام می شوند، به این معنی که یک کامیون سفر  $l$  را بعد از  $k$  تنها در صورتی که  $l > k$  است انجام می دهد.

انبار مرکزی، بسته به اینکه در یک سفر نقطه شروع یا پایان باشد با شماره صفر یا  $n+1$  مشخص می شود. برای سهولت در فرمولاسیون دو مجموعه  $N^+ = N \cup \{0, n+1\}$  و  $A^+ = A \cup \{0, n+1\}$  که یک کمان مجازی با فاصله و زمان سفر صفر است، تعریف می شود. برای انبار مرکزی نیز زمان سرویس یعنی زمان بارگیری برای هر کامیون با  $\sigma^k$  نشان داده شده است.

متغیر  $x_{ij}^k$  که یک متغیر منطقی است، در صورتی که مقدار یک به خود گیرد، به معنای وجود کمان  $(i, j)$  در سفر  $k$  است. همچنین متغیر منطقی  $y_i^k$  در صورتی که مقدار یک داشته باشد به معنی قرار داشتن مشتری  $i$  در سفر  $k$  است. همچنین برای هر زوج سفر  $k$  و  $l$  متغیر منطقی  $z_{kl}$  تعریف شده است که نشان دهنده این نکته است که سفر  $l$  بلافاصله پس از سفر  $k$  انجام می شود. همچنین برای هر سفر  $k \in K$  و هر مشتری  $i \in N$  متغیر  $t_i^k$  نشان دهنده زمان شروع سرویس برای مشتری  $i$  است، در صورتی که این مشتری در سفر  $k$  سرویس داده شود. با در نظر گرفتن  $M$  به عنوان یک عدد بسیار بزرگ می توان فرمولاسیون مسئله را به فرم زیر بیان کرد.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{(j,i) \in A} d_{ij} x_{ij}^k \quad ( )$$

Subject to:

$$\sum_{j \in N^+} x_{ij}^k = y_i^k, i \in N; k \in K \quad ( )$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, i \in N \quad ( )$$

$$\sum_{i \in N^+} x_{ih}^k - \sum_{j \in N} x_{hj}^k = 0, h \in N; k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N^+} x_{0i}^k = 1, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N^+} x_{i(n+1)}^k = 1, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} q_i y_i \leq Q, k \in K \quad (7)$$

$$t_i^k + s_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^k) \leq t_j^k, (i, j) \in A^+; k \in K \quad (8)$$

$$a_i y_i^k \leq t_i^k \leq b_i y_i^k, i \in N; k \in K \quad ( )$$

$$t_0^k \geq \delta^k, k \in K \quad (10)$$

$$\delta^k = \beta \sum_{i \in N} s_i y_i^k, k \in K \quad ( )$$

$$t_0^l + M(1 - z_{kl}) \geq t_{n+1}^k + \delta_l, k, l \in K; k < l \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K, l > k} z_{kl} \geq |K| - |V|, K, l \in K \quad (13)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, i, j \in A; k \in K \quad (14)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\}, i \in N; k \in K \quad (15)$$

$$z_{kl} \in \{0, 1\}, k, l \in K; k < l \quad (16)$$

$$t_i^k \geq 0, i \in N; k \in K \quad (17)$$

می‌توان به چهار رویکرد کلی، ساخت<sup>۵</sup>، بهبود<sup>۶</sup>، تکاملی<sup>۷</sup> و یادگیری<sup>۸</sup> تقسیم‌بندی کرد [3]. با ترکیب مناسب این رویکردها نیز می‌توان به الگوریتمهای کارآمدی دست یافت [4]. در این بخش ابتدا چارچوب هر یک از رویکردهای بکار گرفته شده برای حل این دسته از مسایل به اختصار مرور و سپس الگوریتم پیشنهادی به تفصیل ارائه می‌شود.

**رویکرد ساخت:** در الگوریتمهایی که در این دسته قرار دارند، در هر مرحله یک نقطه (گره) بر اساس منطق موجود در الگوریتم انتخاب شده و در محل مناسب آن در جواب نهایی قرار داده می‌شود. به این ترتیب جواب مسئله به تدریج در طی چند مرحله بنا می‌شود. الگوریتمهای خانواده Saving و Sweep از مشهورترین روشهای توسعه یافته در این دسته هستند. به دلیل نامطلوب بودن کیفیت جوابها در الگوریتمهایی که بر مبنای این رویکرد توسعه یافته‌اند، در شرایط فعلی از این دسته الگوریتمها بیشتر برای ایجاد جواب اولیه برای سایر الگوریتمها استفاده می‌شود [5].

در مدل فوق توسط معادلات ۲ و ۳ ارایه سرویس به هر مشتری یک و تنها یک بار تضمین می‌شود و معادلات ۴ و ۵ و ۶ سفرها را تعریف می‌کنند و محدودیت ظرفیت کامیونها توسط معادله ۷ بیان می‌شود. معادلات ۸ تا ۱۱ امکان‌پذیری برنامه زمانی ارایه سرویس را بیان می‌کند. معادله ۸ ترتیب مشتریان  $i$  و  $j$  را تضمین می‌کند و معادله ۹ محدوده زمانی ارایه سرویس برای مشتریان را بیان می‌کند. معادله ۱۰ زمان شروع سفر را برای سفر  $K$  با توجه به زمان بارگیری تعیین می‌کند. معادله ۱۱ زمان بارگیری هر کامیون به صورت مجموع زمان سرویس به مشتریان با ضریب  $\beta$  بیان می‌کند. این مطلب بیانگر این نکته است که زمان بارگیری تابعی از مجموع زمانهای تخلیه برای سفر مربوطه است. معادلات ۱۲ و ۱۳ مناسب بودن ترتیب سفرها در روز را بیان می‌کنند. معادلات ۱۴ الی ۱۷ نیز بیانگر متغیرهای مسئله هستند.

### ۳. الگوریتم بهینه‌سازی

روشهای مختلفی برای حل این دسته از مسایل توسعه داده شده است. رویکردهای بکار برده شده برای حل این دسته از مسایل را

عصبی برای حل مسایل بهینه سازی دارد [17]. در این دسته از الگوریتمها باید ساختار شبکه و فرآیند یادگیری بر اساس ویژگیها و مشخصات مسئله بهینه سازی ایجاد شود. بنابراین کاربرد این روشها برای هر مسئله خاص نیازمند تلاش و ابتکار ویژه ای است. با وجود نتایج مناسبی که توسط این روشها ارائه شده است [18 و 19]، بکارگیری آنها برای حل مسایل پیچیده واقعی نیازمند ارتقاء و بهبود کیفیت است.

### ۱-۳ الگوریتم پیشنهادی

همان گونه که توسط Cordeau یادآوری شده است: "الگوریتمهای موجود تا حد قابل قبولی دقیق و سریع هستند، آنچه اکنون مورد نیاز است سادگی و انعطاف پذیری است" [3]. تجربه ما در این تحقیق این ادعا را تأیید می کند. برای پاسخگویی به نیازهای متغیر و متنوعی که در مسایل عملی وجود دارد، الگوریتم بهینه سازی باید از انعطاف قابل توجهی برخوردار باشد. بسیاری از الگوریتمهای توسعه یافته توسط پژوهشگران برای مسئله ای خاص طراحی شده اند.

همان گونه که در بخش قبل یادآوری شد، در میان روشهای پیشرفته ابتکاری برای حل مسایل بهینه سازی، روش های بازپخت شبیه سازی شده، جستجوی ممنوع و الگوریتم ژنتیک عملکرد بسیار مناسبی را از خود نشان داده اند. در این میان جستجوی ممنوع دارای ویژگیهایی است که آنرا از دو رویکرد دیگر متمایز کرده و کاندیدای مناسبی برای حل مسایل پیچیده می کند. سادگی، انعطاف پذیری و ثبات و کیفیت جوابها ویژگیهایی است که توسط پژوهشگران بسیاری به عنوان ویژگیهای شاخص جستجوی ممنوع معرفی شده است. بر این اساس در طراحی الگوریتم پیشنهادی از چارچوب ارائه شده در جستجوی ممنوع بهره گرفته شده است.

به صورت کلی می توان گفت که در چارچوب ارائه شده در جستجوی ممنوع، به منظور جلوگیری از توقف فرآیند جستجو در نقطه بهینه محلی، امکان پذیرش جوابهای ضعیف تر از بهترین جواب به دست آمده در الگوریتم پیش بینی شده است. برای جلوگیری از قرار گرفتن در سیکل تکرار یافتن جوابهای مشابه، آخرین جوابهای به دست آمده در برداری با عنوان فهرست ممنوع ذخیره شده و انتخاب آنها توسط الگوریتم برای مدتی ممنوع خواهد بود.

**رویکرد بهبود:** در این رویکرد، الگوریتمها با یک جواب اولیه شروع شده و توسط فرآیندی که منطق الگوریتم تعیین می کند جستجو در فضای امکان پذیر برای یافتن جواب بهتر دنبال می شود. جستجوی محلی<sup>۹</sup>، قدیمی ترین روش در این دسته از الگوریتمهاست. در الگوریتمهای پیشرفته، برای حل مشکل توقف الگوریتم پس از دستیابی به یک جواب بهینه محلی، مکانیزم ویژه ای برای خروج از نقطه بهینه محلی و دستیابی به جواب با کیفیت بهتر پیش بینی شده است. الگوریتمهای بازپخت شبیه سازی شده<sup>۱۰</sup> [6 و 7] و جستجوی ممنوع [8 و 9 و 10] از شناخته شده ترین روشها در این دسته هستند. زیاد بودن انعطاف برای حل مسایل مختلف بهینه سازی و عملکرد بسیار درخشان، از جمله ویژگیهای این دسته از الگوریتمهاست. به دلیل این ویژگیها، این دسته از الگوریتمها کاندیدای مناسبی برای بکارگیری در سیستمهای بهینه سازی پیشرفته هستند. لازم به یادآوری است که الگوریتم بازپخت شبیه سازی در مقایسه با جستجوی ممنوع دارای پارامترهای بیشتری بوده و برای دستیابی به جوابهای با کیفیت مطلوب نیازمند تنظیم از سوی کاربر است.

**رویکرد تکاملی:** ایده اصلی در این دسته از الگوریتمها ترکیب مناسب اعضاء انتخاب شده از مجموعه جوابهای تولید شده در هر مرحله است. الگوریتم ژنتیک<sup>۱۱</sup> [11 و 12 و 13] و الگوریتم Memetic<sup>12</sup> [14 و 15] از مهم ترین الگوریتمهای توسعه یافته در این دسته هستند. پایه الگوریتم ژنتیک اصل تنازع بقاء است. بر اساس این اصل احتمال بقاء برای موجوداتی که بیشترین تطابق با محیط را دارند بسیار زیاد است. در این روش در هر مرحله، مجموعه ای از جوابها که در اصطلاح به آنها نسل گفته می شود، تولید می شوند. برای تولید نسل بعد جوابهای با کیفیت مطلوب از نسل فعلی انتخاب شده و با ترکیب آنها با یکدیگر جوابهای جدیدی تولید می شوند. مهم ترین نکته در بکارگیری این روشها برای حل مسایل بهینه سازی، مدلسازی مسئله مورد نظر برای بکارگیری این روش است. با تغییر مسئله و افزایش محدودیتهای ممکن است به مدلسازی متفاوتی برای بکارگیری این روش نیاز باشد. این نکته یک عامل محدود کننده برای بکارگیری این روش برای حل مسایل مختلف است.

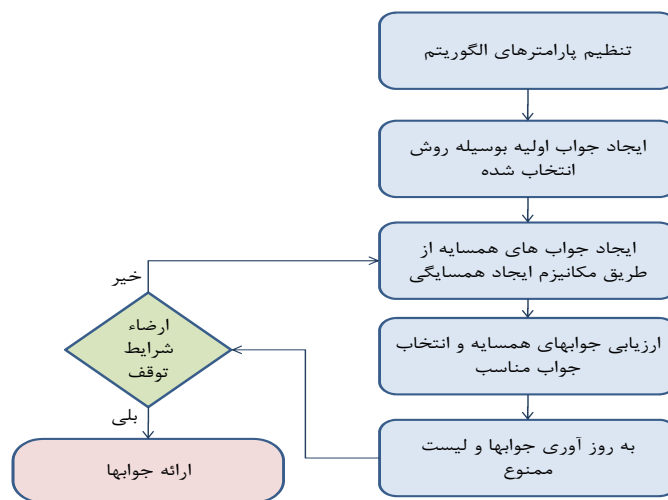
**رویکرد یادگیری:** شبکه های عصبی<sup>۱۳</sup> و بهینه سازی مورچگان<sup>۱۴</sup> [16] از جمله روشهای شاخص در این دسته هستند. نگارنده، چندین تجربه در طراحی و بکارگیری مدل‌های بر پایه شبکه های

وارد شده و به ازای آن جوابی از ابتدای فهرست خارج می‌شود. [4] Umifled TS که توسط Cordeau و همکاران توسعه یافته است [20] و روش ارائه شده توسط Taillard و همکاران [21] از جمله پیشرفته‌ترین الگوریتمهای طراحی شده بر مبنای منطق جستجوی ممنوع است. قابل ذکر است که تفاوت در الگوریتمهای ارائه شده عمدتاً در روشهای ایجاد جواب اولیه، سازوکار ایجاد جواب همسایه و بکارگیری روش های خاص تشدید و تنوع است. برای حل مسایل واقعی توسط الگوریتم به دلیل بالا بودن تعداد محدودیتهای، امکان در نظر گرفتن تمامی محدودیتهای به صورت سخت<sup>۱۶</sup> وجود ندارد و بعضی از آنها را باید به صورت محدودیتهای نرم<sup>۱۷</sup> در نظر گرفت. برای ارضاء محدودیتهای نرم، عبارتی به عنوان جریمه در تابع هدف اضافه می‌شود. الگوریتم در فرآیند حل مسئله، از طریق کمینه سازی تابع هدف، ضمن به دست آوردن حداقل هزینه، به سمت ارضاء محدودیت های نرم نیز حرکت می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی، تنها محدودیتهای بنیادی چون ظرفیت کامیونها و یا بعضی از بازه‌های زمانی مورد نظر برای سرویس مشتریان به عنوان محدودیتهای سخت در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی طراحی شده، ضمن در نظر گرفتن نکات مهم در تمامی الگوریتمهای توسعه یافته توسط پژوهشگران، ویژگیهای متفاوت و منحصر به فردی نیز دارد. در ادامه بر اساس فلوچارت ارائه شده در شکل ۳ جزئیات الگوریتم طراحی شده ارائه می‌شود.

جواب انتخاب شده توسط الگوریتم به انتهای فهرست ممنوع به این ترتیب طول بردار، تعیین کننده تعداد تکرارهایی است که یک جواب در فهرست ممنوع قرار دارد. در این بخش الگوریتم پیشنهادی در قالب چارچوب عمومی رویکرد جستجوی ممنوع ارائه می‌شود. اصولاً الگوریتمهای ارائه شده توسط پژوهشگران، بر مبنای چارچوب عمومی رویکرد جستجوی ممنوع بوده و عمدتاً در اجزاء و روش پیاده‌سازی الگوریتم دارای نوآوری و ویژگیهای خاص خود هستند.

شکل ۳ چارچوب عمومی رویکرد جستجوی ممنوع را به تصویر کشیده است. در ادامه هر یک از مراحل که به صورت ویژه برای مسئله مسیریابی خاص انتخاب شده در این تحقیق طراحی شده است و نحوه پیاده سازی آنها به تفصیل بیان می‌شود.

منطق عمومی جستجوی ممنوع توسط پژوهشگران با بکارگیری روشهای ابداعی تکامل یافته و عملکرد آن به نحو چشمگیری بهبود یافته است [6]. بکارگیری روشهای پیشرفته برای ایجاد جوابهای همسایه، بکارگیری روشهای مختلف تشدید و تنوع<sup>۱۵</sup> در هدایت فرآیند جستجو، ترکیب با دیگر روشهای بهینه‌سازی و پیاده‌سازی الگوریتم به صورت موازی، از جمله مهم ترین رویکردهایی است که به منظور ارتقاء عملکرد روش جستجوی ممنوع مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است. الگوریتمهای Granular TS که توسط Toth و همکاران ارائه شده است.



شکل ۳. چارچوب عمومی رویکرد جستجوی ممنوع برای حل مسئله بهینه سازی



### ۳-۱-۱ ایجاد جواب اولیه

Soloman چندین روش ابتکاری برای حل مسایل VRP ارائه کرده است [22]. این روشها کاندیداهای مناسبی برای ایجاد جواب اولیه هستند و در بیشتر الگوریتمها یکی از این روشها مورد استفاده قرار گرفته است. روش II ارائه شده توسط Soloman که بر مبنای منطق Cheapest Insertion طراحی شده است، الگوریتم مناسبی است که توسط بسیاری از پژوهشگران برای ایجاد جواب اولیه به کار گرفته شده است. در این تحقیق بر مبنای منطق این الگوریتم، روشی برای ایجاد جواب برای مسئله مسیریابی خاص در نظر گرفته شده در این تحقیق توسعه داده شده است.

الگوریتم با ایجاد یک مسیر با قرار دادن یک مشتری (مقصد) در آن شروع بکار می کند. در هر مرحله مشتریان تخصیص نیافته تا آنجا که محدودیت ظرفیت یا سایر محدودیتهای سخت مسئله اجازه می دهد به مسیر وارد می شوند. برای وارد کردن هر مشتری به مسیر، هزینه کل بر اساس تابع هدف مسئله مورد ارزیابی قرار می گیرد. در روش پیشنهادی، تمامی موارد منعکس شده در تابع هدف که شامل محدودیت های نرم نیز می شود، در محاسبه هزینه در نظر گرفته می شوند. این روند تا زمانی که مشتری سرویس داده نشده ای باقی است ادامه می یابد.

### ۳-۱-۲ ساز و کار ایجاد همسایگی

مشهورترین و ساده ترین روشهایی که برای ایجاد همسایگی در روشهای پیشرفته ابتکاری استفاده می شوند عبارتند از جابجایی<sup>۱۸</sup>، تعویض<sup>۱۹</sup>. همچنین روشهای 2-opt\* و CROSS از جمله روشهایی هستند که اخیراً نتایج خوبی را ارائه کرده اند [6]. در ساز و کار جابجائی، یک مشتری از محل فعلی خود به محل دیگری انتقال می یابد. در حالی که در تعویض محل دو مشتری با یکدیگر تعویض می شود. اخیراً اپراتورهای متنوعی برای ایجاد همسایگی توسط پژوهشگران ارائه شده است [24 و 23 و 7]. در الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از جابجائی، تعویض و 2-opt\* برای ایجاد همسایگی در فرآیند جستجوی بکار گرفته شده است.

در آزمایشهای انجام شده، از اپراتورهای CROSS و 3-Opt نیز استفاده شد، اما کاربرد آنها ضمن افزایش زمان محاسبات، تأثیر معنی داری بر روی کیفیت جوابها نداشت. لازم به توضیح است که با بکارگیری اپراتور جابجایی امکان جابجایی محل قرارگیری یک مشتری در یک مسیر یا قرار گرفتن مشتری در محلی در مسیر دیگر وجود دارد. همچنین با اپراتور تعویض امکان تعویض دو مشتری در یک یا دو مسیر ایجاد می شود.

اپراتورهای تعریف شده برای ایجاد جواب همسایه در بخش قبل یعنی جابجائی، تعویض و 2-opt\* به صورت تصادفی انتخاب می شوند. احتمال انتخاب اپراتورهای جابجایی و تعویض برابر و احتمال انتخاب اپراتور 2-opt\* پنج برابر کمتر از آنها است. دلیل انتخاب این امر این نکته است که 2-opt\* با ایجاد تغییرات زیاد در جواب، برای گسترش فضای جستجو مناسب است. اما بکارگیری مداوم آن، فرصت بهره گیری کامل از فضای ایجاد شده را نخواهد داد. این امر منجر به افزایش زمان و تنزل کیفیت جواب ها می شود. بنابراین، عمده همسایگی توسط دو اپراتور جابجایی و تغییر ایجاد می شود و اپراتور 2-opt\* به عنوان مکمل این دو اپراتور مورد استفاده قرار می گیرد. این ترکیب منجر به ایجاد یک سازوکار متنوع در الگوریتم می شود.

### ۳-۱-۳ ارزیابی جواب های همسایه و انتخاب جواب مناسب

در ساختار داده های بکار گرفته شده برای پیاده سازی الگوریتم، هزینه های مرتبط با هر یک از مشتریان، هر یک از سفرهای هر کامیون و هزینه های مرتبط با کل سفرهای هر کامیون به صورت جداگانه نگهداری می شوند. انتخاب مشتریان برای تعویض و جابجایی بر اساس هزینه هر یک در جواب صورت می گیرد. به عبارت دیگر احتمال انتخاب مسیرها و مشتریان برای تعویض، متناسب با هزینه های مرتبط با آنها در جواب افزایش می یابد. با بکارگیری این روش ابتکاری میزان کیفیت پاسخها و سرعت حل مسئله به شدت افزایش می یابد. این انتخاب به شکل ساده و موثر استراتژی لیست کاندیدا<sup>۲۰</sup> را که توسط دیگر محققین به فرمهای دیگری انجام شده، پیاده سازی می کند [23]. این استراتژی در حقیقت یک ساز و کار تشدید است که به صورت ابتکاری در این الگوریتم بکار گرفته شده است. در صورتی که

۲- الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده است که انعطاف لازم برای بکارگیری آن در مسایل پیچیده‌تر وجود داشته باشد. در این راستا از بکارگیری سازوکارهایی که بر مبنای ویژگی‌های خاص مسئله استوار شده اند پرهیز شده است. به عنوان مثال به راحتی می‌توان با تنظیم پارامترهای ورودی، الگوریتم را برای مسئله VRP معمولی بکار گرفت. همچنین با تغییرات جزئی می‌توان الگوریتم را برای مسئله با چند مرکز توزیع مورد استفاده قرار داد. لازم به یادآوری است که با تعریف مفهوم محدودیت‌های نرم در این الگوریتم می‌توان بسیاری از محدودیتها را به راحتی تعریف و به مسئله اضافه کرد. قابل یادآوری است که الگوریتم، قابل تعمیم به مسایل مسیریابی که دارای ساختار متفاوتی هستند (مانند MPVRP) نیست.

۳- این الگوریتم هیچگونه محدودیتی در اندازه مسئله که توسط تعداد نقاط مقصد و کامیونها تعیین می‌شود، ندارد. بنابراین به راحتی می‌توان الگوریتم را برای حل مسایل واقعی که عموماً تعداد نقاط مقصد آنها بالاتر از ۱۰۰۰ است، استفاده کرد.

۴- علاوه بر طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم برای یک مسئله خاص و پیچیده، در معماری الگوریتم نیز ویژگی‌های منحصر به فردی وجود دارد که مشخصاً در این تحقیق توسعه یافته است. از جمله این موارد می‌توان به بکارگیری محدودیت نرم برای بعضی از محدودیت‌ها، استفاده از اپراتورهای ترکیبی جابجایی، تعویض و \*2-OPT به صورت ابتکاری و به عنوان مکمل یکدیگر، ایجاد سازوکار تنوع در فرآیند ایجاد همسایگی و بکارگیری مکانیزم تشدید ابتکاری در الگوریتم اشاره کرد.

۵- همان گونه که در ادامه خواهد آمد، در آزمایشی که با استفاده از داده‌های استاندارد انجام شده است، این الگوریتم امکان ارائه جوابهای قابل مقایسه با بهترین الگوریتم‌های موجود را داراست. قابل ذکر است که برای مقایسه، الگوریتم پیشنهادی را برای مسئله VRP معمولی بکار گرفته و با الگوریتم‌هایی که صرفاً قادر به حل این مسئله ساده هستند مورد مقایسه قرار داده ایم. با توجه به این نکته که الگوریتم پیشنهادی قادر [20] TS و همکاران [7] به حل مسئله پیچیده‌تری است، این مطلب نشانگر قابلیت زیاد الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های رقیب است.

جواب همسایه تولید شده در لیست ممنوع نباشد، در مجموعه جوابهای همسایه ایجاد شده در تکرار مورد نظر قرار می‌گیرد و بهترین جواب همسایه در میان جواب‌های همسایه به عنوان جواب فعلی انتخاب می‌شود.

### ۳-۱-۴ بهنگام سازی جواب‌ها و لیست ممنوع:

هنگامی که مشتری  $i$  در مسیر  $k$  جابجا یا تعویض شد، بکارگیری آن برای چند تکرار بعد ممنوع می‌شود و مقادیر  $(i, k)$  در فهرست ممنوع نگهداری می‌شوند. همچنین در صورتی که جواب به دست آمده از یک جواب همسایه از بهترین جواب به دست آمده، بهتر باشد، امکان پذیرش آن حتی در صورت وجود در فهرست ممنوع وجود دارد. این امر باعث بهره‌گیری از فهرست ممنوع در راستای هدف تعریف شده خود و جلوگیری از دست رفتن جوابهای با کیفیت می‌شود. بکارگیری فهرست ممنوع با طول متغیر در فرآیند حل مسئله، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است [21]. در الگوریتم پیشنهادی طول لیست ممنوع بین  $\theta_{min}$  و  $\theta_{max}$  در طول حل مسئله به صورت تصادفی متغیر است [23]. بر اساس نتایج آزمایشهای مقادیر  $\theta_{min}$  و  $\theta_{max}$  به ترتیب صفر و پنج در نظر گرفته شد.

### ۳-۱-۵ کنترل شرایط توقف الگوریتم

در صورتی که تعداد تکرار از حداکثر تکرار تعیین شده که تابعی از اندازه مسئله است و یا زمان حل مسئله از زمان تنظیم شده توسط کاربر کمتر باشد، الگوریتم به کار خود ادامه می‌دهد و در غیر این صورت متوقف می‌شود.

### ۳-۲ ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی:

الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های موجود دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- این الگوریتم برای مسئله پیچیده‌ای که مشابهت بسیار زیادی با مسایل واقعی در بخش توزیع دارد، طراحی و پیاده‌سازی شده است. تاکنون روش جستجوی ممنوع برای حل چندین نوع از مسایل مسیریابی مورد استفاده قرار گرفته است، اما این رویکرد تاکنون برای مسئله‌ای با گرفته مشخصات یادآوری شده در فرمولاسیون مسئله بکار نشده است.

#### ۴. نتایج پیاده سازی الگوریتم

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم طراحی شده، آزمایش جامعی برای بکارگیری داده های استاندارد موجود در ادبیات [23.24.25] طراحی شد. در این ارزیابی ۱۴ مسئله استاندارد طراحی شده توسط Christofides, Mingozi and Toth (CMT) که توسط بسیاری از پژوهشگران به عنوان بستر ارزیابی انتخاب شده است، مورد استفاده قرار گرفت [25].

به دلیل کاربرد گسترده، این دسته از مسایل در حال حاضر به عنوان مسایل استاندارد VRP شناخته می شوند و از آنها به عنوان مرجع ارزیابی و مقایسه الگوریتم ها استفاده می شود. اکثر الگوریتم هایی که برای VRP توسعه می یابند برای ارزیابی، با این مسایل مورد آزمایش قرار می گیرند. بنابراین با مراجعه به مقالات موجود می توان پاسخ الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با پاسخ های رایج شده توسط الگوریتم هایی کارآمد که توسط سایر پژوهشگران توسعه یافته است، مورد ارزیابی قرار داد. اندازه این مسایل بین ۵۰ تا ۹۹ مشتری است. مسایل CMT شامل دو نوع مسئله است. مسایلی که در دسته C قرار دارند دارای محدودیت ظرفیت و مسایل دسته D دارای محدودیت طول مسیر هستند.

خوانندگان می توانند برای اطلاع بیشتر از ویژگی های مسایل انتخاب شده و دسترسی کامل به داده های مربوطه به سایت <sup>21</sup> OR-Library مراجعه کنند. هدف از این آزمایش مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم های پیشرفته در این زمینه است.

در این آزمایش الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های شناخته شده در ادبیات مقایسه شده است. الگوریتم هایی که برای مقایسه انتخاب شدند عبارتند از الگوریتم Taburoute [26]، الگوریتم Berger و همکاران [27]، الگوریتم جستجوی ممنوع Taillard [28]، الگوریتم Granular TS [23] و Unified در تحقیقی به معرفی و مقایسه این الگوریتم ها پرداخته اند.

به منظور بکارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله استاندارد VRP، لازم است بخشی از پارامترهای الگوریتم را برای این منظور تنظیم کرد.

به عنوان مثال باید تعداد سفرهای هر کامیون در روز را معادل یک، زمان بارگیری و سرویس را صفر و مشتریان را بدون محدودیت زمانی سرویس در نظر گرفت. جدول ۲ نتایج الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با سایر الگوریتم ها ارائه می کند. برای حل این مسایل داده های مسئله از سایت OR-Library دریافت شده و الگوریتم پیشنهادی که با زبان برنامه نویسی VC++ پیاده سازی شده است بر روی داده های مسئله اجرا شده است. با توجه به وجود مکانیزی تصادفی در انتخاب جوابهای همسایه در الگوریتم، پاسخ رایج شده برای هر اجرا توسط الگوریتم یکسان نیست.

نتایج رایج شده برای الگوریتم پیشنهادی در این جدول بهترین نتایج به دست آمده از پنج مرتبه اجرای متوالی الگوریتم است و نتایج سایر الگوریتم ها مستقیماً از مقالات مربوطه استخراج شده اند. زمان اجرای رایج شده در جدول ۲ برای الگوریتم پیشنهادی متوسط زمان برای ۵ مرتبه اجرای متوالی الگوریتم است.

همان گونه که در جدول نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی، جوابهای نزدیکی در مقایسه با بهترین الگوریتم های موجود ارائه می دهد. متوسط فاصله جوابهای حاصل شده توسط الگوریتم ۰/۵۵ درصد است.

در سه مورد، الگوریتم پیشنهادی بهترین جواب شناخته شده را ارائه می دهد. قابل یادآوری است که الگوریتم های انتخاب شده برای حل مسئله استاندارد VRP طراحی شده و اغلب انعطاف لازم برای حل مسایل با محدودیتهای مختلف را ندارند.

بنابراین با توجه به اینکه الگوریتم پیشنهادی پاسخ قابل مقایسه با بهترین الگوریتم ها را ارائه می دهد، کاربرد آن برای مسایل عملی می تواند به حل موثر مسئله منجر شود.

از آنجا که هر یک از الگوریتم ها بر روی ماشینی با سرعت و ویژگیهای خاصی اجرا شده اند، مقایسه زمان صرف شده برای حل مسایل توسط الگوریتم ها به صورت مستقیم امکان پذیر نیست. زمان متوسط صرف شده توسط الگوریتم پیشنهادی برای مسایل انتخاب شده ۰/۵ دقیقه است که زمان بسیار مناسبی است. در مجموع می توان گفت که بر اساس این آزمایش، الگوریتم پیشنهادی توانایی رقابت با الگوریتم های پیشرفته از نظر کیفیت جواب ها و سرعت را دارد.

## ۵. جمع‌بندی

مسائل در این حوزه را داراست. بسیاری از الگوریتم‌های انتخاب شده برای مقایسه صرفاً برای حل مسئله کلاسیک VRP طراحی شده و قابلیت کاربرد برای حل مسائل دیگر را ندارند.

بر خلاف فرض معمول در مسائل بهینه‌سازی که زمان مورد نیاز برای طی مسافت بین دو نقطه عدد ثابتی در نظر گرفته می‌شود، در عمل این زمان بستگی به زمان وقوع سفر و وضعیت ترافیک دارد. این موضوع عامل مهمی در عدم موفقیت کاربرد الگوریتم‌ها برای حل مسائل واقعی است. در ادامه این مطالعه، پژوهش در راستای توسعه الگوریتم پیشنهادی برای در نظر گرفتن زمان سفر دینامیک در دست انجام است.

گسترش الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل پیچیده‌تر مانند MPVRP که یکی از مسائل عملی در بخش توزیع است، می‌تواند یکی از موضوع‌های تحقیق آتی باشد. همچنین با توجه به اندازه بزرگ مسائل واقعی و لزوم حل سریع مسئله، پیاده‌سازی موازی<sup>۲۲</sup> الگوریتم پیشنهادی می‌تواند باعث افزایش سرعت در حل مسئله توسط الگوریتم شده و امکان کاربرد آنرا برای محیط‌های پویا و به شدت متغیر فراهم آورد. این موضوع نیز به عنوان یکی از زمینه‌های تحقیق آتی پیشنهاد می‌شود.

در این نوشتار، پس از مرور ویژگی‌های مسئله برنامه‌ریزی حمل و نقل، چارچوبی برای دسته‌بندی این دسته از مسائل ارائه شد. هدف اصلی این پژوهش، ارائه الگوریتمی برای حل مسائل واقعی با محدودیتها و پیچیدگی‌های موجود در عمل بود. این الگوریتم می‌تواند با تغییرات بسیار ناچیزی برای صنایع مختلف پیاده‌سازی شده و باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های توزیع در سازمانها شود.

در طراحی الگوریتم با مرور بر رویکردهای مختلف مطرح در ادبیات بهینه‌سازی، جستجوی ممنوع به دلیل ویژگی‌های مناسب برای پاسخگویی به نیازهای مسائل واقعی انتخاب شد. الگوریتم پیشنهادی ضمن بهره‌گیری از استراتژی‌های پیشرفته دارای ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد خود است. این ویژگی‌ها امکان دستیابی به جواب با کیفیت مناسب و سرعت زیاد را فراهم می‌سازد. مقایسه الگوریتم با بهترین الگوریتم‌های ارائه شده توسط پژوهشگران دنیا نشان می‌دهد که این الگوریتم توانایی ارائه جوابهای قابل مقایسه را دارد. قابل یادآوری است که این الگوریتم با توجه به انعطاف‌پذیری پیش‌بینی شده در آن دارای قابلیت توسعه در جهت بکارگیری برای حل برخی دیگر از

Archive of SID

جدول ۲. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم های منتخب

بهرترین جواب	الگوریتم پیشنهادی		Unified TS <sup>5</sup>		Granular TS <sup>4</sup>		Berger & Barkaoui <sup>3</sup>		Taillard <sup>2</sup>	Taburoute <sup>1</sup>		نوع	اندازه	ردیف
	زمان <sup>۱۰</sup>	هزینه	زمان <sup>9</sup>	هزینه	زمان <sup>8</sup>	هزینه	زمان <sup>7</sup>	هزینه	هزینه	زمان <sup>6</sup>	هزینه			
۸۲۴/۶۱	۰/۱۱	۵۲۴/۶۱	۴/۵۷	۵۲۴/۶۱	۰/۸۱	۵۲۴/۶۱	۲/۰۰	۵۲۴/۶۱	۵۲۴/۶۱	۶/۰۰	۵۲۴/۶۱	C	۵۰	۱
۸۳۵/۲۶	۰/۳۱	۸۳۹/۶۱	۷/۲۷	۸۳۵/۴۵	۲/۲۱	۸۳۸/۶	۱۴/۳۳	۸۳۱/۲۶	۸۳۵/۲۶	۵۳/۸۰	۸۳۵/۷۷	C	۷۵	۲
۸۲۶/۱۴	۰/۲۲	۸۲۹/۱۸	۱۱/۲۳	۸۲۹/۴۴	۲/۳۹	۸۲۸/۵۶	۲۷/۹۰	۸۲۷/۳۹	۸۲۴/۱۴	۱۸/۴۰	۸۲۹/۴۵	C	۱۰۰	۳
۱۰۲۸/۴۲	۰/۴۵	۱۰۳۳/۲۱	۱۸/۷۲	۱۰۳۸/۴۴	۴/۵۱	۱۰۳۳/۲۱	۴۸/۹۸	۱۰۳۶/۱۶	۱۰۲۸/۴۲	۵۸/۸۰	۱۰۳۶/۱۶	C	۱۵۰	۴
۱۲۹۱/۴۵	۰/۷۰	۱۲۹۸/۷۹	۲۸/۱۰	۱۳۰۵/۸۷	۷/۵۰	۱۳۱۸/۲۵	۵۵/۴۱	۱۳۲۴/۰۶	۱۲۹۸/۷۹	۹۰/۹۰	۱۳۲۲/۶۵	C	۱۹۹	۵
۵۵۵/۴۳	۰/۲۰	۵۵۵/۴۳	۴/۶۱	۵۵۵/۴۳	۰/۸۶	۵۵۵/۴۳	۲/۳۳	۵۵۵/۴۳	۵۵۵/۴۳	۱۳/۵۰	۵۵۵/۴۳	C,D	۵۰	۶
۹۰۹/۶۸	۰/۵۳	۹۱۳/۳۳	۷/۵۵	۹۰۹/۶۸	۲/۷۵	۹۲۰/۷۲	۱۰/۵۰	۹۰۹/۶۸	۹۰۹/۶۸	۵۴/۶۰	۹۱۳/۲۳	C,D	۷۵	۷
۸۶۵/۹۴	۰/۳۰	۸۶۹/۴۸	۱۱/۱۷	۸۶۶/۳۸	۲/۹۰	۸۶۹/۴۸	۵/۰۵	۸۶۸/۳۲	۸۶۵/۹۴	۲۵/۶۰	۸۶۵/۹۴	C,D	۱۰۰	۸
۱۱۶۸/۵۵	۰/۸۳	۱۱۷۶/۵۰	۱۹/۱۷	۱۱۷۱/۸۱	۵/۶۷	۱۱۷۳/۱۲	۱۷/۸۸	۱۱۶۹/۱۵	۱۱۶۲/۵۵	۷۱/۰۰	۱۱۷۷/۶۶	C,D	۱۵۰	۹
۱۳۹۵/۸۵	۰/۹۰	۱۳۹۷/۹۴	۲۹/۷۴	۱۴۱۵/۴	۹/۱۱	۱۴۳۵/۷۴	۴۳/۸۶	۱۴۱۸/۷۹	۱۳۹۷/۹۴	۹۹/۸۰	۱۴۱۸/۵۱	C,D	۱۹۹	۱۰
۱۰۴۲/۱۱	۰/۶۳	۱۰۷۴/۱۳	۱۴/۱۵	۱۰۷۴/۱۳	۳/۱۸	۱۰۴۲/۸۷	۲۲/۴۳	۱۰۴۳/۱۱	۱۰۴۲/۱۱	۲۲/۲۰	۱۰۳۷/۴۷	C	۱۲۰	۱۱
۸۱۹/۵۶	۰/۵۷	۸۱۹/۵۶	۱۰/۹۹	۸۱۹/۵۶	۱/۱۰	۸۱۹/۵۶	۷/۲۱	۸۱۹/۵۶	۸۱۹/۵۶	۱۶/۰۰	۸۱۹/۵۶	C	۱۰۰	۱۲
۱۵۴۱/۱۴	۰/۷۷	۱۵۴۵/۹۸	۱۴/۵۳	۱۵۶۸/۹۱	۹/۳۴	۱۵۴۵/۵۱	۳۴/۹۱	۱۵۵۳/۱۲	۱۵۴۱/۱۴	۵۹/۲۰	۱۵۳۷/۸۱	C,D	۱۲۰	۱۳
۸۶۶/۳۷	۰/۵۳	۸۶۸/۵۰	۱۰/۶۵	۸۶۶/۵۳	۱/۴۱	۸۶۶/۳۷	۴/۷۳	۸۶۶/۳۷	۸۶۶/۳۷	۶۵/۷۰	۸۶۶/۳۷	C,D	۱۰۰	۱۴
		٪۰/۵۵		٪۰/۶۹		٪۰/۶۹		٪۰/۴۸		٪۰/۰۶		٪۰/۸۶	متوسط در صد اختلاف از بهترین جواب	
<sup>6</sup> Silicon Graphics workstation 5.7 MHz, (36 Mflops). <sup>7</sup> Pentium 400 MHz PC <sup>8</sup> Pentium 200 MHz PC <sup>9</sup> Sun Ultrasparc 10 (440 MHz). <sup>10</sup> Pentium 2 GHz PC							<sup>1</sup> Gendreau et al [25] <sup>2</sup> Taillard [27] <sup>3</sup> Berger & Barkaoui [26] <sup>4</sup> Toth and vigo [22] <sup>5</sup> Cordea et al [19]							

۶. پانویس ها

- <sup>13</sup> Neural Network
- <sup>14</sup> Ant Colony Optimization
- <sup>15</sup> Intensification and Diversification
- <sup>16</sup> Hard Constraints
- <sup>17</sup> Soft Constraints
- <sup>18</sup> Insert
- <sup>19</sup> Exchange
- <sup>20</sup> Candidate List
- <sup>21</sup> For more information please refer to OR-Library web site:  
<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>
- <sup>22</sup> Parallel Implementation

- <sup>1</sup> Vehicle Routing Problem (VRP)
- <sup>2</sup> Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW)
- <sup>3</sup> Multi-period Vehicle Routing Problem (MPVRP)
- <sup>4</sup> Time Window
- <sup>5</sup> Construction
- <sup>6</sup> Improvement
- <sup>7</sup> Evolutionary
- <sup>8</sup> Learning
- <sup>9</sup> Local Search
- <sup>10</sup> Simulated Annealing
- <sup>11</sup> Genetic Algorithms
- <sup>12</sup> Memetic Algorithm

- scheduling at Ford Service Organisation", *OR Spectrum*, 27(1), pp.147-162.
13. Hanshar, F. and Ombuki-Berman, B. (2005) "Dynamic vehicle routing using genetic algorithms", *Applied Intelligence*, pp. 89-99.
14. Moscato, P. and Cotta, C. (2003) "A gentle introduction to memetic algorithms", In Glover F. and Kochenberger, G.A. (eds) *Handbook of Metaheuristics*, pp.105-144.
15. El Fallahi, A., Prins, C. and Calvo, R.W. (2008) "A memetic algorithm and a tabu Search for the multi-compartment vehicle routing problem", *Computers and Operations Research* 35 (5), pp.1725-1741.
16. Reimann, M., Doerner, K. and Hartl, R.F. (2004) "D-Ants: savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, 31, pp.563-591.
17. Modares A., Somhom, S. and Enkawa, T. (1997) "A Competitive neural network algorithm for solving vehicle routing problems", *International Journal on Computers and Industrial Engineering*, 33, pp.473-476.
18. Jemai, J. and Mellouli, K. (2008) "A Neural-tabu search heuristic for the real time vehicle routing problem", *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, 7(2), pp.161-176.
19. Créput, J. and Koukam, A. (2008) "Self-organization and evolution combined to address the vehicle routing problem", *Lecture Notes in Computer Science*, 4926, pp.100-111.
20. Cordeau, J.-F., Laporte, G., and Mercier, A. (2001) "A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows", *Journal of the Operational Research Society*, 52, pp.928-936.
21. Taillard, E. [et.al] (1997) "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows", *Transportation Science* 31, pp.170-186.
22. Solomon, M. M. (1987) "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints", *Operations Research* 35, pp.254-265.
1. Cordeau, J. F., M Gendreau, F. Laporte, G. J-Y Potvin, J. Y. and Semet, F. (2002) "A guide to vehicle routing heuristics", *Journal of the Operational Research Society*, 53, pp.512-522.
2. Laporte, G. (2007) "What you should know about the vehicle routing problem", *Naval Research Logistics* 45(8), pp.811-907.
3. Cordeau J.-F., M., Gendreau, M. A., Hertz, Laporte G. and Sormany J.-S. (2004) "*New heuristics for the vehicle routing problem*" Working Paper; Les Cahiers du GERAD.
4. Thangiah, S. R., Osman, I. and Sun, T.(1994) "Hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows", Working paper UKC/IMS/OR94/4, Institute of Mathematics and Statistics, University of Kent, Canterbury. UK.
5. Beasley, J.E. (1983) "Route-first cluster-second methods for vehicle routing", *Omega* 11, pp.403-408.
6. Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005) "Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics", *Transportation Science* 39, pp.119-139.
7. Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. and Semet, F. (2007) "Classical and modern heuristics for the vehicle routing", *Intl. Trans. in Op. Res.* 7, pp.285-300.
8. Branddao J. and Mercer, A. ( 1997) "A tabu search algorithm for the multi-depot vehicle routing and scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 100, pp. 180-191.
9. Hertz, A. (2006) "Anniversary focused issue of computers and operations research on tabu search", *Computers and Operations Research*, 33, pp. 2447-2448.
10. Wassan, N. (2006) "A reactive tabu search for the vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, 57, pp. 111-116.
11. Pankratz, G. (2005) "A grouping genetic algorithm for the pickup and delivery problem with time windows", *OR Spectrum*, 27, pp. 21-41.
12. Derigs, U. and Jenal, O. (2005) "A GA-based decision support system for professional course

- C. (Eds.), *Combinatorial Optimization*. Wiley, Chichester.
26. Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G. (1994) "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", *Management Science* 40, pp.1276-1290.
27. Berger, J. and Barkaoui, M. (2004) "A new hybrid genetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society* 54, pp.1254-1262.
28. Taillard, E. (1993) "Parallel iterative search methods for vehicle routing problems", *Networks* 23, pp.661-673.
23. Toth, P., and Vigo, D. (2003) "The granular tabu search and its application to the vehicle routing problem", *INFORMS Journal on Computing*, 15, pp.333-346.
24. Paraskevopoulos, D.C.[et.al] (2008) "A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows", *Journal of Heuristics* 14, pp.425-455
25. Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P. (1979) " The vehicle routing problem" In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi,

Archive of SID