دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت و تصمیم همزمان در مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع- صنایع

زینب حاجی‌شفیعی

استاد راهنما

دکتر حمید میرمحمدی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی صنایع – صنایع خانم زینب حاجی‌شفیعی

تحت عنوان

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت و تصمیم همزمان در مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه

در تاریخ ۹۲/۸/۸ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر حمید میرمحمدی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر رضا حجازی
۳- استاد داور	دکتر نادر شتاب بوشهری
۴- استاد داور	دکتر مهدی علینقیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مهدی بیجاری

سپاس و ستایش خداوند بلند مرتبه را که در تمام مراحل زندگی همراهم بوده و هر آنچه دارم و به هرجا رسیده‌ام از لطف بی‌منتهای اوست.
بر خود لازم می‌دانم سپاسگزار و قدردان آنانی باشم که در این راه یاریم کردند:
مادرم مهربانم که با کمک و ایثارگری‌هایش باری از دوشم سبک کرده و همواره دعای خیرش آرام‌بخش وجودم و راه‌گشای راهم بوده‌است.
پدر دلسوزم که مشوق اصلی‌ام در این راه بوده و با کلام نافذش در سخت‌ترین شرایط آسودگی را برایم به ارمغان آورده‌است.
همسر فداکارم که راهنما و مشوقم بوده و با حضور گرمش سختی راه برایم سهل شده‌است.
استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حمید میرمحمدی که شاگردی ایشان افتخاری برایم بوده و راهنمایی‌های بی‌دریغشان همواره روشن‌گر راهم بوده‌است. صمیمانه سپاسگزار زحمات بی‌دریغشان هستم.
استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر رضا حجازی و زحمات فراوانشان در تمام دوران تحصیلم که با کلامشان و رفتارشان درس‌هایی از ایشان آموختم.
استادان بزرگوار جناب آقای دکتر شتاب بوشهری وجناب آقای دکتر علینقیان که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را تقبل نمودند.
همچنین یاد کنم از دوست مهربانم پریناز واعظ بخاطر راهنمایی‌هایش و جناب آقای مهندس بهشتی بخاطر زحماتشان در بخش‌هایی از این پایان‌نامه و تمام کسانی که در نتیجه‌ی زحماتشان به این مرحله رسیده‌ام.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

سه یار غمخوارم، سه رفیق بی‌همتایم و والاترین افتخارات زندگی‌ام

پدرم، مادرم و همسرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ کلیات مسأله ۳
۱-۳ اهمیت موضوع تحقیق ۳
۱-۴ بیان اهداف تحقیق ۶
۱-۵ معرفی ساختار تحقیق ۷
فصل دوم: کلیات مسأله مسیریابی وسایل نقلیه
۲-۱ مقدمه ۸
۲-۲ تعریف مسأله ۸
۲-۳ مسأله پایه VRP ۹
۲-۴ پیچیدگی مسأله ۱۰
۲-۵ دسته‌بندی مسائل VRP ۱۰
۲-۵-۱ CVRP ۱۱
۲-۵-۲ VRPTW ۱۲
۲-۵-۳ VRPPD ۱۳
۲-۵-۴ VRPB ۱۴
۲-۵-۵ VRPBTW ۱۴
۲-۵-۶ VRPPDTW ۱۵
۲-۶ مدل CVRP ۱۵
۲-۶-۱ مدل اول ACVRP ۱۶
۲-۶-۲ مدل دوم ACVRP ۱۷
۲-۶-۳ تفاوت دو مدل ACVRP ۱۸
۲-۷ مروری بر ادبیات CVRP ۱۸
۲-۷-۱ روش‌های حل دقیق ۱۸
۲-۷-۲ روش‌های حل ابتکاری ۱۹
۲-۷-۳ روش‌های حل فراابتکاری ۲۰
۲-۷-۴ مدل‌های جدید در سال‌های اخیر ۲۲
فصل سوم: خرید یا اجاره وسایل نقلیه در CVRP
۳-۱ مقدمه ۲۴
۳-۲ اهمیت درنظرگیری مدل جدید ۲۴

۳-۳ فرضیات مسأله ۲۸
۳-۴ پارامترها و متغیرهای مسأله ۲۸
۳-۵ مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ۲۹
۳-۶ مدل برنامه‌ریزی خطی ۳۱
۳-۷ پیچیدگی مسأله ۳۴

فصل چهارم: روش حل

۴-۱ مقدمه ۳۵
۴-۲ رویکرد بهینه حل مسأله ۳۵
۴-۳ الگوریتم فراابتکاری جهش قورباغه ۳۹
۴-۴ مبانی الگوریتم جهش قورباغه ۳۹
۴-۴-۱ الگوریتم MA ۴۱
۴-۴-۲ الگوریتم SCE ۴۱
۴-۴-۳ الگوریتم PSO ۴۲
۴-۵ ساختار کلی الگوریتم SFL ۴۳
۴-۶ الگوریتم جهش قورباغه پیشنهادی برای CVRP باتصمیم همزمان خرید یا اجاره وسایل ۴۸
۴-۶-۱ نحوه‌ی نمایش جواب‌ها ۴۸
۴-۶-۲ ساختار الگوریتم پیشنهادی ۴۹
۴-۶-۳ تولید جمعیت اولیه ۵۱
۴-۶-۴ تعیین توالی ملاقات مشتریان ۵۱
۴-۶-۵ بهبود بدترین قورباغه هر زیرممپلکس ۵۵
۴-۶-۶ جستجوی محلی(LS) ۵۷
۴-۶-۷ معیار توقف ۶۰
۴-۷ الگوریتم ترکیبی الکترومغناطیس ۶۳
۴-۸ مبانی الگوریتم الکترومغناطیس ۶۴
۴-۹ الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی موازی ۶۶
۴-۱۰ روش ترکیبی پیشنهادی ۶۶
۴-۱۰-۱ ساختار الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ۶۷
۴-۱۰-۲ نحوه‌ی نمایش جواب‌ها ۶۸
۴-۱۰-۳ تولید جمعیت اولیه ۷۰
۴-۱۰-۴ تولید همسایگی ۷۰
۴-۱۰-۵ تعیین دمای اولیه و دمای نهایی ۷۱
۴-۱۰-۶ فرآیند تبرید ۷۲
۴-۱۰-۷ حالت تعادل ۷۲
۴-۱۰-۸ محاسبه مقدار تابع هدف ۷۲
۴-۱۰-۹ محاسبه نیرو و حرکت جواب‌ها ۷۳

۴-۱۰-۱۰ جستجوی محلی ۷۶
فصل پنجم: نتایج محاسباتی
۵-۱ مقدمه ۷۸
۵-۲ تولید مسائل نمونه ۷۹
۵-۳ تنظیم پارامترها ۷۹
۵-۳-۱ تنظیم پارامترهای مربوط به مدل ۷۹
۵-۳-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم جهش قورباغه ۸۰
۵-۳-۳ تنظیم پارامترهای الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ۸۴
۵-۴ نتایج آزمایشات و تحلیل حساسیت پارامترهای مسأله ۸۶
۵-۴-۱ بررسی حساسیت الگوریتم جهش قورباغه نسبت به جستجوی محلی و معیار توقف ۸۹
۵-۴-۲ نتایج مقایسه الگوریتم جهش قورباغه و الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید-الکترومغناطیس ۹۱
۵-۴-۳ تحلیل حساسیت الگوریتم‌ها نسبت به نوع پارامترهای مسأله ۱۰۰
فصل ششم: نتیجه‌گیری
۶-۱ جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۰۲
مراجع ۱۰۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ فواصل زمانی بین هر دو گره ۲۶
جدول ۳-۲ نتایج حل مثال با دو رویکرد متفاوت ۲۶
جدول ۳-۳ هزینه‌های رویکرد اول به‌صورت جزئی ۲۷
جدول ۳-۴ پارامترهای مدل ریاضی مسأله ۲۸
جدول ۳-۵ متغیرهای مدل ریاضی مسأله ۲۹
جدول ۴-۱ مقایسه نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار GAMS در مسأله اصلی و زیرمسائل کوچکتر ۳۸
جدول ۴-۲ مسافت بین دو گره ۵۲
جدول۴-۳ مقایسه دو روش لیست همسایگان و نزدیکترین شهر دیدار نشده ۵۴
جدول ۴-۴ به‌دست آوردن α_k ۵۶
جدول ۴-۵ مقایسه زمان حل الگوریتم با LS مختلف ۵۹
جدول ۴-۶ روند بهبود زمان حل الگوریتم ۶۰
جدول ۵-۱ پارامترهای هزینه‌ای مدل پیشنهادی برای ۳ گروه وسیله نقلیه ۸۰
جدول ۵-۲ سطوح پارامترهای مورد آزمایش الگوریتم اولیه جهش قورباغه ۸۱
جدول ۵-۳ مقایسه الگوریتم اولیه SFL و نرم‌افزار GAMS ۸۲
جدول ۵-۴ سطوح پارامترهای مورد آزمایش الگوریتم نهایی جهش قورباغه ۸۳
جدول ۵-۵ مقایسه الگوریتم اولیه SFL و نرم‌افزار GAMS ۸۳
جدول ۵-۶ سطوح پارامترهای مورد آزمایش الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ۸۴
جدول ۵-۷ بهترین سطح پارامترهای الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ۸۵
جدول ۵-۸ مقایسه الگوریتم PSAEM و نرم‌افزار GAMS ۸۵
جدول ۵-۹ پارامترهای اثرگذار بر نتایج حل الگوریتم‌ها ۸۸
جدول ۵-۱۰ متوسط زمان حل مسائلی با بیش از ۱۰۰ گره توسط الگوریتم PSA-EM ۸۹
جدول۵-۱۱ مقایسه نتایج حل الگوریتم اولیه جهش قورباغه و الگوریتم(نهایی) بهبود یافته جهش قورباغه ۸۹
جدول ۵-۱۲ درصد بهبود الگوریتم نهایی جهش قورباغه نسبت به الگوریتم اولیه جهش قورباغه در دسته مسائل مختلف ... ۹۱
جدول ۵-۱۳ مقایسه نتایج حل الگوریتم SFL و PSA-EM در دو نوع مسأله مشخص ۹۲
جدول ۵-۱۴ مقایسه نتایج الگوریتم SFL و PSA-EM در مسائلی با پارامترهای نحوه‌ی توزیع مشتریان و مکان انبار ۹۵
جدول ۵-۱۵ مقایسه نتایج الگوریتم SFL و PSA-EM در مسائلی با پارامترهای وسعت ناحیه مشتریان و مکان انبار ۹۶
جدول ۵-۱۶تناسب تصمیم خرید یا اجاره وسایل نقلیه و مسیر پیموده شده ۹۸
جدول ۵-۱۷ نمونه‌ای از تفاوت تعداد تورهای ایجاد شده در خروجی‌های دو الگوریتم ۹۸
جدول ۵-۱۸ درصد تغییرات میانگین مقادیر تابع هدف در شرایط متفاوت در مقایسه دو الگوریتم ۱۰۰
جدول ۵-۱۹ مقایسه دو الگوریتم ازنظر سطح ظرفیت ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ دسته‌بندی مسائل VRP ۱۱
شکل ۴-۱ نمایش مم، مموتایپ و ممپلکس ۴۰
شکل ۴-۲ تقسیم کل جمعیت به سه گروه در SCE ۴۲
شکل ۴-۳ نمایش انتخاب زیرممپلکس – $P_{(B)}$ و $P_{(W)}$ به‌ترتیب مطابق با بهترین و بدترین موقعیت قورباغه در زیرممپلکس ۴۶
شکل ۴-۴ یک سیر تکاملی ممتیک در یک زیرممپلکس ۴۷
شکل ۴-۵ نحوی نمایش آرایه‌ی جواب در SFL ۴۹
شکل ۴-۶ روش ISP ۵۷
شکل ۴-۷ جستجوی محلی 2-opt ۵۸
شکل۴-۸ جابجایی ۰-۱ (جستجوی محلی insert) ۵۸
شکل۴-۹ جابجایی ۱-۱ (جستجوی محلی swap) ۵۸
شکل ۴-۱۰، ۱۰مشتری و ۳وسیله نقلیه در LS2 ..... ۶۰
شکل ۴-۱۱ فلوچارت الگوریتم جهش قورباغه پیشنهادی ۶۲
شکل ۴-۱۲ مراحل الگوریتم ترکیبی PSA-EM ۶۳
شکل ۴-۱۳ مکانیزم ربایش و رانش بر روی ذره ۳ ..... ۶۴
شکل ۴-۱۴ مثالی از روش R-K ۶۹
شکل ۴-۱۵ نحوه‌ی نمایش آرایه‌ی جواب در PSA-EM ۷۰
شکل ۴-۱۶ تخصیص مشتریان به وسایل نقلیه ۷۳
شکل۴-۱۷ فلوچارت الگوریتم ترکیبی PSA-EM ۷۷
شکل ۵-۱ نحوه‌ی توزیع مشتریان ۸۷
شکل ۵-۲ مکان انبار ۸۷
شکل۵-۳ مقایسه زمان حل الگوریتم PSA-EM و SFL در مسائلی با تعداد گره‌های مختلف ۹۴
شکل ۵-۴ مقایسه زمان حل در الگوریتم PSA-EM با نرم‌افزار GAMS ۹۴
شکل ۵-۵ مقایسه زمان حل در الگوریتم SFL با نرم‌افزار GAMS ۹۵

چکیده

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مسائل در زمینه‌ی تحقیق در عملیات است. این مسأله به‌دنبال جستجوی یک برنامه‌ی کارا برای ناوگان وسایل نقلیه است. در این مسأله، وسایل نقلیه محموله‌ها را از یک انبار مرکزی بارگیری کرده و بعد از تأمین تقاضای همه‌ی مشتریان به انبار بازمی‌گردند، با این فرض که هر مشتری فقط یکبار ملاقات شود و محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه نقض نشود. مسأله مسیریابی وسایل نقلیه یک مسأله *NP-hard* است. با توجه به اینکه هزینه‌ی اجاره و خرید وسایل نقلیه متفاوت می‌باشد و برخی شرکت‌ها قادرند وسایل نقلیه را متناسب با نیاز خود خریداری یا اجاره کنند، در این پژوهش فرض خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه در مسیریابی مطرح شده‌است، چراکه تصمیم بر اجاره یا خرید وسایل نقلیه بر نحوه‌ی شکل‌گیری مسیرها اثرگذار است.بنابراین با اعمال این فرض در مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت، مدل جدیدی با درنظرگیری ارزش زمانی پول برای این مسأله ارائه شده‌است. سپس دو روش حل شامل الگوریتم جهش قورباغه و الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ارائه شده‌است. طبق مقایسه عملکرد دو الگوریتم در شرایط متفاوت، الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس ازنظر زمان محاسباتی و کیفیت جواب‌ها از عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم جهش قورباغه برخوردار است.

کلمات کلیدی: ۱- مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت ۲- خرید وسایل نقلیه ۳- اجاره‌ی وسایل نقلیه ۴- الگوریتم جهش قورباغه ۵- الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید موازی-الکترومغناطیس

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

حمل‌ونقل در سیستم‌های اقتصادی اعم از تولیدی و خدماتی از جایگاه مهمی برخوردار است و بخش قابل توجهی از تولید ناخالص ملی هر کشور را به خود اختصاص می‌دهد. به‌همین جهت محققان نسبت به بهبود مسیرها و حذف سفرهای غیر ضروری و یا ایجاد مسیرهای کوتاه جایگزین، اقدام نموده‌اند. مدیران و سرمایه‌گذاران نیز همواره در جستجوی راهکاری برای حذف یا کاهش حمل‌ونقل و هزینه‌های مرتبط با آن هستند بدون اینکه خللی به بخش‌های دیگر سیستم و کارایی مرتبط با آن وارد شود. یکی از مسائل مهم در حمل‌ونقل کالا از مراکز توزیع به نقاط تقاضا این است که چگونه کالا را با کمترین هزینه و بیشترین سطح رضایت به مشتری تحویل دهیم. بنابراین توزیع کالا از انبار مرکزی به مشتریان نیز یک مسأله‌ی چالش‌برانگیز در مدیریت توزیع است و حل اثربخش مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه در یک شبکه توزیع، منجر به افزایش سطح رضایت مشتری و کاهش قابل توجه کل هزینه‌ی جابجایی می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر تصمیمات بهتر در زمینه‌ی مسیریابی موجب افزایش کارآمدی یک شبکه‌ی توزیع و در نتیجه افزایش رقابت‌پذیری در بازار می‌گردد که این موضوع در قالب مسأله مسیریابی وسایل نقلیه(VRP[1]) مطرح می‌گردد و در ادامه به معرفی آن پرداخته می‌شود.

[1] Vehicle Routing Problem

۱-۲ کلیات مسأله

مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه(VRP) یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مسائل در زمینه‌ی توزیع و لجستیک است. این مسأله به‌دنبال جستجوی یک برنامه‌ی بهینه برای وسایل نقلیه است که در این برنامه هر وسیله، محموله را از انبار بارگیری می‌کند و آن را به مشتریان که در مناطق جغرافیایی مختلف قرار دارند، تحویل می‌دهد و پس از تحویل کالاها دوباره به انبار برمی‌گردد؛ به‌طوری‌که تمام محدودیت‌های مسأله نظیر حداکثر ظرفیت وسیله، پاسخگویی به تمامی تقاضاها و سایر محدودیت‌های موجود در مسأله رعایت گردد و تابع هدف مسأله نیز به سمت بهینگی حرکت کند. بدین‌صورت مجموعه مسیرهایی را برای وسایل‌نقلیه تعیین می‌کند که وسایل مشخص شده با حرکت ازآن مسیرها، مشتریان را سرویس‌دهی می‌کنند. توابع هدف مختلفی برای مسأله‌ی مسیریابی درنظر گرفته می‌شود که برخی ازآن‌ها عبارتند از[۱]:

- مینیمم کردن هزینه‌ی کل
- مینیمم کردن تعداد وسایل نقلیه برای سرویس‌دهی
- تعدیل مسیرها از لحاظ زمان سفر و حجم وسیله نقلیه
- مینیمم کردن جریمه‌های وابسته به خدمات مشتریان
- یا ترکیبی از اهداف فوق.

به‌دلیل متفاوت بودن شرایط و مقتضیات مسائل از یک مجموعه به مجموعه‌ی دیگر، اهداف و قیود بسیار متنوعی برای این مسأله مطرح است که با توجه به شرایط موجود در مسأله، انواع مختلف مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه تعریف می‌شود. هر کدام از این مسائل یا ترکیبی از آن‌ها نیز می‌تواند مسائل مستقلی را تشکیل دهند که قابل انطباق با مسائل دنیای واقعی باشند.

مسأله VRP به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی ترکیبی در حمل‌ونقل شناخته شده‌است و اثبات شده که یک مسأله *NP-hard* می‌باشد[۲]. ازاین‌رو در اغلب پژوهش‌ها برای حل مسائل مسیریابی از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده شده‌است.

۱-۳ اهمیت موضوع تحقیق

حمل‌ونقل یکی از بخش‌های مهم و عمده از اقتصاد هر کشور به‌شمار می‌رود و یکی از مهمترین بخش-های تشکیل‌دهنده‌ی هزینه‌ی تمام‌شده محصولات نهایی است. توسعه‌ی روزافزون شهرنشینی، صنایع و به‌خصوص

صنایع توزیع، جابجایی انسان وکالا را به‌صورت مسأله‌ای درآورده است که پیچیدگی آن به‌صورت دائمی در حال افزایش است. رشد شهری باعث افزایش فزاینده‌ی تقاضا در صنعت حمل‌ونقل شده‌است که به تبع آن، شهرها وصنایع بزرگ را دست به گریبان مشکلات زیادی در زمینه‌های تراکم ترافیکی، آلودگی هوا، اتلاف وقت طولانی در مسیر سفرهای روزانه‌ی افراد، افزایش مصرف سوخت، استهلاک وسایل‌نقلیه و همچنین روی آوردن دولت به برنامه‌هایی نظیر طرح‌های محدودیت‌های ترافیکی کرده‌است. برای حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، صنایع تولیدی و بخش خدمات شهرها نیاز به یک سیستم مجهز و کارآمد حمل‌ونقل دارند. توزیع یا جمع‌آوری کالا، جمع‌آوری زباله‌های جامد،تمیز کردن خیابان‌ها، مسیر حرکت اتوبوس‌ها، سرویس‌های مدارس، سیستم‌هایdial-a-ride (مشتری با تلفن تقاضای خود را بیان کرده و محصول را در درب منزل به او تحویل می‌دهند) سیستم‌های توزیع و نگهداری پخش پول و سرویس‌های بانکی و جمع‌آوری ضایعات صنعتی از جمله مسائلی است که در این زمینه می‌توان به آن اشاره کرد.

تعداد زیادی از کاربردهای دنیای واقعی در اروپا و امریکای شمالی وجود دارد که نشان می‌دهد، استفاده از روش‌های کامپیوتری برای برنامه‌ریزی فرآیند توزیع، معمولا ۵٪ تا ۲۰٪ در هزینه‌های حمل‌ونقل جهانی صرفه-جویی می‌کند و به‌سهولت می‌توان تأثیر عمده‌ی این صرفه‌جویی را بر سیستم اقتصاد جهانی مشاهده کرد[۱].

فرآیند حمل‌ونقل، تمامی مراحل سیستم تولید و توزیع را دربرمی‌گیرد و معمولا ۱۰٪ تا ۲۰٪ از هزینه‌ی نهایی کالاها را تشکیل می‌دهد[۱] . در مدیریت حمل‌ونقل، نیازمندی به تهیه کالا یا سرویس از یک نقطه به نقاط جغرافیایی مختلف با مفهوم اقتصادی رضایت، حائز اهمیت است و به‌علت کاربردهای زیاد انواع مختلف مسأله مسیریابی وسایل نقلیه، محققان زیادی بر روی روش‌های حل این مسائل متمرکز شده‌اند. مدل‌های ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی مشخصه‌های مسائل توزیع در کاربردهای جهان واقعی، الگوریتم‌های متناظر و اجراهای کامپیوتری هستند.

یکی از نکات کلیدی در مسأله VRP، وسیله نقلیه است که با توجه به ویژگی‌های وسیله نقلیه، مسائل مختلفی در زمینه VRP می‌تواند مطرح شود. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از[۱]:

- نقطه پایان و نقطه شروع حرکت وسایل نقلیه متفاوت باشند یعنی خط سرویس در یک مرکزی غیر از مرکز(انبار) شروع، پایان یابد.
- ظرفیت وسایل نقلیه متفاوت باشند.
- نوع باری که وسایل نقلیه حمل می‌کنند، با یکدیگر متفاوت باشد.
- وسایل نقلیه، همگن یا ناهمگن باشند.
- حرکت از برخی کمان‌ها برای برخی وسایل میسر نباشد.

علاوه بر موارد فوق به ویژگی زیر نیز می‌توان اشاره کرد:

- وسایل نقلیه قابلیت خریدن یا اجاره شدن را داشته باشند.

طبق ادبیات بررسی شده تاکنون در اکثر مسائل VRP ، فرض بر این بوده که شرکت توزیع‌کننده‌ی کالا، وسایل حمل‌ونقل مورد نیاز خود را خریداری می‌کند و مالک آن وسایل است، اما برای برخی از شرکت‌ها این امکان وجود دارد که وسایل حمل‌ونقل موردنیاز خود را اجاره کنند، چراکه سرویس‌دهی مسیرها همیشه یکسان نیست و بنابه نیاز مشتریان و تقاضاهای مختلف، برخی مسیرها همواره سرویس‌دهی می‌شوند و برخی دیگر چند دوره یکبار یا طبق یک برنامه زمانی معین سرویس داده می‌شوند و برخی با فواصل زمانی زیاد و به ندرت سرویس‌دهی می‌شوند. همچنین مقدار استفاده از یک دارایی مانند وسیله نقلیه، نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم بر خرید یا اجاره آن دارد که این موضوع بر هزینه‌ی کل حمل‌ونقل مؤثر است، به‌عبارت دیگر معمولا برای استفاده-های محدود و مقادیر اندک مسافت یا فواصل کم و یا زمان‌های کوتاه، اجاره کردن وسیله و برای استفاده با مقادیر و زمان‌های زیاد، خرید وسیله به‌صرفه‌تر است. به‌علاوه هزینه‌ی خرید وسایل نقلیه با هزینه‌ی اجاره‌ی آن‌ها متفاوت است و خرید وسایل نقلیه هزینه‌هایی از جمله هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات، هزینه‌ی ثبت، هزینه‌ی بیمه، مالیات، استهلاک وسایل و .... را به‌دنبال دارد. در نتیجه این سؤال مطرح می‌شود که با توجه به افق برنامه‌ریزی چه تعدادی از وسایل نقلیه را باید خرید و چه تعدادی را اجاره کرد تا هزینه‌ی کمتری به‌بار آید؟

در حقیقت، خریدن یا اجاره کردن وسایل نقلیه موضوعی است که اثر بسزایی بر هزینه‌های حمل‌ونقل دارد و در جهان واقع نیز با این مسأله زیاد مواجه می‌شویم. در این زمینه، تصمیم‌گیری مناسب در مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه با توجه به هزینه‌های مرتبط با آن و نیازهای مشتری می‌تواند به شیوه‌ی کارایی در کاهش هزینه‌ها اثرگذار باشد. به‌علاوه معمولا در مسائل VRP فقط هزینه‌های مربوط به مسیرها درنظر گرفته می‌شود وتحلیل‌های مالی مرتبط با ناوگان حمل‌ونقل به‌طور مستقل انجام می‌گیرد. از آنجا که دو مورد فوق در تعامل و تقابل هستند و بر یکدیگر اثرگذارند، درنظرگیری همزمان آن‌ها و کاهش هزینه‌های کلی می‌تواند کارایی بیشتر برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را به‌دنبال داشته باشد، لذا درنظرگیری کل هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل موجب ارتقاء کارایی برنامه-ریزی توزیع به بهترین وجه می‌شود.

۱-۴ بیان اهداف تحقیق

هدف این پایان‌نامه، وارد کردن تصمیم‌گیری در مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه در VRP است و CVRP[1] را با این فرض که برخی وسایل می‌توانند اجاره شوند و برخی می‌توانند خریداری شوند، مدل‌سازی کرده، بر اساس مدل جدید مشخص می‌شود برای هر وسیله نقلیه استفاده شده در یک تور، خرید آن بهتر است یا اجاره‌ی آن وسیله تا هزینه کل حمل‌ونقل حداقل شود. همچنین روش حل‌های مناسبی نیز برای این مسأله معرفی شود و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

در مسائل و مدل‌هایVRP همواره این فرض برقرار بوده که وسایل نقلیه‌ی مورد نیاز جهت توزیع کالا، خریداری می‌شوند و به‌صورت آماده قابل استفاده و دردسترس‌اند. اما چنانچه اشاره شد با توجه به هزینه‌های وسایل نقلیه و نحوه‌ی خدمت‌رسانی به مشتریان و نیاز آن‌ها، درنظرگیری نحوه‌ی تأمین وسایل نقلیه نقش مؤثری در هزینه‌های کل دارد و در عمل تهیه ناوگان حمل‌ونقل از هزینه‌های درخور توجهی برخوردار است که این هزینه‌ها در ارتباط مستقیم با هزینه‌های مربوط به مسیریابی و حمل‌ونقل است. خرید یا اجاره، دو مورد از روش-های عمده‌ی تهیه ناوگان حمل‌ونقل می‌باشد. لذا هدف ما در پایان‌نامه این است که تصمیم‌گیری در مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه را در مدل CVRP که یکی از مدل‌های معروف و بسیار کاربردی از VRP است، وارد کنیم و کل هزینه‌های حمل‌ونقل اعم از هزینه‌های مربوط به مسیریابی و هزینه‌های مربوط به تدارک ناوگان را باهم درنظر گیریم و ضمن مدل‌سازی مسأله، مشخص کنیم وسایل نقلیه‌ی کدام مسیرها خریداری و وسایل نقلیه کدام مسیرها اجاره شوند تا هزینه‌ی کمتری در کل به‌بار آید. برای این امر با توجه به اینکه هزینه خرید در زمان فعلی اتفاق می‌افتد و هزینه اجاره در دوره‌های مختلف در افق برنامه‌ریزی پیش می‌آید، لازم است ارزش زمانی پول وارد مسأله شود. به‌عبارت دیگر در این پایان‌نامه، به‌دنبال آن هستیم که هزینه‌های تأمین وسایل نقلیه و هزینه-های مرتبط با مسیریابی را همزمان با درنظرگیری ارزش زمانی پول و فاکتورهای مربوط به آن کمینه کنیم. به-علاوه از آنجا که مسأله پایه *NP-hard* می‌باشد[۲]، برای حل مسأله پیشنهادی نیز از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌کنیم. روش‌های حل مسأله در دو حوزه‌ی زیر طراحی شده‌اند:

- ✓ طراحی روشی کارا برای پیدا کردن جواب‌های نزدیک به بهینه بر مبنای الگوریتم جهش قورباغه
- ✓ طراحی روشی کارا برای پیدا کردن جواب‌های نزدیک به بهینه بر مبنای الگوریتم ترکیبی شبیه-سازی تبرید موازی و الکترومغناطیس

[1] Capacitated VRP

۱-۵ معرفی ساختار تحقیق

ساختار این پژوهش در ادامه بدین صورت است، در فصل دوم به بیان مفاهیم و تعاریف مسأله مسیریابی وسایل نقلیه می‌پردازیم و انواع اصلی این مسأله را بر اساس یک دسته‌بندی منسجم بیان می‌کنیم. سپس به مرور ادبیات موضوع و تاریخچه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مسأله موردنظر می‌پردازیم. در فصل سوم، مسأله CVRP را با توجه به حالت خرید یا اجاره وسایل نقلیه درنظر می‌گیریم و مدل جدید مسأله را ارائه می‌کنیم. در فصل چهارم نیز روش‌های حل توسعه یافته برای مسأله موردنظر به تفصیل بیان می‌شود و در فصل پنجم به بررسی نتایج محاسباتی و تحلیل محاسباتی دو الگوریتم می‌پردازیم. در پایان، در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات آتی را بیان می‌کنیم.

فصل دوم
کلیات مسأله مسیریابی وسایل نقلیه

۲-۱ مقدمه

در این فصل به بیان کلیات مسأله مسیریابی وسایل نقلیه می‌پردازیم. تعاریف و مفاهیم اصلی در مسأله مسیریابی وسایل نقلیه را بیان کرده و انواع اصلی این مسأله را معرفی می‌کنیم. پس از آن به مرور ادبیات مسأله موردنظر یعنی CVRP می‌پردازیم.

۲-۲ تعریف مسأله

مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه، یکی از پرکاربردترین مسائل موجود در صنایع جهان است که دانتزینگ و رامسر این مسأله را در ۱۹۵۹ مطرح کردند[۱]. در حقیقت مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه یکی از جذاب‌ترین موضوعات تحقیق‌درعملیات است که با تعیین مسیرهایی با حداقل هزینه از یک انبار مرکزی به مجموعه‌ای از مشتریان در مکان‌های جغرافیایی مختلف، سرویس‌دهی می‌کند. این مسأله از دسته مسائل بهینه‌سازی ترکیبی در حمل‌ونقل است.

در این مسأله توزیع کالا در یک شبکه جاده‌ای و در یک دوره زمانی برای مشتریان انجام می‌شود، این امرتوسط مجموعه وسایل نقلیه‌ای به‌انجام می‌رسدکه در یک مرکز جا دارند. به‌این‌صورت‌که هر وسیله نقلیه مسیر

خود را از انبار آغاز کند و به آن ختم شود، به‌طوری‌که تمامی نیازمندی‌های مشتریان پاسخ داده شود و تمام محدودیت‌های عملی ارضاء گردد و کل هزینه‌ی حمل‌ونقل کمینه شود[۱].

۲-۳ مسأله پایه VRP

در این مسأله، هدف یافتن مسیرهایی با حداقل هزینه است که بتوان با m وسیله نقلیه به n مشتری خدمت-رسانی کرد.

شبکه جاده‌ای که برای حمل کالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، با گراف نشان داده می‌شود که در این گراف:

- گره‌ها، مکان‌های مشتریان و انبار را نشان می‌دهند.
- کمان‌ها، بخش‌های جاده‌ای یا خیابان‌ها هستند.
- خیابان‌های یک‌طرفه به‌صورت کمان‌های جهت‌دار می‌باشند و ماتریس هزینه آن‌ها نامتقارن است ولی خیابان‌های دوطرفه به‌صورت کمان‌های بدون جهت‌اند و ماتریس هزینه آن‌ها متقارن است.

گراف $G=(V,A)$ را در نظر بگیرید که $V=\{v_0,v_1,\ldots,v_n\}$ مجموعه‌ی گره‌های این گراف است؛ v_0 در این مجموعه نمایانگر انبار مرکزی است که هر وسیله نقلیه، مسیر توزیع خود را از آنجا آغازمی‌کند و سایر گره‌های داخل مجموعه‌ی V، نمایانگر مشتریان در مسیرهای توزیع هستندکه نیاز به سرویس‌دهی دارند. مجموعه‌ی $A=\{(v_i,v_j)\ ;\ i\neq j=1,\ldots,n\}$ نیز کمان‌های گراف را نشان می‌دهد که راه‌های ارتباطی بین مشتریان است. هر کمان (i,j) در شبکه، یک هزینه‌ی نامنفی c_{ij} و یک زمان نامنفی t_{ij} دارد. اگر به‌ازای تمامی کمان‌های موجود، مقادیر هزینه‌ی c_{ij} با مقادیر c_{ji} برابر باشد، مسأله‌ی موردنظر، مسیریابی وسایل نقلیه متقارن(SVRP[1]) نامیده می‌شود و اگر این مقادیر برابر نباشند، مسیریابی وسایل نقلیه نامتقارن(AVRP[2]) خواهد بود. به‌طورمعمول، هزینه‌ی کمان‌ها با توجه به مسافت بین گره‌ها و بر اساس فاصله‌ی اقلیدسی محاسبه می‌شود. همچنین در اغلب موارد، ماتریس هزینه از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند که این نامساوی در رابطه (۲-۱) آمده‌است[۱].

$$c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij} \quad \forall i,j,k \in V \qquad (۱-۲)$$

[1] Symmetric VRP
[2] Asymmetric VRP

در هر مسأله‌ی پایه VRP، برای هر مشتری i یک تقاضای غیرمنفی d_i وجود دارد که باید پاسخ‌دهی شود. ظرفیت قابل حمل توسط هر وسیله *(k)* نیز محدود است و با C_k نشان داده می‌شود، در این‌صورت که وسایل نقلیه متفاوت هستند، آن‌ها را ناهمگن خوانند. اگر همه‌ی وسایل یکسان باشند، ظرفیت آن‌ها نیز برابر و با C نشان داده می‌شود که در این‌صورت وسایل نقلیه را همگن گویند. این مسأله به‌دنبال یافتن مجموعه‌ای از k دور ساده است؛ هر دور متناظر با یک مسیر وسیله و با حداقل هزینه‌ی ممکن است که هزینه‌ی هر دور به‌صورت مجموع هزینه‌ی کمان-های هر دور تعریف می‌شود. فرض‌های اولیه که در هر مدل پایه CVRP درنظر گرفته می‌شود، به این ترتیب است[۱]:

- مبدا و مقصد (گره v_0) همه‌ی وسایل نقلیه یکسان است.
- هر مشتری فقط یکبار و تنها توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود.
- هر مشتری i دارای یک تقاضای غیر منفی d_i است.
- یک مجموعه از K وسیله‌ی یکسان با ظرفیت یکسان C در انبار در دسترس است.
- مجموع تقاضای همه مشتریان روی مسیر طی شده توسط وسیله نقلیه k نباید از ظرفیت وسیله نقلیه بیشتر باشد.

۲-۴ پیچیدگی مسأله

مسأله‌ی VRP از دسته مسائل *Np-hard* است[۲]. پیچیدگی این مسأله به این دلیل است که شامل دو مسأله‌ی فروشنده دوره‌گرد (TSP[1]) و مسأله‌ی بسته‌بندی(BPP[2]) می‌باشد[۳, ۴]. از آنجا که TSP از رده مسائل *NP* می‌باشد و قابل تبدیل به مسأله VRP است، مسأله VRP حداقل به سختی مسأله TSP شناخته شده و *Np-hard* می‌باشد. در مسأله VRP، با افزایش اندازه مسأله و تعداد محدودیت‌ها، حجم محاسبات به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ بنابراین بسیاری از مقالات از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسائل استفاده کرده‌اند.

۲-۵ دسته‌بندی مسائل VRP

با توجه به خصوصیات و محدودیت‌های دنیای واقعی، در کنار حالت ساده‌ی VRP، انواع بسیاری از VRP را می‌توان درنظر گرفت. تعداد انبارها، نوع وسیله نقلیه، نیازمندی‌های مشتریان و نحوه‌ی پاسخ‌گویی به آن‌ها، هر

[1] Travel Salesman Problem
[2] Bin Packing Problem