



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علوم و فنون مازندران  
دانشکده مهندسی صنایع

رساله دکتر رشته مهندسی صنایع گرایش صنایع

# مسیریابی و زمانبندی بهینه وسایل نقلیه برای جمع آوری سبز پسماندهای شهری

نگارش

عرفان بابایی تیرکلایی

استاد راهنما

دکتر ایرج مهدوی

دکتر میر مهدی سید اصفهانی

استاد مشاور

دکتر جرهارد-ویلهلم وبر

مهر ۱۳۹۸

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان،

به پاس عاطفه سرشار و کرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روز کاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می کرید،

و به پاس محبت های بی درنشان که هرگز فروکش نمی کند.

تقدیم به؛

مقدس ترین واژه ها در لغت نامه دلم،

مادر مهربانم که زندگیم را میون مهر و عطوفت او می دانم.

پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

همسر م که نشانه لطف الهی در زندگی من است.

## تقدیر و تشکر

لازم می‌دانم از زحمات جناب آقای دکتر ایرج مهدوی و دکتر میر مهدی سید اصفهانی به عنوان اساتید راهنما و آقای دکتر جرهارد-ویلهلم وبر به عنوان استاد مشاور که در مراحل مختلف این پروژه مرا یاری نموده و از راهنمایی‌های ارزشمندشان بهره‌مند ساخته‌اند کمال سپاسگذاری را داشته‌باشم.

## چکیده

**هدف:** کاهش هزینه های جمع آوری و حمل پسماندهای جامد شهری (MSW) با در نظر گرفتن اجزای مختلف تشکیل دهنده آن شامل هزینه های پیمودن مسافت های مورد نیاز وسایل نقلیه، هزینه های نشر دی اکسید کربن، هزینه های بکارگیری وسایل نقلیه مورد نیاز و هزینه های خروج از پنجره های زمانی.

**روش شناسی پژوهش:** ابتدا به مدلسازی مسأله جمع آوری MSW بر اساس توسعه دو مسأله معروف مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) و مسیریابی کمان (ARP) پرداخته و جهت مقابله شرایط عدم قطعیت حاکم در مسأله از رویکرد برنامه ریزی فازی مبتنی بر نظریه اعتبار بهره برده می شود. برای حل هر یک از مسائل به توسعه الگوریتم های فراابتکاری شامل الگوریتم های شبیه سازی تبرید (SA) و بهینه سازی گرگ خاکستری (GWO) برای مسأله VRP چندسفره همراه با پنجره های زمانی (MTVRPTW) و هم چنین الگوریتم های SA و مورچگان بیشینه-کمینه بهبودیافته (IMMAS) برای مسأله ARP چندسفره با پنجره های زمانی (MTCARPTW) می پردازیم. هم چنین، برای افزایش کارایی الگوریتم های پیشنهادی از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده است.

**یافته ها:** از نتایج بدست آمده از حل مسائل در شرایط قطعی مشخص شد که الگوریتم های GWO و IMMAS به ترتیب در مسائل MTCARPTW و MTCARPTW بهترین عملکرد را از خود نشان داده اند. هم چنین، پس از تعیین سطح بهینه اعتبار فازی در هر مسأله، به ارزیابی کارایی الگوریتم ها در شرایط فازی نیز پرداخته شد که باز هم نتایج مشابه با حالت قطعی بدست آمده است. از سوی دیگر، توابع هدف بدست آمده برای نمونه های تصادفی مسأله MTCARPTW مقادیر کمتری داشته اند که علت آن دقت بالای شبکه مسأله ARP نسبت به شبکه مسأله VRP می باشد. به همین دلیل برای ارزیابی کاربردی بودن متدولوژی پژوهش از فرمولاسیون پیشنهادی MTCARPTW و الگوریتم حل IMMAS بهره برده شد.

**نتیجه گیری:** به عنوان نتایج بدست آمده، می توان برتری متدولوژی پیشنهادی پژوهش در مقابل روش حل دقیق و هم چنین خروجی بهینه حاصل از حل مسأله مطالعه موردی اشاره نمود. در مسأله مطالعه موردی پس از تعیین سطح اعتبار به آنالیز حساسیت پارامتر بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه پرداخته شد که نتایج حاصل می تواند به عنوان یکی از ابزارهای مفید مدیریت سازمان مورد استفاده قرار بگیرد.

**کلیدواژه ها:** مسأله مسیریابی وسایل نقلیه، مسأله مسیریابی کمان، جمع آوری سبز پسماند، الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم مورچگان بیشینه-کمینه بهبودیافته.

## فهرست مطالب

### عنوان

### صفحه

فصل اول: اهداف و کلیات .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۱
۱-۲- بیان مسأله .....	۱
۱-۳- پرسش رساله .....	۹
۱-۴- اهداف رساله .....	۹
۱-۵- ساختار کلی رساله .....	۱۰
فصل دوم: مفاهیم مرتبط با مسائل مسیریابی کمان .....	۱۲
۲-۱- مقدمه .....	۱۲
۲-۲- معرفی مسائل VRP .....	۱۲
۲-۲-۱- مسأله CVRP .....	۱۴
۲-۲-۲- مسأله HFVRP .....	۱۷
۲-۲-۳- مسأله SDVRP .....	۱۷
۲-۲-۴- مسأله VRPPD .....	۱۷
۲-۲-۵- مسأله PVRP .....	۱۸
۲-۲-۶- مسأله MDVRP .....	۱۸
۲-۲-۷- مسأله VRPTW .....	۱۸
۲-۲-۸- مسأله MTRVP .....	۱۹
۲-۳- معرفی مسائل ARP .....	۱۹
۲-۳-۱- مسأله CARP .....	۲۳
۲-۳-۲- مسأله PCARP .....	۲۵

۲۶.....	CARPTW	مسأله ۳-۳-۲
۲۷.....	MDCARP	مسأله ۴-۳-۲
۲۷.....	SDCARP	مسأله ۵-۳-۲
۲۸.....	MCCARP	مسأله ۶-۳-۲
۲۸.....	SARP	مسأله ۲-۳-۷
۲۸.....	CARPIF	مسأله ۸-۳-۲
۲۸.....	MTCARP	مسأله ۲-۳-۹
۲۹.....	MSW	سوابق مطالعات مسیریابی برای جمع آوری
۴۵.....		جمع بندی و نتیجه گیری فصل ۲-۵
۴۶.....		<b>فصل سوم: تشریح مسأله و مدل سازی</b>
۴۶.....		۳-۱- مقدمه
۴۶.....		۳-۲- معیار سبز بودن
۵۰.....	MTVRPTW	مسأله ۳-۳
۵۶.....	MTCARPTW	مسأله ۳-۴
۶۱.....		۳-۵- جمع بندی و نتیجه گیری فصل
۶۳.....		<b>فصل چهارم: متدولوژی پژوهش</b>
۶۳.....		۴-۱- مقدمه
۶۳.....		۴-۲- عدم قطعیت
۶۴.....		۴-۳- برنامه ریزی در شرایط عدم قطعیت
۶۵.....		۴-۴- منطق فازی
۶۵.....		۴-۴-۱- تئوری فازی و معیار اعتبار فازی
۶۹.....		۴-۴-۲- مدل برنامه ریزی محدودیت شانس مبتنی بر نظریه اعتبار فازی

- ۳-۴-۴- اعمال نظریه اعتبار در مدل ریاضی ..... ۷۱
- ۴-۴-۴- تعیین سطح اعتبار بهینه ..... ۷۲
- ۴-۵- روش های حل مسأله MTVRPTW ..... ۷۴
- ۴-۵-۱- الگوریتم گرگ خاکستری ..... ۷۵
- ۴-۵-۲- الگوریتم شبیه سازی تبرید ..... ۸۰
- ۴-۵-۳- الگوریتم تولید جواب اولیه ..... ۸۱
- ۴-۵-۴- جستجوی محلی ..... ۸۲
- ۴-۵-۵- نمایش جواب ..... ۸۳
- ۴-۶- روش های حل مسأله MTCARPTW ..... ۸۴
- ۴-۶-۱- سیستم مورچگان ..... ۸۴
- ۴-۶-۲- الگوریتم جامعه مورچگان پیشینه-کمینه بهبود یافته ..... ۸۶
- ۴-۶-۳- الگوریتم شبیه سازی تبرید ..... ۹۰
- ۴-۶-۴- الگوریتم تولید جواب های اولیه ..... ۹۱
- ۴-۶-۵- جستجوی محلی ..... ۹۵
- ۴-۶-۶- نمایش جواب ..... ۹۷
- ۴-۷- طراحی آزمایشات با استفاده از روش تاگوچی ..... ۹۷
- ۴-۷-۱- تنظیم پارامتر الگوریتم های پیشنهادی پژوهش ..... ۹۹
- ۴-۸- جمع بندی و نتیجه گیری فصل ..... ۱۰۱
- فصل پنجم: نتایج محاسباتی ..... ۱۰۲**
- ۵-۱- مقدمه ..... ۱۰۳
- ۵-۲- تولید نمونه های تصادفی ..... ۱۰۳
- ۵-۳- نتایج عددی در حالت قطعی ..... ۱۰۵

۱۱۰	..... ۱-۳-۵- تعیین سطح بهینه اعتبار در مسائل
۱۱۶	..... ۴-۵- نتایج عددی در حالت فازی
۱۱۸	..... ۵-۵- مطالعه موردی
۱۲۵	..... ۱-۵-۵- آنالیز حساسیت مسأله مطالعه موردی
۱۲۶	..... ۶-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل
۱۲۸	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۸	..... ۱-۶- مقدمه
۱۲۸	..... ۲-۶- نتیجه‌گیری پژوهش
۱۳۱	..... ۳-۶- پیشنهادات آتی
۱۳۲	..... مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل ۲-۱. مسأله  $ARP$  ..... ۲۰
- شکل ۲-۲. مقایسه مسأله  $VRP$  و  $ARP$  ..... ۲۱
- شکل ۲-۳. نمایش انواع مختلف گراف ها در مسأله  $ARP$  ..... ۲۲
- شکل ۳-۱. فضای شماتیک مسأله  $MTVRPTW$  با سفرهای چندگانه ..... ۵۱
- شکل ۳-۲. فضای شماتیک مسأله  $MTCARPTW$  با سفرهای چندگانه ..... ۵۷
- شکل ۴-۱. تابع عضویت عدد فازی مثلثی. .... ۶۸
- شکل ۴-۲. بروزرسانی موقعیت در الگوریتم  $GWO$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۳. مکانیزم حمله به طعمه در برابر جستجوی طعمه. .... ۷۸
- شکل ۴-۴. شبه کد الگوریتم  $GWO$  (مجاهد و همکاران، ۲۰۱۶). .... ۷۹
- شکل ۴-۵. شبه کد الگوریتم  $SA$  (تیرکلایی و همکاران، ۲۰۱۸). .... ۸۱
- شکل ۴-۶. فلوچارت الگوریتم ابتکاری تولید جواب اولیه. .... ۸۲
- شکل ۴-۷. عملگر جابجایی در جستجوی محلی. .... ۸۳
- شکل ۴-۸. عملگر تعویض در جستجوی محلی. .... ۸۳
- شکل ۴-۹. عملگر  $2-Opt$  در جستجوی محلی. .... ۸۳
- شکل ۴-۱۰. عملگر  $Or-Opt$  در جستجوی محلی. .... ۸۳
- شکل ۴-۱۱. نمایش جواب تولید شده الگوریتم های فراابتکاری  $MTVRPTW$  ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۲. فلوچارت پیشنهادی الگوریتم  $IMMAS$  ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۳. روش انتخاب یال جهت سرویس دهی. .... ۹۴
- شکل ۴-۱۴. نمایش جواب تولید شده الگوریتم های فراابتکاری  $MTCARPTW$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۱۵. میانگین نرخ  $S/N$  برای تعیین پارامترهای  $SA$  ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱. ناحیه مشخص شده جهت مطالعه در سپاهان شهر. .... ۱۱۹
- شکل ۵-۲. شبکه گراف شهری متناظر با ناحیه مشخص شده منطقه سپاهان شهر. .... ۱۲۰

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲. مقایسه پژوهش های مرتبط انجام شده در ادبیات موضوع در بازه زمانی ..... ۳۹
- جدول ۱-۳. مقایسه رویکرد سوخت محور در برابر با رویکرد مسافت محور. .... ۴۷
- جدول ۲-۳. برآورد میزان فاکتور نشر برای یک کامیون ۱۰ تن. .... ۴۹
- جدول ۱-۴. علائم بکار رفته در طراحی الگوریتم *IMMAS* ..... ۸۸
- جدول ۲-۴. پارامترهای الگوریتم *SA*. .... ۱۰۰
- جدول ۳-۴. پارامترهای الگوریتم *GWO*. .... ۱۰۱
- جدول ۴-۴. پارامترهای الگوریتم *IMMAS*. .... ۱۰۱
- جدول ۱-۵. ابعاد مسائل نمونه. .... ۱۰۴
- جدول ۲-۵. مقادیر پارامترهای مدل های ریاضی. .... ۱۰۴
- جدول ۳-۵. نتایج محاسباتی *MTVRPTW* در ابعاد کوچک و متوسط تحت حالت ..... ۱۰۹
- جدول ۴-۵. نتایج محاسباتی *MTCARPTW* در ابعاد کوچک و متوسط تحت حالت .... ۱۱۰
- جدول ۵-۵. نتایج محاسباتی بدست آمده از حل مسأله *MTVRPTW* بر اساس نظریه ..... ۱۱۵
- جدول ۶-۵. نتایج محاسباتی بدست آمده از حل مسأله *MTCARPTW* بر اساس ..... ۱۱۷
- جدول ۷-۵. نتایج محاسباتی *MTVRPTW* برای سطح اعتبار ۰.۷ ..... ۱۲۰
- جدول ۸-۵. نتایج محاسباتی *MTCARPTW* برای سطح اعتبار ۰.۶ ..... ۱۲۱
- جدول ۹-۵. مقادیر برآورد شده فاکتور نشر کربن دی اکسید وسایل نقلیه مسأله مطالعه ..... ۱۲۵
- جدول ۱۰-۵. نتایج بدست آمده به ازای سطوح مختلف اعتبار در مسأله مطالعه موردی ..... ۱۲۶

## فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۱. روند رشد جمعیت کشورهای شاخص از سال ۱۷۰۰-۲۰۱۶..... ۳
- نمودار ۱-۲. پیش بینی جمعیت جهان و روند رشد آن تا سال ۲۱۰۰ میلادی..... ۴
- نمودار ۱-۵. مقایسه زمان حل روش های پیشنهادی حل MTVRPTW..... ۱۱۲
- نمودار ۲-۵. مقایسه زمان حل روش های پیشنهادی حل MTCARPTW..... ۱۱۲
- نمودار ۳-۵. مقایسه درصد انحراف روش های پیشنهادی حل MTVRPTW..... ۱۱۳
- نمودار ۴-۵. مقایسه درصد انحراف روش های پیشنهادی حل MTCARPTW..... ۱۱۳
- نمودار ۵-۵. تغییرات تابع هدف کل به ازای Crهای مختلف در مسأله MTVRPTW..... ۱۱۹
- نمودار ۶-۵. تغییرات تابع هدف کل به ازای Crهای مختلف در مسأله MTCARPTW..... ۱۱۹
- نمودار ۷-۵. نوسانات مرتبط با هزینه های ارزیابی شده در مقابل سطوح مختلف اعتبار..... ۱۲۸
- نمودار ۸-۵. آنالیز حساسیت پارامتر بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه..... ۱۳۰



## فصل اول: اهداف و کلیات

### ۱-۱- مقدمه

هدف از این بخش، شرح مختصر موضوع تحقیق و اهمیت آن شامل اهداف علمی، کاربردی و ضرورت های انجام تحقیق با اشاره ای کوتاه به رویکردها و مراحل انجام آن است. هم چنین در ادامه به مفروضات مورد بررسی در تحقیق، به کاربردهایی که می توان پس از بررسی موضوع متصور شد و نهایتاً به نوآوری های موجود در پژوهش پیش رو اشاره می گردد.

### ۱-۲- بیان مسأله

پسماندهای تولید شده در مناطق شهری در حالت جامد، پسماندهای جامد شهری<sup>۱</sup> (MSW) نامیده می شوند. پسماندهای تولید شده توسط منازل مسکونی، و پسماندهای مشابه تولید شده توسط واحدهای تجاری، صنعتی، و موسساتی از قبیل مدارس، بیمارستان، مراکز مراقبت، و مراکز عمومی شامل خیابان ها، بازارها، ایستگاه های اتوبوس، پارک ها، سرویس های بهداشتی عمومی، و کشتار گاه ها و ... بیانگر انواع مختلف MSW می باشد

---

<sup>1</sup> Municipal Solid Waste

(وهاب<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲). بر اساس تعریف آژانس حفاظت محیط زیست ایالت متحده<sup>۲</sup> (USEPA)، MSW موادی هستند که به طور سنتی توسط شهرداری ها از طریق سوزاندن، دفن کردن، بازیافت یا کمپوست کردن مدیریت می شوند (USEPA، ۲۰۰۸). مدیریت و دفع نامناسب MSW منجر به شیوع انواع آلودگی های آب، خاک، و هوای می شود. عدم جمع آوری بموقع و دفع نامناسب پسماندها منجر به آلودگی های منابع آبی زیرزمینی و سطحی می شود. در مناطق شهری، MSW منجر به ایجاد شیرابه های راکد متناسب با رشد حشرات و شیوع انواع بیماری ها می گردد. از طرفی دیگر، نشر گازهای گلخانه ای<sup>۳</sup> (GHG) مرتبط با حمل و نقل MSW در دهه های اخیر توجهات بسیاری را از جمله در اتحادیه اروپا<sup>۴</sup> (EU) به خود جلب کرده است (اینقلز و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۶). بر اساس اظهارات آژانس محیط زیست اروپا<sup>۶</sup> (EEA)، جمع آوری و حمل و نقل پسماند که مستقیماً با حجم زباله تولید شده مرتبط است، حداکثر ۵٪ از نشر مستقیم GHG مربوط به بخش پسماند را شامل می شود، که عمدتاً به دلیل فواصل کوتاهی است که MSW حمل می شود. اگرچه، این رقم با پیروی از رشد نامطلوب نشر GHG مرتبط با حالات مختلف حمل و نقل به حدود ۴۰٪ از نشر خالص گازهای گلخانه ای در سال ۲۰۲۰ خواهد رسید (EEA، ۲۰۰۸). جمعیت جهان در ۱۰ سال اخیر رشد بسیار چشمگیری داشته است بطوریکه در هر سال داری سرعت رشد متوسط ۱.۱٪ بوده است. جمعیت کره زمین بر اساس برآورد اداره آمار آمریکا در دسامبر ۲۰۱۷ بیش از ۷ میلیارد و ۶۰۰ میلیون نفر برآورد شد<sup>۷</sup>. جمعیت جهان تا کنون حدود ۷,۶۴۰,۸۰۰,۰۰۰ در تاریخ آگوست سال ۲۰۱۸ به ثبت رسیده است<sup>۸</sup>. این رشد چشمگیر اساساً به دلیل پیشرفت های پزشکی و کشاورزی بوده است. اگر سرعت رشد جمعیت همگام با این نرخ باشد، تخمین زده می شود که

<sup>1</sup> Wahab

<sup>2</sup> United States Environmental Protection Agency

<sup>3</sup> Greenhouse Gas

<sup>4</sup> European Union

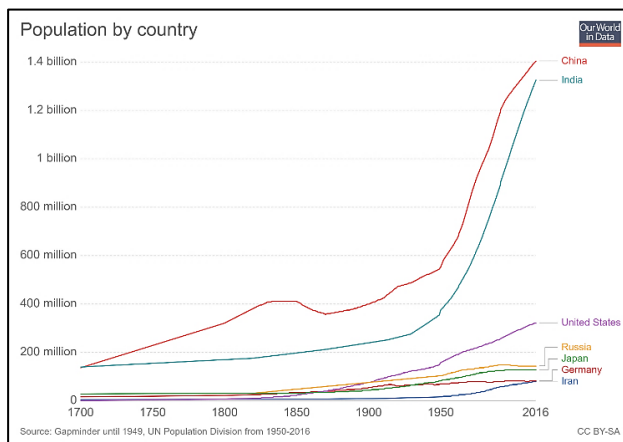
<sup>5</sup> Inghels et al.

<sup>6</sup> European Environment Agency

<sup>7</sup> <http://www.census.gov/population/popclockworld.html>

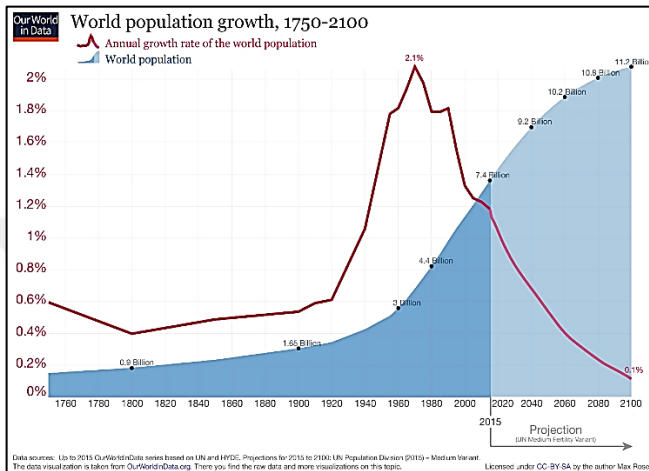
<sup>8</sup> <http://www.worldometers.info/world-population>

جمعیت جهان تا سال ۲۰۴۰ به حدود ۹ میلیارد برسد (Gapminder، ۲۰۱۷). شکل ۱ این نرخ افزایش را برای برخی از کشورهای شاخص تا سال ۲۰۱۶ و شکل ۲ نرخ افزایش جمعیت جهان تا سال ۲۱۰۰ را با در نظر گرفتن جمعیت کل پیش بینی شده نشان می دهد. گسترش بی رویه شهرها و در نتیجه افزایش بی رویه جمعیت شهری به ویژه در سال های اخیر موجب افزایش بیش از پیش مصرف و در نتیجه افزایش تولید انواع پسماند در مناطق شهری گردیده است، بطوریکه در سال ۲۰۱۲، شهرهای مختلف جهان ۱.۳ میلیارد تن پسماند جامد تولید کرده که معادل با سرانه ۱.۲ کیلوگرم به ازای هر شخص در روز می باشد<sup>۱</sup>. با این روند پیش رو و افزایش نرخ جمعیت و شهرنشینی، مورد انتظار است که تا سال ۲۰۲۵ نرخ سالانه تولید پسماند به ۲.۲ میلیارد تن برسد<sup>۲</sup>. در واقع، این مسأله در اروپای غربی بسیار چشمگیر است؛ علی رغم وجود سیستم آموزشی موفق و افزایش آگاهی، تولید سرانه سالیانه تولید زباله جامد بالغ بر ۶۰۰ کیلوگرم می باشد (Gapminder، ۲۰۱۷).



نمودار ۱-۱. روند رشد جمعیت کشورهای شاخص از سال ۱۷۰۰-۲۰۱۶ (Gapminder، ۲۰۱۷).

<sup>1</sup> <https://www.statista.com/markets/408/topic/435/waste-management/>



نمودار ۱-۲. پیش بینی جمعیت جهان و روند رشد آن تا سال ۲۱۰۰ میلادی (Gapminder، ۲۰۱۷).

این حجم از تولید پسماند، منجر به افزایش بودجه ضروری لازم جهت جمع آوری و انتقال می باشد. بودجه اختصاص داده شده در بخش مدیریت پسماند شهری در شهر تورنتوی کانادا در سال ۲۰۱۸ معادل با ۳۸۲.۲ میلیون دلار می باشد (Toronto City Council، ۲۰۱۸).

در مالزی نیز، سازمان های محلی مرتبط به شهرداری سالانه بالغ بر ۱ میلیارد دلار برای مدیریت زباله جامد تولید شده در سراسر کشور می پردازند که در حقیقت، این بودجه تقریباً برابر ۷۰ تا ۸۰ درصد از درآمد های این سازمان ها می باشد (بودهیارتا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲). در این مورد به یک مدیریت دقیق و کارا جهت تضمین سطح خدمت ضروری که ضامن سلامتی مردم باشد و تعیین شرایطی برای حداکثر بازیافت و استفاده دوباره از زباله، نیاز داریم. متأسفانه، به کارگیری یک سیستم مدیریتی زباله با منابع محدود در دسترس شهرداری ها که معمولاً وظیفه جمع آوری و دفع را دارند، کاری بسیار دشوار است. در کشور ایران نیز تقریباً ۸۰٪ از هزینه های مربوط به زباله ها هزینه جمع آوری زباله می باشد از این لحاظ شهرداری ها هزینه های سنگینی را متحمل می شوند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۴).

<sup>1</sup> Budhiarta et al.

طبق آمارهای منتشرشده از سوی سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup> (WHO)، روزانه بیش از ۵.۳ میلیون تن زباله در جهان تولید می‌شود. براساس اعلام سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۸ سرانه تولید جهانی زباله در هر روز برابر با ۳۰۰ گرم است. این درحالی است که این رقم برای ایرانی‌ها به بیش از ۷۱۰ گرم و برای تهرانی‌ها ۷۹۰ گرم یعنی ۲.۵ برابر متوسط جهانی است.<sup>۲</sup> در واقع، استان تهران با تولید روزانه حدود ۸۰۰۰-۹۰۰۰ تن، بیشترین تولید زباله خانگی و شهری را در کشور به خود اختصاص داده است که جمع آوری آن هزینه‌های بسیار هنگفتی برای شهرداری در بر دارد. این فاکتورها بیانگر آن است که چرا در این چند دهه اخیر یکی از مهم‌ترین مسائل نگران‌کننده جوامع بشری، مدیریت زباله بوده است. مناطق شهری بیشترین مقدار زباله را تولید می‌کنند و به یک سیستم کارا جهت جمع آوری زباله و دفع آن نیاز است. تعیین و تثبیت یک سیستم مدیریت جمع آوری زباله مناسب بسیار مشکل و هزینه‌بر است. در واقع، فرآیند مدیریت مواد زائد جامد شهری از ملزومات هر شهر می‌باشد که بی‌توجهی به آن می‌تواند برای هر شهری و حتی ساکنان روستاهای اطراف شهر مشکل‌آفرین باشد. پسماندهای جامد شهری باید پس از تولید در یک محل مناسب با توجه به شرایط بهداشتی و رعایت نکات بهداشتی نگهداری شده و مراحل عملیاتی جمع آوری و انتقال در سریعترین زمان ممکن انجام شود که بهترین روش، جمع آوری مستقیم از درب منازل و انتقال به محل دفع می‌باشند (دفن یا سایر پردازش‌های دیگر). در مراحل نگهداری و جمع آوری نقش آموزش و همکاری متقابل بین تولیدکنندگان زباله و پرسنل خدمات شهری در افزایش راندمان عملیات بسیار مؤثر است. بهترین روش جمع آوری زباله‌ها بطور روزانه است که در کنترل و جلوگیری از آلودگی‌های بالقوه نقش موثری دارد و بهترین زمان جمع آوری در ساعاتی از شبانه روز است که مناطق شهری کم‌تردد بوده و ترافیکی وجود نداشته باشد (تیرکلایی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸). هزینه‌های آشکار اجرای یک سیاست زیست محیطی شامل هزینه‌های مدیریتی،

<sup>1</sup> World Health Organization

<sup>2</sup> <https://www.eghtesadonline.com/> -بخش اقتصاد-کلان-۳/۴۱۷۸۴-گردش مالی-زباله-در-

<sup>3</sup> Tirkolaee et al.

نظارتی و اجرایی آن است که توسط بخش عمومی پرداخت می شود. به علاوه هزینه های مربوط به رعایت مقررات مورد قبول نیز توسط همه بخش ها پرداخت می شود.

براساس مطالب ذکر شده اهمیت سیستم بهینه جمع آوری زباله بیش از پیش مشخص می شود. بنابراین انتخاب سیاست بهینه جمع آوری زباله در بحث مسیریابی و سایل نقلیه نقش مهمی در کاهش هزینه ها دارد. در اکثر کشورها، مسائل جمع آوری زباله بطور مکرر به عنوان مسائل زیست محیطی و آلودگی در نظر گرفته می شوند. بنابراین روش های فراوانی برای گسترش و بهبود سیاست ها و مدیریت اجرایی زباله اعمال شده است (سیمونتو و بورنشتین<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). جدا از این مطالعات انجام شده، محققان بسیار کمی به بهبود عملیات و سایل نقلیه در جمع آوری زباله پرداختند. امروزه تولید انواع زباله های جامد و بروز انواع ناسازگاری های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی مربوط به آن ها، مدیریت خدمات شهری را با مشکلات عدیده ای در زمینه جمع آوری، حمل و نقل، پردازش و دفع این گونه زائدات مواجه ساخته است. از آن جا که بین ۷۵ تا ۸۰ درصد هزینه های مدیریت مواد زاید جامد مربوط به بخش جمع آوری و حمل و نقل زباله ها می باشد، ارزیابی این سیستم و بهینه سازی آن، نقش به سزایی در کاهش و حل مشکلات مدیریت خدمات شهری به دنبال خواهد داشت (تیرکلایی و همکاران، ۲۰۱۸). مواد زباله ای باید با رعایت نکات بهداشتی در سریع ترین زمان ممکن جمع آوری، منتقل و دفع گردند که بهترین روش مرتبط، جمع آوری مستقیم از درب منازل و انتقال به محل دفع می باشد. براساس مطالب ذکر شده اهمیت سیستم بهینه جمع آوری زباله بیش از پیش مشخص می شود. بنابراین انتخاب سیاست بهینه جمع آوری زباله نقش مهمی در کاهش هزینه ها دارد. امروزه مسائل مختلفی از مسیریابی و سایل نقلیه در رابطه با جمع آوری زباله های جامد وجود دارد. مدیریت پسماند به دلیل احتیاج به بودجه های کلان مالی و تاثیرگذاری بر محیط زیست، از جمله فعالیت های گسترده است که نیازمند جمع آوری، حمل و نقل، انتقال و سرانجام دفع در سطوح مختلف تصمیم گیری های عملیاتی، تاکتیکی و استراتژیک است که بخش

---

<sup>1</sup> Simonetto and Borenstein

عمده هزینه های آن در بخش لجستیک و حمل و نقل آن است (کوفی و کوآد<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). همچنین از جمله مواردی که باید همواره مد نظر قرار گرفت این است که در بسیاری از مسائل بهینه سازی در دنیای واقعی با عدم قطعیت داده ها مواجه هستیم. در بسیاری از مسائل فرض می شود که داده های ورودی دقیقاً معلوم هستند و اثر عدم قطعیت داده ها بر روی بهینگی و موجه بودن مدل نادیده گرفته می شود. بدین منظور بهترین برآوردی را که از داده های مورد نیاز مدل در دست است به عنوان داده های قطعی مدل استفاده می گردد. بنابراین به نظر می رسد که به محض اینکه داده ها مقادیری غیر از مقادیر برآورد شده ی خود بگیرند ممکن است برخی از محدودیت ها نقض شده و جواب بهینه قبلی بدست آمده دیگر بهینه و حتی موجه نباشد. این امر موجب می شود تا مسائل با دیدی غیر واقعی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند. بنابراین از جمله پیچیدگی های مسأله مدیریت پسماند شهری، وجود شرایط عدم قطعیت در داده ها از جمله تقاضای موجود می باشد که برنامه ریزی در شرایط عادی را دچار اختلال می کند (تیر کلایی و همکاران، ۲۰۱۶).

در گذشته، جمع آوری پسماند شهری بدون هیچ تحلیل انجام شده بر روی تقاضا و مسیریابی های بهینه انجام می گرفته است. با توسعه شهرها، و افزایش اهمیت پیاده سازی سیستم کارای جمع آوری پسماند، مشخص شد که باید روشی را مد نظر قرار داد که راه حلی تولید کند که بتواند حداکثر پذیرش عمومی را به خود اختصاص دهد. علی رغم اینکه تحقق این امر در گام اول سخت بوده است، روش های متفاوتی به جهت تمرکز بر روی طول مسیرها، هزینه ها، تعداد وسایل نقلیه جمع آوری مورد نیاز و ... توسعه پیدا کردند.

اساساً، جمع آوری پسماند یک مسأله مسیریابی وسایل نقلیه<sup>۲</sup> (VRP) می باشد و تمامی ویژگی های آن را دارا می باشد (بلین و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱). از سوی دیگر، همواره در بحث جمع آوری پسماندهای شهری، اولویت سرویس دهی به دلیل وجود انواع مختلف زباله مطرح می باشد. از آنجاییکه مراکز تقاضایی هم چون بیمارستان ها، درمانگاه ها و ...

<sup>1</sup> Coffey and Coad

<sup>2</sup> Vehicle Routing Problem

<sup>3</sup> Beliën et al.

تولید کننده زباله های خطرناک تری نسبت به زباله های مناطق مسکونی می باشند، سرویس دهی به این مناطق از دارای اولویت های بالاتری است که همواره از جمله محدودیت های عملیاتی مهم پیش روی سازمان می باشد. بحث اولویت های سرویس دهی در مسائل مسیریابی به صورت در نظر گرفتن پنجره های زمانی سخت و نرم یک طرفه و دو طرفه مورد بررسی قرار می گیرد.

گولدن و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) مسائل مسیریابی در جمع آوری زباله را به سه دسته زیر طبقه بندی کردند:

#### ۱) مسأله مسیریابی گره<sup>۲</sup> (NRP)

این مسأله شامل جمع آوری زباله های تجاری از قبیل زباله های رستوران ها، سازمان ها و... است، بطوریکه از کانتینرهای بزرگی که در خیابان های اصلی شهر وجود دارند و بیانگر گره ها هستند، توسط وسایل نقلیه بارگیری می شود.

#### ۲) مسأله مسیریابی کمان<sup>۳</sup> (ARP)

این مسأله شامل جمع آوری زباله خانگی در یک شبکه از خیابان ها و کوچه ها در سطح شهر است، بطوریکه زباله ها در قفسه های کوچک و یا کیسه های زباله قرار دارند. در این مسأله در واقع محل دقیق هر مشتری مورد نیاز نیست.

#### ۳) مسأله Roll-on Roll-off

این مسأله شامل جمع آوری زباله کانتینرهای اسکپ (یک کانتینر بزرگ روباز زباله جهت بارگیری نوعی از کامیون می باشد) است، بطوریکه جمع آوری زباله در مکان های ساخت و ساز از کانتینرهای بسیار بزرگ انجام می گیرد، اندازه این کانتینرها بسیار بزرگتر از اندازه کانتینرهای زباله های تجاری است. عموماً، در این مسأله ابتدا کانتینرهای پر را جمع آوری کرده و سپس به محل دفع زباله جهت تخلیه کردن آن ها می برند، در نهایت کانتینرها را به مکان خود باز می گردانند. در ادبیات، این مسأله به مسأله Roll-on Roll-off مشهور است.

<sup>1</sup> Golden et al.

<sup>2</sup> Node Routing Problem

<sup>3</sup> Arc Routing Problem

تمامی مسائل بالا بر اساس ویژگی هایی که دارند می توانند در جمع آوری پسماند شهری کاربرد داشته باشند. در حالت کلی و جامع مسائل مسیریابی گره مطرح می باشند که قابلیت تعمیم به تمامی مسائل مسیریابی در بحث جمع آوری زباله را دارد (توث و ویگو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴).

در نهایت، نتیجه می شود که جمع آوری و حمل و نقل پسماندهای شهری به عنوان یکی از فعالیت های بزرگ شهری شامل هزینه های کلان و مشکلات عملیاتی بسیاری است که به دلیل وجود هزینه های سرمایه گذاری (ناوگان وسایل نقلیه، سکوها، تخلیه و ... ) و هزینه های عملیاتی بالا (سوخت، نگهداری و تعمیرات و...) بسیار هزینه بر است و ایجاد بهبودهای کوچک در این حوزه باعث صرفه جویی های بزرگ اقتصادی و زیست محیطی می گردد. هم چنین، از جمله مسائل مطرح عدم وجود اطلاعات کافی و شرایط عدم قطعیت داده هایی از جمله حجم پسماند تولید شده است. مطالعه، بررسی و بهینه سازی مسأله جمع آوری پسماند در شرایط عدم قطعیت می تواند در تصمیم گیری مناسب مدیران و تصمیم گیران در این حوزه نقش بسزایی داشته باشد.

### ۱-۳- پرسش رساله

برای پیاده سازی سیستم بهینه جمع آوری مدیریت پسماندهای شهری با در نظر گرفتن ماهیت غیرقطعی حجم پسماند تولیدی، به چه نوع و چه تعداد امکانات و تسهیلاتی از جمله انواع مختلف وسایل نقلیه مورد نیاز است و برنامه ریزی مسیرهای بهینه و سرویس دهی وسایل نقلیه به چه صورت باشد تا هزینه های کل سازمان شامل کمینه سازی هزینه های سرویس دهی و مسیریابی با حفظ رویکرد سبز در حمل و نقل برآورده شوند؟ در نهایت، بهترین نحوه مدل سازی و برخورد با مسأله به چه صورت است؟

### ۱-۴- اهداف رساله

هدف اصلی این تحقیق پیاده سازی یک سیستم برنامه ریزی کارا برای جمع آوری و حمل و نقل پسماندهای شهری با استفاده از حل مسأله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت موجود در دنیای واقعی می باشد، به طوریکه نتایج بدست

<sup>1</sup> Toth and Vigo

آمده از تحقیق قابلیت پیاده سازی در سازمان های خدمات شهری با کمترین درجه انحراف را داشته باشد. مسیریابی، زمانبندی و تخصیص بهینه وسایل نقلیه مختلف به این دسته از مسائل با در نظر گرفتن انواع پسماندهای عادی و خطرناک، یکی از تصمیم گیری های مهم سازمان هایی هم چون شهرداری ها در بحث جمع آوری زباله شهری می باشد؛ چرا که با استفاده از آن و تحلیل نتایج بدست آمده در شرایط مختلف، راحتی می توانند سیاست های پیشنهادی را ارزیابی و سیاست بهینه را انتخاب نمایند.

از سوی دیگر، وجود درجه بالایی از عدم قطعیت در میزان پسماند تولید شده در مناطق شهری منجر به آن می شود که جواب های بدست آمده از حل مسأله در شرایط ایستا و قطعی با احتمال بالایی غیرقابل پیاده سازی و ناموجه باشد. به همین دلیل، در گام بعدی با وارد کردن شرایط عدم قطعیت و اعمال روش های متناسب برخورد با آن با استفاده از برنامه ریزی فازی<sup>۱</sup> مسأله مورد تحلیل قرار می گیرد. بنابراین، هدف نهایی تحقیق توسعه و تحلیل مدل های ریاضی با در نظر گرفتن شرایط موجود در دنیای واقعی برای حل مسأله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه در بحث جمع آوری و حمل و نقل پسماندهای جامد شهری با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت می باشد که به دنبال بهینه سازی هزینه های کل سازمان با حفظ رویکرد دوستدار محیط زیست می باشد.

### ۱-۵- ساختار کلی رساله

در فصل دوم ابتدا به بررسی مفاهیم پایه ای و مبانی نظری موجود در ادبیات مسأله VRP و ARP پرداخته می شود. در ادامه، نسخه های مختلف کاربردی در بحث مدیریت MSW برای این مسائل با ارائه پژوهش های ابتدایی انجام گرفته بررسی می شود. در نهایت نیز، مهم ترین و مرتبط ترین کارهای تحقیقاتی در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۹ بررسی و مورد مقایسه با پژوهش فعلی قرار می گیرد. فصل سوم به تشریح فضای مسأله و مفروضات و محدودیت های موجود در گام اول می پردازد. سپس فرمولاسیون پیشنهادی پژوهش برای مسائل توسعه یافته VRP و ARP ارائه می گردد. در فصل چهارم، رویکرد مقابله با عدم

<sup>۱</sup> Fuzzy programming

قطعیت؛ یعنی برنامه ریزی فازی مبتنی بر نظریه تئوری اعتبار<sup>۱</sup> مورد بحث قرار می گیرد. سپس، روش های حل پیشنهادی مسأله شامل الگوریتم های حل شبیه سازی تبرید<sup>۲</sup> (SA)، بهینه سازی گرگ خاکستری<sup>۳</sup> (GWO)، بهینه سازی کلونی مورچگان<sup>۴</sup> (ACO) به طور کامل تشریح می شود. در فصل پنجم نتایج محاسباتی پژوهش و مقایسه رویکردهای قطعی و غیر قطعی و روش های حل، و هم چنین مقایسه خروجی مسائل VRP و ARP توسعه یافته پژوهش ارائه می شود. هم چنین، یک مسأله مطالعه موردی نیز در نهایت نیز، در فصل ششم، نتیجه گیری پژوهش و هم چنین بررسی محدودیت های پیش رو و در نهایت مسیر پژوهش های آتی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می گیرد.

---

<sup>1</sup> Credibility theory

<sup>2</sup> Simulated annealing

<sup>3</sup> Grey wolf optimization

<sup>4</sup> Ant colony optimization

## فصل دوم: مفاهیم مرتبط با مسائل مسیریابی کمان



### ۲-۱- مقدمه

این فصل، به بررسی مفاهیم اولیه مسائل VRP و ARP و معرفی نسخه های کاربردی آن ها در بحث مدیریت MSW می پردازد. سپس، مهمترین پژوهش های انجام گرفته در سال های اخیر مبتنی بر مسأله جمع آوری و حمل و نقل پسماندهای شهری به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۲-۲- معرفی مسائل VRP

این مسأله در یک نگاه اولین بار توسط دانتریگ و رامسر<sup>۱</sup> (۱۹۵۹) با معرفی مسأله ارسال وسیله نقلیه<sup>۲</sup> آغاز شد. آن ها یک مدل خطی و روش حل ابتکاری برای حل مسأله با ۱۲ نقطه تحویل (مشتری) و یک نقطه قرارگاه برای توزیع مواد نفتی ارائه کرده اند. از آن زمان به بعد نظریات، کارهای عملی، تکنولوژی کامپیوتر پیشرفت های زیادی کردند، بنابراین امروزه مسیریابی وسایل نقلیه یکی از موفقیت های بزرگ در تحقیق در عملیات

---

<sup>1</sup> Dantzig and Ramser

<sup>2</sup> Truck dispatching problem

محسوب می‌شود.

در اوایل دهه ۷۰، بعد از افزایش قیمت نفت در کل جهان، تحقیق در مسائل مسیریابی حمل و نقل بطور چشمگیری توسعه پیدا کرد به نحوی که اثرات بزرگی بر هزینه‌های عملیاتی و وسایل نقلیه گذاشت. افزایش پیوسته قیمت نفت سرانجام موجب شد تا مسئولان حمل و نقل و مدیران یک برنامه‌ریزی مسیریابی با کمترین هزینه برای سرویس‌دهی به مشتریان انجام دهند. این امر باعث آن شد تا شاغلان صنعت در حرفه حمل و نقل همیشه به دنبال راه‌هایی جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی و وسایل نقلیه و بهبود خدمات بصورت همزمان باشند.

برای ایجاد یک مسیر کارا و کم‌هزینه، ریاضیات نقش مهمی را به ویژه در تحقیق در عملیات که شامل مدل‌های ریاضی فراوانی در بهینه‌سازی، مدل‌سازی و روش‌های کمک‌کننده به مدیران جهت تصمیم‌گیری است، ایفا می‌کند. در واقع، مسأله مسیریابی بدنبال ساخت یک یا مجموعه‌ای از تورها با توجه به شبکه گراف در نظر گرفته شده می‌باشد، به طوری که بتواند تقاضای تمامی مشتریان را با بهینه‌سازی هدف یا اهداف مسأله پوشش دهد.

تمامی انواع مسائل مسیریابی به نوعی یک حالت خاص از مسأله فروشنده دوره‌گرد می‌باشند. در حقیقت با استفاده از این مسأله بدنبال مدل‌سازی موارد حقیقی موجود در دنیای واقعی با هدف پوشش تقاضای مشتریان هستیم (توث و همکاران، ۲۰۱۴). اجزای یک مسأله مسیریابی عبارتند از: شبکه، هزینه، تقاضا، ناوگان و وسایل نقلیه، محدودیت ظرفیت و وسایل نقلیه و اهداف.

مسأله VRP دارای نسخه‌های متنوع و توسعه یافته بسیاری است که همچنان مورد توجه اکثر پژوهشگران در زمینه برنامه‌ریزی حمل و نقل می‌باشد (تیرکلایی و همکاران، ۲۰۱۷؛ میرمحمدی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷؛ سویسال و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸؛ هوبنر و استرمیر<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸). در این بخش، مهم‌ترین مسائل تعمیم داده شده VRP برای مطالعه مسأله جمع

<sup>1</sup> Mirmohammadi et al.

<sup>2</sup> Soysal et al.

<sup>3</sup> Hubner and Ostermeier

آوری MSW را می‌توان در دسته‌های زیر مورد بررسی قرار داد:

- ۱) مسیریابی وسیله نقلیه با ظرفیت محدود وسایل نقلیه<sup>۱</sup> (CVRP)،
- ۲) مسیریابی وسیله نقلیه با ناوگان ناهمگن<sup>۲</sup> (HFVRP)،
- ۳) مسیریابی وسیله نقلیه با تقسیم تحویل<sup>۳</sup> (SDVRP)،
- ۴) مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و جمع آوری<sup>۴</sup> (VRPPD)،
- ۵) مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه<sup>۵</sup> (PVRP)،
- ۶) مسیریابی وسیله نقلیه چند قرارگاهی<sup>۶</sup> (MDVRP)،
- ۷) مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر گرفتن پنجره زمانی<sup>۷</sup> (VRPTW)،
- ۸) مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر گرفتن سفرهای چندگانه<sup>۸</sup> (MTVRP)،

هر ترکیب بالقوه‌ای از این نسخه‌ها می‌تواند به عنوان یک نسخه جدید معرفی گردد. این در حالی است که در این پژوهش، ترکیبی از مسأله CVRP، HFVRP، VRPTW و MTVRP می‌باشد که بتوان مسأله‌ای یکپارچه و مناسب برای بهینه‌سازی مدیریت پسماند شهری ارائه نمود. در واقع ترکیب حاصل با عنوان مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت‌های ظرفیت و پنجره‌های زمانی به همراه سفرهای چندگانه<sup>۹</sup> (MTVRPTW) معرفی می‌شود به همین دلیل این مسائل به طور مجزا و خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲-۲-۱- مسأله CVRP

در مسائل مسیریابی وسیله نقلیه با ظرفیت محدود وسایل نقلیه (CVRP)، کلیه گره‌های

<sup>1</sup> Capacitated Vehicle Routing Problem

<sup>2</sup> Heterogeneous Fleet VRP

<sup>3</sup> Split Delivery VRP

<sup>4</sup> VRP with Pick-up and Delivery

<sup>5</sup> Periodic VR

<sup>6</sup> Multi-Depot VRP

<sup>7</sup> VRP with Time Windows

<sup>8</sup> Multi-Trip VRP

<sup>9</sup> Multi-Trip VRPTW

تقاضا دارای حجم مشخصی از تقاضا هستند، همچنین وسایل نقلیه‌ای که از نقطه مبدأ یا دپو (قرارگاه) حرکت می‌کنند دارای یک ظرفیت محدود برای سرویس‌دهی هستند که اصلی‌ترین ویژگی این دسته از مسائل VRP هستند. از سوی دیگر، تابع هدف اینگونه مسائل مانند تابع هدف مسأله VRP کلاسیک به کمینه‌سازی کل هزینه‌ها، شامل هزینه‌های طی مسیر و وسایل نقلیه می‌پردازد. اخیراً، اختر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷)، هنان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) و راموس و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) پژوهش‌های مهمی را در بحث جمع‌آوری MSW با استفاده از CVRP انجام داده‌اند.

این مسأله با استفاده از یک گراف  $G = (V, A)$  شامل مجموعه گره  $V$  و مجموعه کمان‌های شبکه  $A = \{(i, j) | i = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j\}$  تعریف می‌شود به طوری که کمان‌های عبوری  $(i, j)$  در میان مجموعه مشتریان  $(i=1, 2, \dots, N)$  و گره قرارگاه  $(i=0)$  تعریف می‌شود. همچنین، یک ناوگان از  $K$  وسیله نقلیه همگن با ظرفیت  $W$  در شبکه وجود دارد که در محل قرارگاه مستقرند. عبور از هر کمان  $(i, j)$  برای هر وسیله نقلیه شامل هزینه (مسافت)  $c_{ij}$  بوده و هم چنین تقاضای مشتری  $i$ ام نیز با  $d_i$  مشخص می‌گردد. اگر  $(i, j)$  در شبکه تعریف نشده باشد آنگاه  $c_{ij} = \infty$  باشد و ماتریس  $C = c_{ij}$  نیز هنگامی مقارن است که اگر و تنها اگر داشته باشیم  $c_{ij}c_{ji} =$ .

فیشر و جایکومار<sup>۴</sup> (۱۹۸۱) با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، یک فرمولاسیون عمومی برای CVRP ارائه کردند که بعدها و تا به امروز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه‌های مختلف حمل و نقل قرار گرفته و بعضاً بهبودهایی نیز در آن اعمال نمودند. این فرمولاسیون اولیه از قرار زیر است:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کمان } (i, j) \in A \text{ توسط وسیله نقلیه } k \text{ ام عبور، شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (۱)$$

مدل ریاضی عبارتست از:

<sup>1</sup> Akhtar et al.

<sup>2</sup> Hannan et al.

<sup>3</sup> Ramos et al.

<sup>4</sup> Fisher and Jaikumar

$$\text{minimize } \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (2-2)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V, \quad (3-2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{i \in V} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in V, k = 1, \dots, K, \quad (4-2)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq W \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (5-2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (6-2)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad S \subseteq \{1, \dots, N\}; 2 \leq |S| \leq N - 1, \quad (7-2)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, k = 1, \dots, K. \quad (8-2)$$

در این فرمول‌بندی مدل ریاضی، تابع هدف (۲-۲) شامل کمینه سازی هزینه کل وسایل نقلیه جهت عبور از کمان های شبکه برای سرویس دهی به مشتریان می باشد. محدودیت‌های (۲-۳) تضمین می کند که هر مشتری فقط توسط یک وسیله سرویس بگیرد. محدودیت‌های (۲-۴) تضمین می کند که مسیرها پیوسته باشند. در این معادلات موازنه جریان ورود و خروج وسایل نقلیه نشان داده شده است. به عبارت دیگر تعداد وسایل نقلیه ای که به هر گره وارد می شود برابر با تعداد وسایل نقلیه ای است که از آن ها خارج می شوند. در محدودیت‌های (۲-۵) قید ظرفیت وسایل نقلیه اعمال می گردد. محدودیت‌های (۲-۶) تضمین می کند همه سفرهای وسایل نقلیه از پارکینگ شروع گردد و هم چنین محدودیت‌های (۲-۷) نیز منجر به آن می شود که هیچ زیرتوری تشکیل نشود. محدودیت‌های (۲-۸) نیز بیانگر نوع متغیرهای مسأله می باشد.

### ۲-۲-۲- مسأله HFVRP

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با ناوگان ناهمگن (HFVRP) نسخه دیگری از VRP است که در آن وسایل نقلیه دارای ظرفیت، هزینه ثابت و متغیر متفاوتی می باشند. به همین دلیلی ناوگانی از وسایل نقلیه ناهمگن در مسأله در نظر گرفته می شود که هدف تعیین اندازه و نوع وسایل نقلیه مورد نیاز با توجه به هدف کمینه سازی هزینه کل می باشد. از جمله پژوهش های مهم در بحث جمع آوری MSW می توان به مارکوف و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) و آسفی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) اشاره کرد.

### ۲-۲-۳- مسأله SDVRP

در مسأله CVRP فرض بر آن است که هر مشتری تنها توسط یک وسیله نقلیه و تنها در یک نوبت ملاقات شود. اما این فرض همواره در دنیای واقعی صدق نمی کند. در برخی مواقع ممکن است تقاضای مشتریان بیشتر از ظرفیت وسایل نقلیه باشد، در چنین مواقعی باید امکان سرویس دهی به این دسته از مشتریان با بیشتر از یک وسیله نقلیه صورت گیرد. مسأله مسیریابی وسیله نقلیه با تقسیم تحویل (SDVRP) توسعه ای دیگر از مسأله CVRP است که این فرض را در نظر می گیرد و هدف آن نیز کمینه سازی هزینه کل می باشد. هوآنگ و لین<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) یکی از مهم ترین پژوهش های مرتبط در این حوزه را انجام دادند.

### ۲-۲-۴- مسأله VRPPD

در مسأله مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و جمع آوری (VRPPD)، هر مشتری دارای دو مقدار تقاضای تحویلی و جمع آوری می باشد بطوریکه حجمی از تقاضا پس از ملاقات مشتری توسط وسایل نقلیه در محل مشتری تخلیه شده و حجمی دیگر نیز در محل مشتری توسط وسایل نقلیه بارگیری می شود و در نقطه قرارگاه نیز تخلیه می شود. هدف اصلی در این نوع از مسائل نیز کمینه سازی هزینه کل می باشد. به عنوان مهم ترین پژوهش، هوآنگ و لین (۲۰۱۵) به مطالعه مسأله VRPPD در حوزه جمع آوری MSW پرداختند.

<sup>1</sup> Markov et al.

<sup>2</sup> Asefi et al.

<sup>3</sup> Huang and Lin

### ۲-۲-۵- مسأله PVRP

مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه (PVRP) یکی از نسخه‌های مهم توسعه یافته از مسأله CVRP می‌باشد که از ترکیب مسأله تخصیص و VRP حاصل می‌شود. در این مسأله هدف تعیین مجموعه دوره‌های زمانی (روزهایی) است که باید به هر مشتری تخصیص پیدا کند و مسیرهای وسایل نقلیه باید طوری طراحی شوند که برای هر روز از افق برنامه ریزی (در زمان موازی) هزینه کل کمینه سازی شود. نورتیو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) و کاردناس-بارون و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) از جمله پژوهش‌های مهم در حوزه PVRP برای جمع‌آوری MSW می‌باشد.

### ۲-۲-۶- مسأله MDVRP

مسأله مسیریابی وسیله نقلیه چند قرارگاهی (MDVRP) توسعه‌ای از مسأله CVRP است که در آن چندین قرارگاه مرکزی جهت استقرار وسایل نقلیه وجود داد و هر وسیله نقلیه حرکت خود را از یکی از این قرارگاه‌ها آغاز کرده و پس از ارائه خدمات به مشتریان، به همان قرارگاه یا قرارگاه‌های مرکزی دیگر باز می‌گردد. علت اصلی این توسعه نگهداری کالاها در قرارگاه‌های مختلف به سبب محدودیت ظرفیت هر یک می‌باشد. هدف اصلی نیز در این مسأله کمینه سازی هزینه کل می‌باشد. راموس و همکاران (۲۰۱۴) و زو و جیانگ<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) از جمله پژوهش‌های مرتبط در این حوزه را پیاده سازی کردند.

### ۲-۲-۷- مسأله VRPTW

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی (VRPTW) توسعه‌ای از مسأله CVRP است که در آن سرویس‌دهی به هر مشتری باید در یک بازه زمانی مشخص و از پیش تعیین شده‌ای صورت گیرد. این مسأله با توجه به انجام گرفتن سرویس در یک بازه زمانی خاص پیچیدگی‌های زیادی دارد که در صورت اضافه شدن محدودیت طول مسیر پیموده شده وسایل نقلیه و هزینه خروج از پنجره زمانی در عین پیچیدگی بسیار بالا به یک مبحث

<sup>1</sup> Nuortio et al.

<sup>2</sup> Cárdenas-Barrón

<sup>3</sup> Xu and Jiang

کاربردی در عمل بسیار نزدیک می‌شود. در این مسأله سرویس به هر مشتری باید در یک بازه زمانی خاص صورت گیرد. هدف حضور به موقع وسایل نقلیه در ایستگاه‌های تعیین شده است که موجب کاهش قابل توجه زیان‌های از دست دادن مشتریان و افزایش سطح رضایت آنها می‌شود. این نسخه از مسأله VRP به عنوان یکی از مسأله‌های مورد علاقه پژوهشگران و کاربردی در بحث مدیریت MSW مطرح بوده که از جمله کارهای انجام شده می‌توان به کیم و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۶)، وی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۳)، نوواکوسکی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) و آسفی و همکاران (b۲۰۱۹) اشاره نمود.

#### ۸-۲-۲- مسأله MTVRP

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با سفرهای چندگانه (MTVRP) توسعه ای از مسأله CVRP است که در آن وسایل نقلیه امکان تشکیل چندین سفر را به طور همزمان دارند. از جمله محدودیت‌های تعیین کننده تعداد سفرها، در نظر گرفتن حد بالای تعداد سفر برای هر وسیله نقلیه و یا بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه می‌باشد که بر اساس آن تعداد سفرهای تشکیل شده برای هر وسیله نقلیه تعیین می‌گردد. هدف این مسأله نیز همانند سایر نسخه‌های مسائل VRP کمینه سازی هزینه‌های کل می‌باشد. این نسخه از مسأله VRP، علی‌رغم کاربرد فرداوان در بحث مدیریت MSW تاکنون مورد غفلت پژوهشگران قرار گرفته و از جمله پژوهش‌هایی که به آن اشاره داشته است، پژوهش انجام گرفته توسط بورکال و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) می‌باشد.

#### ۳-۲- معرفی مسائل ARP

مسأله مسیریابی کمان (ARP) نوعی دیگر از مسائل مسیریابی است که بطور خاصی جهت فرموله کردن عملیات مسیریابی وسایل نقلیه در جمع‌آوری زباله، برف‌روبی از سطح خیابان، رنگ آمیزی خیابان‌ها و سایر خدمات مربوط به خیابان‌ها مورد مطالعه قرار گرفته

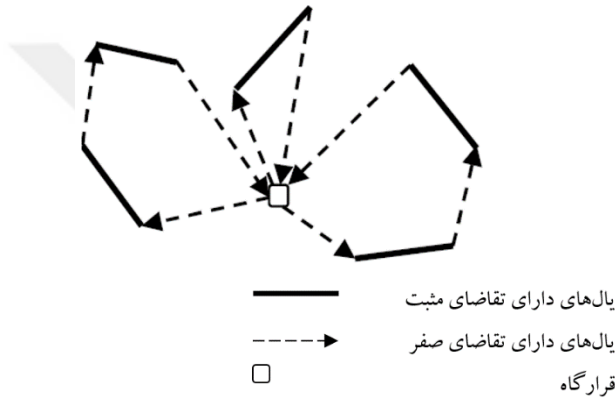
<sup>۱</sup> Kim et al.

<sup>۲</sup> Wy et al.

<sup>۳</sup> Nowakowski et al.

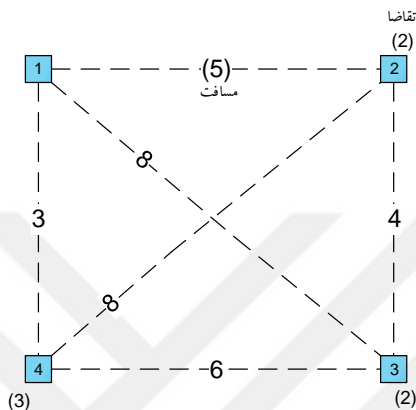
<sup>۴</sup> Buhrkal et al.

است. این نوع مدل از مسیریابی ابتدا توسط گلدن و وانگ (۱۹۸۱) معرفی شد که به عنوان حوزه خاصی از مسأله VRP می‌باشد. اما از سوی دیگر، ARP در مقابل VRP نسبتاً نادیده گرفته شده است. جهت درک بهتر شبکه مسأله ARP، به شکل ۱-۲ توجه فرمایید.



شکل ۱-۲. مسأله ARP.

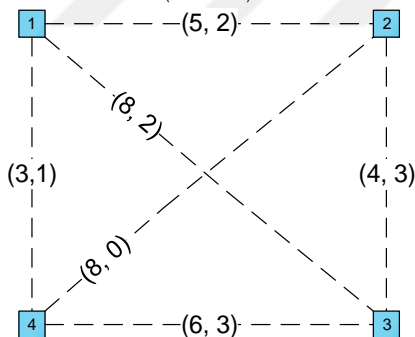
از سوی دیگر، شکل ۲-۲ تفاوت اصلی بین VRP و ARP را تشریح می‌کند. در قسمت (الف) مسأله VRP مطرح شده که با توجه به آن، گره ۱ بیانگر نقطه قرارگاه و گره های ۲ تا ۴ محل مشتریان می‌باشد. اطلاعات مربوط به مسافت هر یال و تقاضای هر گره نیز ارائه شده است بطوریکه هر گره تنها یکبار باید سرویس دهی شود. در قسمت (ب) شکل ۲-۲ مسأله ARP مطرح شده است که هر یال تنها یکبار نیاز به سرویس دارد و اطلاعات مسافت و تقاضای هر یال نیز داده شده است. علی‌رغم اینکه VRP و ARP بر روی شبکه گراف یکسان قرار گرفته‌اند، اما آن‌ها از دو زمینه متفاوت آغاز شده‌اند. در VRP، وسیله نقلیه سرویس خود را هنگامی انجام می‌دهد که به یک گره تقاضا برسد (قسمت الف) شکل ۲-۲). ولی در ARP، تقاضای مشتریان بر روی یال‌ها قرار دارند، و وسیله نقلیه هنگام عبور از یک یال سرویس خود را انجام می‌دهد (قسمت ب) شکل ۲-۲). برای درک بیشتر، در هر قسمت یک جواب بالقوه برای هر مسأله فراهم شده است بطوریکه هر یک از این جواب‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسأله از جمله محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه ممکن است شدنی، نشدنی یا حتی بهینه باشد.



جواب بالقوه = 1-2-3-4-1

(الف) مسأله CVRP

(تفاضل، مسافت)



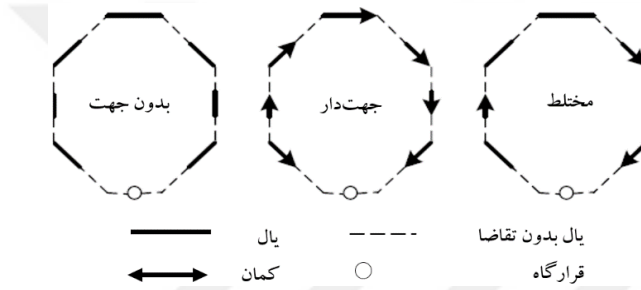
جواب بالقوه = 1-4-3-2-1-3-1

(ب) مسأله ARP

شکل ۲-۲. مقایسه مسأله VRP و ARP.

لازم به ذکر است که ARP می‌تواند بصورت یک گراف  $G = (V, E \cup A)$  تعریف شود، که  $V$  بیانگر مجموعه گره‌ها،  $E$  مجموعه یال‌ها و  $A$  مجموعه کمان‌ها است. بر این اساس،  $G$  یک گراف جهت‌دار است اگر  $E$  تهی باشد، یک گراف بدون جهت است اگر  $A$  تهی باشد و یک گراف مختلط نامیده می‌شود اگر هم  $E$  و هم  $A$  غیر تهی باشند. در شکل ۲-۳ انواع مختلف از این گراف‌ها تشریح می‌شود، هم‌چنین برای اطلاعات بیشتر به

ایسلت و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) مراجعه فرمایید. جامع ترین حالت گراف مرتبط با شبکه جمع آوری پسماند گراف بدون جهت می باشد (آمپونساه و سالهی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴)، که در این پژوهش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۳-۲. نمایش انواع مختلف گراف‌ها در مسأله ARP.

در این بخش، مهم ترین مسائل تعمیم داده شده ARP برای مطالعه مسأله جمع آوری MSW را می توان در دسته های زیر مورد بررسی قرار داد:

- (۱) مسأله مسیریابی کمان با محدودیت ظرفیت<sup>۳</sup> (CARP)،
- (۲) مسأله مسیریابی کمان دوره ای<sup>۴</sup> (PCARP)،
- (۳) مسأله مسیریابی کمان با پنجره های زمانی<sup>۵</sup> (CARPTW)،
- (۴) مسأله مسیریابی کمان با چند قرارگاه<sup>۶</sup> (MDCARP)،
- (۵) مسأله مسیریابی کمان با تحویل منقطع<sup>۷</sup> (SDCARP)،
- (۶) مسأله مسیریابی کمان چند بخشی<sup>۸</sup> (MCCARP)،

<sup>1</sup> Eiselt et al.

<sup>2</sup> Amponsah and Salhi

<sup>3</sup> Capacitated ARP

<sup>4</sup> Periodic CARP

<sup>5</sup> CARP with Time Windows

<sup>6</sup> Multi-Depot CARP

<sup>7</sup> Split Delivery CARP

<sup>8</sup> Multi-Compartment CARP

۷) مسأله ناحیه‌بندی مسیریابی کمان<sup>۱</sup> (SARC)،

۸) مسأله مسیریابی کمان با تسهیلات میانی<sup>۲</sup> (CARPIF)،

۹) مسأله مسیریابی کمان با سفرهای چندگانه<sup>۳</sup> (MTCARP).

هر ترکیب بالقوه‌ای از این نسخه‌ها می‌تواند به عنوان یک نسخه جدید معرفی گردد. این در حالی است که در این پژوهش، ترکیبی از مسأله CARP، MTCARP و CARPTW می‌باشد که بتوان مسأله‌ای یکپارچه و مناسب برای بهینه‌سازی مدیریت پسماند شهری ارائه نمود. در واقع ترکیب حاصل با عنوان مسأله مسیریابی کمان با محدودیت‌های ظرفیت و پنجره‌های زمانی به همراه سفرهای چندگانه<sup>۴</sup> (MTCARPTW) معرفی می‌شود. به همین دلیل این مسائل به طور مجزا و خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند

#### ۲-۳-۱- مسأله CARP

نسخه اولیه و کاربردی ARP، مسأله CARP است که تابع هدف آن تنها مرتبط با کمینه‌سازی ساختن هزینه کل سفر است. در این مسأله، مجموعه‌ای از یال‌های دارای تقاضا به همراه یک قرارگاه در شبکه وجود دارد و به عنوان بارزترین ویژگی آن، وسایل نقلیه‌ای که از نقطه قرارگاه حرکت می‌کنند دارای یک ظرفیت محدود برای سرویس‌دهی می‌باشند. تیرکلایی و همکاران (۲۰۱۶، ۲۰۱۸) و ولک و لاپرت<sup>۵</sup> (۲۰۱۹) پژوهش‌های مهمی را در بحث جمع‌آوری MSW با استفاده از CARP انجام داده‌اند.

گلدن و وانگ<sup>۶</sup> (۱۹۸۱) مسأله مسیریابی کمان دارای محدودیت ظرفیت در شبکه گراف بدون جهت<sup>۷</sup> (UCARP) را بصورت زیر توصیف کردند. یک گراف بدون جهت  $G = (V, E)$  شامل مجموعه گره  $V$ ، مجموعه یال  $E$  و مجموعه یال‌های دارای تقاضا

<sup>1</sup> Sectoring ARP

<sup>2</sup> CARP with Intermediate

<sup>3</sup> Mutli-Trip CARP

<sup>4</sup> Multi-Trip CARPTW

<sup>5</sup> Wøhlk and Laporte

<sup>6</sup> Golden and Wong

<sup>7</sup> Undirected Capacitated Arc Routing Problem

$R \subseteq E$  را در نظر بگیرید که در این شبکه یک ناوگان از  $K$  وسایل نقلیه همگن با ظرفیت  $W$  که در نقطه قرارگاه (گره شماره ۰) مستقرند و تعداد کل گره های شبکه  $N$  می باشد. هر یال  $(i, j)$  از گراف دارای یک هزینه (مسافت)  $c_{ij}$  و تقاضای  $q_{ij}$  برای سرویس دهی آن است. در واقع، زیرمجموعه  $R$  از یال ها باید توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود و باقی یال ها از مجموعه  $E$  ممکن است صرفاً به عنوان یال های عبوری استفاده شوند. همانند شبکه تعریف شده در CVRP، اگر  $(i, j)$  تعریف نشده باشد آنگاه  $c_{ij} = \infty$  باشد و ماتریس  $C = c_{ij}$  هنگامی متقارن است که اگر و تنها اگر برای همه  $j$  و  $i$  ها داشته باشیم  $c_{ji} = c_{ij}$ . هنگامیکه ماتریس  $C$  متقارن است، ما می توانیم هر یال (یا کمان بدون جهت) را به هر جهت گره مرتبط سازیم. بنابراین، بستگی به این دارد که آیا  $A$  یک مجموعه از کمان ها، یال ها یا یک ترکیبی از آن دو است. درور و لانگوین<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) با استفاده از یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح به توسعه یک فرمول بندی برای CARP پرداختند که به شرح زیر است:

$$x_{ijk} = \begin{cases} a & \text{اگر یال } (i, j) \in E \text{ توسط وسیله نقلیه } k \text{ ام } a \text{ بار عبور، شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (۹-۲)$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر یال } (i, j) \in E \text{ توسط وسیله نقلیه } k \text{ ام سرویس داده، شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (۱۰-۲)$$

مدل ریاضی عبارتست از:

$$\text{minimize } \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ijk} \quad (۱۱-۲)$$

subject to

$$\sum_{(j,i) \in E} x_{jik} - \sum_{(i,j) \in E} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K, \quad (۱۲-۲)$$

<sup>1</sup> Dror and Langevin

$$\sum_{k=1}^K (y_{ijk} + y_{jik}) = \begin{cases} 1 & \text{if } q_{ij} > 0 \\ 0 & \text{if } q_{ij} = 0 \end{cases} \quad \forall (i,j) \vee (j,i) \in E, \quad (13-2)$$

$$x_{ijk} \geq y_{ijk} \quad \forall (i,j) \in E, k = 1, \dots, K, \quad (14-2)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} q_{ij} y_{ijk} \leq W \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (15-2)$$

$$\sum_{j \in V[E]} x_{0jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (16-2)$$

$$M \sum_{i \in V[S]} \sum_{j \in V[S]} x_{ijk} \geq \sum_{(j,p) \in S} x_{jpk} \quad \forall S \subseteq R; \{0\} \in V[S]; k = 1, \dots, K, \quad (17-2)$$

$$x_{ijk}, y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, k = 1, \dots, K. \quad (18-2)$$

تابع هدف (۲-۱۱) هزینه کل ایجاد شده توسط وسایل نقلیه را کمینه می‌سازد. محدودیت‌های (۲-۱۲) روابط موازنه جریان برای هر وسیله نقلیه می‌باشد. محدودیت‌های (۲-۱۳) تضمین می‌کند که هریال دارای تقاضا سرویس داده شود. محدودیت‌های (۲-۱۴) بیانگر آن است که یک وسیله نقلیه لزوماً از یالی که عبور می‌کند، به آن سرویس ارائه نمی‌کند. محدودیت‌های (۲-۱۵) قید ظرفیت وسایل نقلیه است. محدودیت‌های (۲-۱۶) تضمین می‌کند وسایل نقلیه از پارکینگ سفر خود را آغاز کنند. هم‌چنین،  $V[E]$  مجموعه گره‌های موجود در مجموعه یال‌های عضو  $E$  می‌باشند. محدودیت‌های (۲-۱۷) تضمین می‌کند که هیچ زیرتوری تشکیل نمی‌شود. در این رابطه،  $M$  یک عدد بزرگ اختیاری و  $V[S]$  مجموعه گره‌های موجود در مجموعه یال‌های عضو  $S$  می‌باشد. محدودیت‌های (۲-۱۸) نیز بیانگر نوع متغیرهای مسأله می‌باشد.

## ۲-۳-۲- مسأله PCARP

این مسأله اولین بار توسط لاکومه و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) با در نظر گرفتن کاربردهای

<sup>۱</sup> Lacomme et al.

مختلف از جمله مدیریت MSW معرفی شد. در این مسأله به جای یک دوره برنامه ریزی، یک افق برنامه ریزی شامل چندین دوره (عمدتاً چندین روز) تعریف می شود. از این رو هر یال می بایست به تعداد از قبل تعیین شده ای در افق برنامه ریزی سرویس داده شود.

به طور کلی ویژگی های اصلی PCARP شامل موارد زیر می باشد:

- ناوگانی از وسایل نقلیه یکسان با ظرفیت مشخص در قرارگاه مستقر می باشند.
- اندازه ناوگان متغیر تصمیم گیری می باشد.
- تعداد دفعاتی که هر یال ضروری می بایست در افق برنامه ریزی سرویس داده شود و نیز ترکیب روز مجاز برای آن مشخص می باشد. منظور از ترکیب روز، ترکیبات مختلفی است که یک یال می تواند براساس آن سرویس بگیرد.
- سفر هر وسیله نقلیه از قرارگاه آغاز و مجدد به قرارگاه ختم می شود.
- هدف مسأله، تعیین یک ترکیب روز ممکن برای هر یال و نیز تعیین مجموعه ای از سفرها برای هر وسیله نقلیه در هر روز از افق برنامه ریزی می باشد بطوریکه هزینه کل کمینه شود.

### ۲-۳-۳- مسأله CARPTW

این مسأله توسعه ای از مسأله CARP است که در آن هر یال ضروری دارای یک پنجره زمانی (بازه زمانی) بوده و سرویس دهی به آن می بایست در آن بازه مشخص انجام شود. بنابراین، CARPTW شامل یافتن تورهایی برای وسایل نقلیه است بطوریکه شامل ویژگی های مهم زیر باشد:

- هر یال ضروری دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود.
- سرویس دهی به هر یال ضروری در پنجره زمانی مربوط به آن شروع شود.
- محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه رعایت شود.
- سفر هر وسیله نقلیه از قرارگاه آغاز و مجدداً به قرارگاه ختم شود.
- کل هزینه پیمودن مسیرها کمینه گردد.

از جمله پژوهش های آغازین این مسأله، می توان به پژوهش های رقیوی و همکاران<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Reghioui et al.

(۲۰۰۷) و وانستینوگن و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) اشاره کرد.

### ۲-۳-۴- مسأله MDCARP

در این مسأله برخلاف حالت کلاسیک، چندین قرارگاه وجود دارد. در حالتی که شبکه یا ناحیه مورد بررسی خیلی بزرگ است، طبیعتاً مسأله با در نظر گرفتن چندین قرارگاه مدل می‌شود. در حالت کلی MDCARP شامل ناوگانی از وسایل نقلیه یکسان با ظرفیت مشخص است که هر کدام در یک قرارگاه مستقر می‌باشند. هدف مسأله تعیین مجموعه‌ای از تورهای بهینه وسایل نقلیه با حداقل هزینه کل است به طوریکه شرایط مهم زیر برقرار باشد:

- سفر هر وسیله نقلیه از قرارگاهی که به آن تخصیص یافته شروع و در نهایت به همان قرارگاه ختم شود.
- هر یال ضروری فقط توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود.
- محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در طول سفر آن رعایت شود.

### ۲-۳-۵- مسأله SDCARP

در این مسأله تقاضای هر یال می‌تواند توسط چند وسیله نقلیه سرویس داده شود. به عبارت دیگر تقاضای هر یال می‌تواند به چند بخش تقسیم شده و هر بخش آن توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود. ویژگی‌های اصلی این مسأله به شرح زیر می‌باشد:

- هر یال دارای میزان تقاضای ثابتی است که می‌تواند از ظرفیت وسایل نقلیه بیشتر باشد.
  - هر یال می‌تواند در هر دو جهت (دو کمان غیر هم جهت) خود سرویس داده شود.
  - مسیر هر وسیله نقلیه از قرارگاه شروع و به آن ختم می‌شود.
  - ظرفیت همه وسایل نقلیه یکسان است.
- این مسأله توسط بلنگور و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) معرفی شد.

<sup>1</sup> Vansteenwegen et al.

<sup>2</sup> Belenguer et al.

### ۲-۳-۶- مسأله MCCARP

در این مسأله ناوگانی از وسایل نقلیه با چند قسمت مختلف که هر قسمت دارای ظرفیت مشخص بوده (کالاها معمولاً به علت ناسازگاری جدا می‌شوند) تعریف می‌شود. هدف مسأله، یافتن مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه برای وسایل نقلیه می‌باشد، بطوریکه هر مسیر از قرارگاه آغاز و به آن ختم شود و ظرفیت هر قسمت از وسیله نقلیه نیز رعایت شود.

از کاربردهای این مسأله می‌توان جمع‌آوری دسته‌های مختلف زباله‌های خانگی، مثلاً زباله‌های قابل بازیافت و زباله‌های عمومی اشاره نمود.

### ۲-۳-۷- مسأله SARP

این مسأله ابتدا توسط مورا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) با معرفی سه روش ابتکاری برای حل یک مسأله جمع‌آوری زباله شهری معرفی شد. در SARP، شبکه خیابان به چندین ناحیه تقسیم می‌شود، سپس یک مجموعه از سفرهای وسیله نقلیه در هر ناحیه ایجاد می‌شود که هدف آن کمینه کردن هزینه کل یا مدت زمان کل سفرها است.

### ۲-۳-۸- مسأله CARPIF

این مسأله اولین بار توسط قیانی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) با در نظر گرفتن کاربرد در مدیریت MSW مطرح شد. در این مسأله زیرمجموعه‌ای از تجهیزات میانی جهت بارگیری یا تخلیه وسایل نقلیه در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند تجهیزات محلی برای دفع و سوزاندن زباله‌ها باشند. هدف مسأله، طراحی تورهای بهینه برای وسایل نقلیه می‌باشد، بطوریکه کل تقاضای سرویس داده‌شده توسط وسیله نقلیه در مسیر بین قرارگاه و اولین تسهیل میانی و یا بین دو تسهیلات میانی از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نکند. سپس پلاسک و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) به توسعه روش حل برای این مسأله پرداختند.

### ۲-۳-۹- مسأله MTCARP

این نسخه از مسأله CARP همانند مسأله MTCARP با افزودن امکان وجود سفرهای

<sup>1</sup> Mourão et al.

<sup>2</sup> Ghiani et al.

<sup>3</sup> Polacek et al.

چندگانه توسعه پیدا می کند. بدین صورت که وسایل نقلیه در تورهای خود می توانند بیش از یک سفر جهت پوشش تقاضای مشتریان تشکیل دهند. از جمله محدودیت های اصلی جهت تعیین تعداد سفر می توان به حد بالای تعداد سفرهای مجاز، بیشینه مسافت قابل پیمایش و بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه اشاره کرد به طوریکه در نهایت هزینه های کل سرویس دهی به مشتریان شامل مسافت کل پیموده شده کمینه شود. آمایا و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهش خود به امکان تشکیل چندین سفر با در نظر گرفتن نقاط بازپرسازی<sup>۱</sup> اشاره کردند.

#### ۴-۲- سوابق مطالعات مسیریابی برای جمع آوری MSW

بلترامی و بودین<sup>۲</sup> (۱۹۷۴) یکی از اولین مسائل مسیریابی در جمع آوری زباله را به صورت مسأله مسیریابی کلاسیک وسایل نقلیه را برای جمع آوری زباله شهرداری های نیویورک و واشنگتن همراه با انواع مختلف وسایل نقلیه (کامیون، قایق های بارکش، کشتی های یدک کش، جاروهای مکانیکی) ارائه کردند. آن ها توانستند در تعیین مسیر بهینه، الگوریتم ابتکاری کلارک و رایت<sup>۳</sup> (۱۹۶۴) را بهبود دهند. نتیجه کار آن ها در شهرداری ها پیاده شد و منفعت های بسیاری برای آن به وجود آورد.

چانگ و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۹۷) یک مدل برنامه ریزی اعداد صحیح مختلط<sup>۵</sup> (MIP) چندهدفه اصلاح شده برای آنالیز مسیر بهینه در شبکه جمع آوری زباله به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۶</sup> (GIS) اعمال کردند. آن ها کار خود را برای مدیریت زباله در شهر کاهوسیونگ تایوان پیاده کردند. نتایج محاسباتی حاصل در دو سناریوی مدیریتی پیشنهادی (بدون در نظر گرفتن الزام برابری منابع) و سناریوی مدیریتی اصلاح شده (با در نظر گرفتن الزام برابری منابع) گزارش شد. هم سناریوی مدیریتی پیشنهاد شده و هم اصلاح شده توانستند جوابی با کیفیتی مشابه ارائه کنند. بصورت میانگین هر دو سناریو

<sup>1</sup> Refill points

<sup>2</sup> Beltrami and Bodin

<sup>3</sup> Clarke and Wright

<sup>4</sup> Chang et al.

<sup>5</sup> Mixed Integer Programming

<sup>6</sup> Geographic Information System

منجر به کاهش حدود ۳۴.۴۶٪ در مسافت طی شده و ۶.۰۳٪ در زمان جمع آوری در مقایسه با سناریوی کنونی شدند. از جمله مطالعات مهم در راستای بهینه سازی حمل و نقل در مدیریت پسماند شهری، مطالعه انجام گرفته توسط تانگ و پینوی<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) بوده که به بررسی مسأله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره های زمانی در جمع آوری زباله با مطالعه تکنیک های عملیاتی کاربردی آن در شهر هانوی ویتنام پرداختند. آن ها مسأله خود را به صورت یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۲</sup> (MILP) فرموله کردند و آن را بوسیله یک الگوریتم ابتکاری حل کردند. شیه و چانگ (۲۰۰۱) یک رویکرد دوفازی برای حل مسأله مسیریابی و زمانبندی جمع آوری پسماندهای خطرناک بیمارستانی از محل مجموعه ای از بیمارستان ها توسعه دادند. در فاز اول، با استفاده از روش برنامه ریزی پویا به حل مسأله VRP پرداخته و در فاز دوم نیز با استفاده از روش MIP توانستند مسیرهای بدست آمده را به روزهای خاص هفته جهت جمع آوری پسماندها تخصیص دهند. آنجلی و اسپرانزا (۲۰۰۲) به حل مسأله PVRP جمع آوری زباله با در نظر گرفتن تسهیلات میانی تخلیه بار پرداخته اند. برنامه ریزی حمل و نقل در مسأله آن ها برای دوره خاصی از برنامه بوده که این دوره می تواند هفتگی، ماهیانه باشد. وسایل نقلیه می توانند در این تسهیلات میانی به تخلیه بار پرداخته و سفر خود را جهت سرویس دهی دوباره از این نقاط آغاز کنند. آن ها برای حل مسأله خود از الگوریتم جستجوی ممنوع<sup>۳</sup> (TS) بهره بردند.

پوت و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۲) با افزودن چندین محدودیت کاربردی در دنیای واقعی به توسعه مسأله VRP جمع آوری زباله پرداختند. از جمله این محدودیت ها، محدودیت های چندگانه ظرفیت وسایل نقلیه، تنوع وسایل نقلیه، محدودیت های منطقه ای، اولویت های سرویس دهی و پنجره های زمانی می باشند که در مدل سازی ارائه کردند. در نهایت، با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر ایجاد صرفه جویی در مسیر به حل مسأله خود

<sup>1</sup> Tung and Pinnoi

<sup>2</sup> Mixed Integer Linear Programming

<sup>3</sup> Tabu Search

<sup>4</sup> Poot et al.

پرداختند. آرتینقیری و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) به مطالعه مسأله VRP با جمع آوری و تحویل خاص در بحث جمع آوری و دفع زباله های بازیافتی از قبیل کاغذ، فلز، چوب و ... پرداختند. آن ها مسأله خود را با تعریف شبکه گراف نامتقارن فرموله کردند. آن ها با استفاده از الگوریتم ابتکاری کلارک و رایت اصلاح شده، مسأله پیشنهادی خود را حل کردند. کیم و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) به حل مسأله VRPTW مختص به جمع آوری زباله شهری پرداختند، علاوه بر آن برای وسایل نقلیه چندین سفر و برای رانندگان نیز برنامه های استراحت در نظر گرفتند. هدف آن ها کمینه سازی تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز و زمان کل سفر بوده است به طوریکه بتوان تمامی تقاضا ها را پوشش داد. آن ها مسأله خود را به صورت مطالعه موردی در جمع آوری زباله شهری شمال آمریکا پیاده سازی کردند. آن ها برای حل از الگوریتم های ابتکاری توسعه یافته بهره بردند. نورتیو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) یک متدولوژی برای بهبود برنامه ریزی مسیر و زمانبندی جمع آوری پسماند و حمل و نقل آن در فنلاند شرقی توسعه دادند. آن ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری همسایگی آستانه متغیر هدایت شده<sup>۴</sup> (GVNT) و چندین رویکرد ابتکاری به حل مسأله پرداختند و توانستند کاهش چشمگیری در هزینه فعلی ایجاد نمایند. کارادیماس و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۷) برنامه ریزی حمل و نقل جمع آوری زباله در شهرداری آتن را مورد بررسی قرار دادند. آن ها برای منطقه مورد بررسی ۷۲ نقطه تقاضا در نظر گرفتند و در نهایت توانستند با استفاده از الگوریتم سیستم کلونی مورچگان<sup>۶</sup> (ACS) به صرفه جویی بالغ بر ۲۵٪ در کل مسافت پیموده شده توسط وسایل نقلیه برای سرویس دهی وسایل نقلیه دست یابند.

آلمور و کارا<sup>۷</sup> (۲۰۰۷) بر روی مسأله مسیریابی و برنامه ریزی حمل و نقل زباله های خطرناک پرداختند و مسأله را در منطقه ای از آناتولیان ترکیه اعمال کردند. هدف مسأله

<sup>1</sup> Aringhieri et al.

<sup>2</sup> Kim et al.

<sup>3</sup> Nuortio et al.

<sup>4</sup> Guided Variable Neighborhood Threshold

<sup>5</sup> Karadimas et al.

<sup>6</sup> Ant Colony System

<sup>7</sup> Alumur et al.

آن‌ها کمینه‌سازی هزینه کل و کمینه‌سازی ریسک ناشی از حمل زباله‌های مضر و خطرناک بوده است. آن‌ها برای حل مسأله کاربردی خود از نرم‌افزار CPLEX استفاده کردند.

در اکثر کشورها، مسائل جمع‌آوری زباله بطور مکرر به عنوان مسائل زیست‌محیطی و آلودگی در نظر گرفته می‌شوند بنابراین روش‌های فراوانی برای گسترش و بهبود سیاست‌ها و مدیریت اجرایی زباله اعمال شده است (تورنلو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷؛ سیمونتو و بورنشتین، ۲۰۰۷). جدا از این مطالعات انجام شده، محققان بسیار کمی به بهبود عملیات وسایل نقلیه در جمع‌آوری زباله پرداختند. کیتوجوکی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) به توسعه یک الگوریتم ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر<sup>۳</sup> (VNS) برای حل مسائل VRP در ابعاد بسیار بزرگ برای حل یک مسأله جمع‌آوری زباله در فنلاند شرقی پرداختند. هدف مسأله آن‌ها، کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی برای ناوگانی از وسایل نقلیه مشابه بوده است. لی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۸) به بررسی مسأله زمانبندی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند جامد در شهر پورتو آگرا برزیل با هدف ارائه زمانبندی روزانه وسایل نقلیه پرداختند. در مسأله پیشنهادی آن‌ها، وسایل نقلیه در مسیرهای ثابتی پسماندهای جامد را جمع‌آوری کرده و پس از تکمیل ظرفیت در یکی از چندین تسهیلات بازیافت عملیاتی در نظر گرفته شده تخلیه بار می‌کنند. هدف نیز کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی و بکارگیری وسایل نقلیه با استفاده از توسعه یک الگوریتم ابتکاری بوده است.

باتیستا و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۸)، مسأله مسیریابی کمان را با اعمال تغییراتی به مسیریابی گره به سبب وجود محدودیت جاده از قبیل دور زدن‌های ممنوع جهت بازگشت از یال برای حل مسأله جمع‌آوری زباله در شهرداری یکی از شهرک‌های بارسلونا تغییر دادند. آن‌ها این مسأله را برای این شهرک که ۷۳۹۱۷ نفر جمعیت دارد با استفاده از الگوریتم ACS، که مبتنی بر روش‌های نزدیک‌ترین همسایگی و نزدیک‌ترین قرارگذاری است، حل

<sup>1</sup> Thorneloe et al.

<sup>2</sup> Kytöjoki et al.

<sup>3</sup> Variable Neighborhood Search

<sup>4</sup> Li et al.

<sup>5</sup> Bautista et al.

کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که هر دو روش در کل مسیرهایی با طول مسافت کمتری از مسیرهای حال حاضر ایجاد می کنند بطوری که، مسیرهای ایجاد شده از طریق روش ابتکاری نزدیک ترین همسایگی منجر به بهبود ۳۵٪ و روش نزدیک ترین قرارگذاری منجر به بهبود ۳۷٪ شده است. آریباس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) به ارائه یک متدولوژی ترکیبی شامل بهره گیری از بهینه سازی ترکیبی، MIP و GIS برای طراحی مسأله جمع آوری زباله شهری کارا برای شهرداری سانتیاگو با استفاده از توسعه مدل سازی ریاضی پرداختند. نقاط زباله شامل ۱۶۰۰ سطل های مخصوص زباله بوده است. نتایج بدست آمده توسط آن ها بیانگر کاهش ۵۰٪ در هزینه ماهیانه شهرداری و کاهش ۵۷٪ در استفاده از وسایل نقلیه و به تبع آن کاهش ۵۷٪ در کارگران مورد استفاده برای جمع آوری بوده است. بورکال و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) به توسعه یک مسأله VRPTW مرتبط با جمع آوری زباله شهری با استفاده از یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی<sup>۳</sup> (ALNS) پرداختند. آن ها به نحوه جمع آوری زباله به صورت پیاده سازی یک سیستم کارا پرداختند بطوریکه بتوانند هزینه های مسیر بهینه برای وسایل نقلیه جمع آوری را در طی آغاز مسیر از قرارگاه و تخلیه بار در محل دفع را محاسبه کنند. از محدودیت های اصلی در مسأله آن ها این بوده که هر نقطه تقاضا دارای یک پنجره زمانی جهت تعریف اولویت سرویس دهی می باشد. کواو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) به توسعه یک متدولوژی حل ترکیبی از الگوریتم بهینه سازی توده ذرات<sup>۵</sup> (PSO) و الگوریتم ژنتیک<sup>۶</sup> (GA) برای حل مسأله VRP با در نظر گرفتن تقاضای فازی در بحث جمع آوری زباله شهری پرداختند. آن ها مثال های موجود در ادبیات را بوسیله الگوریتم پیشنهادی خود حل کرده و توانستند نشان دهند که عملکرد الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم های پیشنهادی در ادبیات بسیار مناسب می باشد.

وی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) به ارائه مسأله مسیریابی وسایل نقلیه برای جمع آوری

<sup>1</sup> Arribas et al.

<sup>2</sup> Buhrkal et al.

<sup>3</sup> Adaptive Large Neighborhood Search

<sup>4</sup> Kuo et al.

<sup>5</sup> Particel Swarm Optimization

<sup>6</sup> Genetic Algorithm

<sup>7</sup> Wy et al.

پسماندهای Roll on-Roll off با در نظر گرفتن پنجره های زمانی پرداختند. هدف مسأله پیشنهادی آن تعیین مسیرهای بهینه وسایل نقلیه با کانتینرهای بزرگ به جهت جمع آوری حجم انبوهی از پسماندهای ساختمانی و مناطق خرید بوده است. در مسأله پیشنهادی آن ها، وسایل نقلیه وظیفه حمل یک کانتینر را در یک لحظه بین محل های جمع آوری، یک قرارگاه، تسهیلات دفع، و مناطق انبار کانتینر دارد. از جمله محدودیت های اصلی مسأله پیشنهادی آن ها، در نظر گرفتن چندین تسهیل دفع زباله، چندین محل انبار کانتینرها، هفت نوع از تقاضاهای سرویس مشتریان، پنجره های زمانی متفاوت برای تقاضای مشتریان و تسهیلات، انواع مختلف کانتینرها با ظرفیت های گوناگون، و زمان ناهار رانندگان وسایل نقلیه می باشد. هم چنین، آن ها موضوعات موجود در دنیای واقعی از جمله، تغییر انواع سرویس دهی، تقاضاهای چندگانه در محل مشتری و زمانبندی های متفاوت کاری وسایل نقلیه را نیز در نظر گرفتند. آن ها برای حل مسأله پیشنهادی خود به توسعه یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ<sup>۱</sup> (LNS) پرداختند. آن ها اثربخشی روش های پیشنهادی خود را با استفاده از حل داده های استاندارد اقتباس شده از مثال های دنیای واقعی اثبات کردند. هوآنگک و لین<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) به توسعه یک مسأله برنامه ریزی و زمانبندی وسایل نقلیه برای سیستم جمع آوری زباله شهری با سیاست گذاری خاص "برداشتن پسماند از روی زمین" پرداختند. در این سیاست، مردم مسئول انتقال پسماندهای خانگی به درون وسایل نقلیه جمع آوری زباله می باشند. هدف مسأله آن ها در فاز اول پوشش دهی تمامی نقاط تقاضا و در فاز دوم اعمال روش ابتکاری به جهت بهینه سازی مسیرها و تعداد وسایل نقلیه بوده است. هنکه و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با حالت چندبخشی را با در نظر گرفتن انعطاف پذیر بودن اندازه های بخش ها که در جمع آوری زباله شیشه قابلیت کاربرد دارد، مورد بررسی قرار دادند. در مسأله آن ها انواع مختلف شیشه ها در محل مشتریان وجود دارد. هدف مسأله آن ها حمل و نقل انواع مختلف شیشه ها بدون ترکیب کردن با در نظر گرفتن کمیته سازی هزینه بوده است. آن ها برای حل مسأله پیشنهادی خود به

---

<sup>1</sup> Large Neighborhood Search

<sup>2</sup> Huang and Lin

<sup>3</sup> Henke et al.

توسعه یک مدل ریاضی و یک الگوریتم VNS پرداختند. کینوب و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) با ارائه یک رویکرد جدید و ترکیبی به بهینه سازی جمع آوری و دفع پسماند در شهر کامپالا پرداختند. متدولوژی آن ها شامل استفاده از ابزارهای GIS به جهت بهینه سازی مسافت کل پیموده شده، تعداد سفرها، و زمان کل صرف شده برای جمع آوری پسماند بوده که منجر به بیشینه سازی حجم کل پسماند جمع آوری و در نهایت صرفه جویی های بزرگ و حفظ محیط زیست در راستای پاکیزه بودن شده است. آن ها توانستند نهایتاً ناوگان مناسبی از وسایل نقلیه به همراه ظرفیت مورد نیاز با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و نشر آلاینده ها از وسایل نقلیه را برای جمع آوری پسماند با استفاده از ابزارهای GIS تعیین نمایند.

اینقلز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) به ارائه یک مدل حمل و نقل چندمنظوره برای طراحی شبکه سرویس دهی حمل و نقل پسماند جامد شهری پرداختند. آن ها در مسأله پیشنهادی خود، امکان پذیری استفاده از کامیون های چند منظوره و حمل و نقل آبی درون مرزی، بجای استفاده از کامیون های حمل و نقل برای ارسال پسماندهای خانگی به صورت انبوه از مراکز جمع آوری به تسهیلات پردازش و برخورد با پسماند را مورد بررسی قرار دادند. مدل پیشنهادی، یک مدل برنامه ریزی پویا در سطح تاکتیکی بوده که هدف آن کمینه سازی هزینه های کل حمل و نقل، هزینه های زیست محیطی خارجی و اجتماعی می باشد. آن ها با پیاده سازی مدل خود در یک مسأله مطالعه موردی توانستند ثابت کنند که استفاده از سیستم حمل و نقل پیشنهادی منجر به صرفه جویی در اهداف می شود.

اختر و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) به توسعه الگوریتم جستجوی پس گرد<sup>۴</sup> (BSA) برای حل مدل های VRP موجود در ادبیات مختص به مسأله جمع آوری زباله شهری و بهینه سازی مسیرها به صورت کارا پرداختند. نتایج بدست آمده از پژوهش آن ها بیانگر کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی آن ها بوده است. عرفانی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۷) به توسعه یک رویکرد

<sup>1</sup> Kinobe et al.

<sup>2</sup> Inghelz et al.

<sup>3</sup> Akhtar et al.

<sup>4</sup> Backtracking Search Algorithm

<sup>5</sup> Erfani et al.

جدید برای حل مسأله مکانیابی سطل های زباله و تعیین مسیرهای بهینه جمع آوری وسایل نقلیه با استفاده از GIS پرداختند. آن ها برای ارزیابی کاربردی بودن رویکرد پیشنهادی خود، به بررسی یک مطالعه موردی در ایران پرداختند. دوتولی و اپیکوکو<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) به مطالعه مسأله مسیریابی وسایل نقلیه برای جمع آوری زباله های خطرناک شهری پرداختند. آن ها در مسأله خود محدودیت مسافت پیموده شده را با در نظر گرفتن پنجره های زمانی و دردسترس بودن وسایل نقلیه در نظر گرفتند و برای بررسی کاربردی بودن مدل خود به حل مطالعه موردی پرداختند. لوپز-سانچز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) به توسعه یک الگوریتم چندهدفه بهینه سازی مبتنی بر VND برای حل مسأله جمع آوری پسماند در یک شهر در جنوب اسپانیا پرداختند. اهداف پیشنهادی آن ها کمینه سازی هزینه های کل سفر و بالانس مسیرهای وسایل نقلیه بوده است. آن ها با حل مسأله توانستند نتایج محاسباتی بدست آمده را به صورت مرزپارتو ارائه نمایند. هنان و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) به توسعه یک مسأله VRP برای جمع آوری زباله های برنامه ریزی شده به صورت ارائه مسیرهای بهینه پرداختند. آن ها برای حل مسأله خود به توسعه یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مثال های موجود در ادبیات پرداختند. از ویژگی های خاص مسأله آن ها در نظر گرفتن برنامه ریزی هفتگی بوده است. آرمینگتون و چن<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) به توسعه یک چارچوب کلی برای آنالیز و مدل سازی مسأله جمع آوری پسماند غذایی از مناطق مسکونی به جهت کمینه سازی هزینه های کل حمل و نقل پرداختند. آن ها مسأله خود را در قالب یک مسأله VRP فرموله کرده و با استفاده از الگوریتم حل CPLEX IBM حل کردند. نتایج بدست آمده بیانگر آن بوده که افزایش مشارکت مناطق مسکونی منجر به کاهش زمان و هزینه سفر برای هر خانه می شود. تیرکلایی و همکاران (۲۰۱۸) به توسعه یک مسأله مسیریابی کمان استوار برای حل مسأله جمع آوری زباله شهری با در نظر گرفتن شیفیت کاری راننده و خدمه پرداختند. آن ها برای حل مسأله پیشنهادی و صحه گذاری مدل ریاضی خود به طراحی مثال های تصادفی

---

<sup>1</sup> Dotoli and Epicoco

<sup>2</sup> López-Sánchez et al.

<sup>3</sup> Hannan et al.

<sup>4</sup> Armington et al.

و حل با استفاده از روش دقیق و الگوریتم شبیه سازی تبرید پرداختند. نوواکوسکی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) به استفاده از مسأله VRPTW در جمع آوری زباله های الکترونیکی سیار بر اساس ثبت تقاضا پرداختند. آن ها در متدولوژی پیشنهادی خود، امکان استفاده از سیستم جامع آنلاین ارتباطی برای مردم به جهت ثبت تقاضا برای جمع آوری زباله تجهیزات الکترونیکی، ثبت داده، و حل مسأله VRPTW با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری را در نظر گرفتند. هدف مسأله آن ها، تعیین تعداد وسایل نقلیه جمع آوری مورد نیاز، برنامه ریزی مسیریابی وسایل نقلیه، جمع آوری به موقع زباله های خانگی و کمینه سازی هزینه های جمع آوری بوده است. راموس و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) به توسعه یک مسأله مسیریابی جمع آوری پسماند هوشمند برای بیشینه سازی حجم کل پسماند جمع آوری شده و کمینه سازی هزینه کل حمل و نقل پرداختند. آن ها در مسأله خود، امکان استفاده از سنسورها در مخزن های زباله برای اندازه گیری سطح پسماند موجود در لحظه و سیستم پویای بهینه سازی مسیرها را مورد بررسی قرار دادند. آن ها با استفاده از سیستم خبره پیشنهادی خود، به حل یک مسأله مطالعه موردی پرداختند و توانستند نتایج بدست آمده حاصل از حل کننده CPLEX نرم افزار GAMS را به عنوان سیستم پشتیبان تصمیم گیری های عملیاتی مدیریت مورد استفاده قرار دهند. ربانی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) به توسعه الگوریتم های ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نسخه دوم<sup>۴</sup> (NSGA-II) و الگوریتم بهینه سازی چند هدفه توده ذرات<sup>۵</sup> (MOPSO) برای حل مسأله چند هدفه مکانیابی-مسیریابی<sup>۶</sup> (LRP) پسماندهای خطرناک با در نظر گرفتن انواع پسماندهای ناسازگار پرداختند. اهداف در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی آن ها شامل کمینه سازی هزینه کل، کمینه سازی ریسک های حمل و نقل پسماندهای خطرناک، و کمینه سازی ریسک مکان های دفع و پردازش زباله در مناطق مسکونی می باشد.

<sup>1</sup> Nowakowski et al.

<sup>2</sup> Ramos et al.

<sup>3</sup> Rabbani et al.

<sup>4</sup> Non-dominated Sorting GA II

<sup>5</sup> Multi-Objective PSO

<sup>6</sup> Location-Routing Problem

اخیراً، آسفی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) به ارائه یک فرمولاسیون MILP برای حل مسأله HFVRP با در نظر گرفتن اندازه متغیر ناوگان برای جمع آوری یکپارچه MSW پرداختند. هدف پیشنهادی مسأله آن‌ها کمینه سازی هزینه های حمل و نقل و انحراف کل از تخصیص عادلانه بار به ایستگاه های حمل و نقل بوده است. در نهایت، برای حل مدل پیشنهادی از روش لکسیکوگرافیک<sup>۲</sup> و برنامه ریزی آرمانی<sup>۳</sup> استفاده کردند. وی و همکاران (۲۰۱۹) به توسعه یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر کلونی زنبور عسل مصنوعی<sup>۴</sup> برای حل مسأله جمع آوری پسماند در قالب مسأله CVRP با در نظر گرفتن الگوی دفع میانی پرداختند. از جمله دستاوردهای اصلی پژوهش آن‌ها ایجاد صرفه جویی ۷.۱۶٪ در کاهش نشر کربن در مقایسه با الگوی جمع آوری سنتی بوده است.

---

<sup>1</sup> Asefi et al.

<sup>2</sup> Lexicographic

<sup>3</sup> Wei et al.

<sup>4</sup> Artificial bee colony

جدول ۱-۲. مقایسه پژوهش های مرتبط انجام شده در ادبیات موضوع در بازه زمانی سال های ۲۰۰۰-۲۰۱۹.

نوع مدل ریاضی / روش حل	تابع هدف مورد مطالعه		ویژگی های اساسی											منابع		ردیف		
	زیست محیطی	اجتماعی یا رضایت شهروندان	مطالعه موردی	رویکرد غیرقطعی	رویکرد قطعی	سفرهای چندگانه	سکوهاى تخلیه مبنایی	افق برنامه ریزی	مسیرهای Roll-on Roll-off	مسیریابی گره	مسیرهای گمان	پنجیره زمانی	پسماندهای شهری (زجاجی)	پسماندهای الکترونیکی	پسماندهای خطرناک		سال انتشار	محقق
MILP/ Heuristic algorithm			*	*	*					*		*	*		۲۰۰۰	Tung and Pinnoi	۱	
MIP/DP method			*	*	*			*		*				*	۲۰۰۱	Shih and Chang	۲	
LP/TS algorithm			*		*		*	*		*		*	*		۲۰۰۲	Angelelli and Speranza	۳	
LP/ Heuristic algorithm			*		*					*		*	*		۲۰۰۲	Poot et al.	۴	
MILP/ Heuristic algorithm			*		*					*		*	*		۲۰۰۴	Aringhieri et al.	۵	
MILP/ Heuristic algorithm			*	*	*	*				*		*	*		۲۰۰۶	Kim et al.	۶	
Conceptual model/ GVNT metaheuristic			*	*	*			*				*	*		۲۰۰۶	Nuortio et al.	۷	

نوع مدل ریاضی / روش حل	تابع هدف مورد مطالعه		ویژگی های اساسی											منابع	ردیف			
	اجتماعی یا رضایت شهروندان	زیست محیطی	هزینه، درآمد یا زمان	مطالعه موردی	رویکرد غیر قطعی	رویکرد قطعی	سفرهای چندگانه	سکوهای تخلیه میانی	افق برنامه ریزی	مسیریابی Roll-on Roll-off	مسیریابی گره	مسیریابی مکان	بجیره زمانی	پسماند های شهری (خانگی)		پسماند های الکترونیکی	پسماند های خطرناک	انتشار
GIS/ACS algorithm			*	*	*					*			*			۲۰۰۷	Karadimas et al.	۸
MILP/CPLEX		*	*	*	*					*					*	۲۰۰۷	Alumur and Kara	۹
LP/VNS algorithm			*	*	*					*			*			۲۰۰۷	Kytöjoki et al.	۱۰
LP/ Heuristic algorithm			*	*	*	*	*	*	*	*			*			۲۰۰۸	Li et al.	۱۱
LP/ ACS algorithm			*	*	*	*				*	*		*			۲۰۰۸	Bautista et al.	۱۲
ILP+GIS/ LS algorithm			*	*	*	*		*	*	*			*			۲۰۱۰	Arribas et al.	۱۳
MILP/ALNS algorithm			*	*	*	*				*		*	*			۲۰۱۲	Buhrkal et al.	۱۴
LP/ HPSOGA algorithm			*		*					*			*			۲۰۱۲	Kuo et al.	۱۵
LNS algorithm+ Heuristics			*		*	*			*	*		*	*			۲۰۱۳	Wy et al.	۱۶

نوع مدل ریاضی / روش حل	تابع هدف مورد مطالعه		ویژگی‌های اساسی											منابع	ردیف			
	اجتماعی یا رضایت شهروندان	زیست محیطی	هزینه، درآمد یا زمان	مطالعه موردی	رویکرد غیرقطعی	رویکرد قطعی	سفرهای چندگانه	سکوها، تخلیه مبنایی	افق برنامه‌ریزی	مسیرهای Roll-on Roll-off	مسیرهایی گره	مسیرهایی گمان	بجیره زمانی	پسماند‌های شهری (خانگی)		پسماند‌های الکترونیکی	پسماند‌های خطرناک	تأثیر
MILP/ACO algorithm			*		*	*		*		*			*			۲۰۱۵	Huang and Lin	۱۷
MILP/VNS algorithm			*		*					*			*			۲۰۱۵	Henke et al.	۱۸
GIS+ArcGIS		*	*	*	*								*			۲۰۱۵	Kinobe et al.	۱۹
LP/Simulation	*	*	*	*	*			*		*		*	*			۲۰۱۶	Inghels et al.	۲۰
LP/BSA		*	*		*					*			*			۲۰۱۷	Akhtar et al.	۲۱
LP+GIS/ESRI ArcGIS			*	*	*					*			*			۲۰۱۷	Erfani et al.	۲۲
LP/ GLPK optimizer			*		*					*			*		*	۲۰۱۷	Dotoli and Epicoco	۲۳
GRASP_VND algorithm	*		*	*				*		*			*			۲۰۱۸	López-Sánchez et al.	۲۴

نوع مدل ریاضی / روش حل	تابع هدف مورد مطالعه		ویژگی‌های اساسی										منابع	ردیف				
	اجتماعی یا رضایت شهروندان	زیست محیطی	هزینه، درآمد یا زمان	مطالعه موردی	رویکرد غیر قطعی	رویکرد قطعی	سفرهای چندگانه	سکوها، تخلیه میانی	افق برنامه‌ریزی	مسیرهای Roll-on Roll-off	مستقریابی گره	مسیر پابندی گمان	بمخبره زمانی		پسماند‌های شهری (خانگی)	پسماند‌های الکترونیکی	پسماند‌های خطرناک	انتشار
LP/PSO			*		*					*			*			۲۰۱۸	Hannan et al.	۲۵
LP/ IBM CPLEX solution algorithm			*		*					*			*			۲۰۱۸	Armington and Chen	۲۶
Robust LP/ GAMS+ SA			*	*		*		*		*			*			۲۰۱۸	Tirkolaei et al.	۲۷
LP/ SA, TS, Greedy, and BCO			*	*	*					*		*		*		۲۰۱۸	Nowakowski et al.	۲۸
MILP/ GAMS			*	*	*					*			*			۲۰۱۸	Ramos et al.	۲۹
MILP/NSGA-II and MOPSO		*	*		*					*				*		۲۰۱۸	Rabbani et al.	۳۰
Lexicographic and Goal Programming	*		*	*	*		*			*			*			۲۰۱۹	Asefi et al.	۳۱

نوع مدل ریاضی / روش حل	تابع هدف مورد مطالعه		ویژگی های اساسی											منابع	ردیف			
	اجتماعی یا رضایت شهروندان	زیست محیطی	هزینه، درآمد یا زمان	مطالعه موردی	رویکرد غیر قطعی	رویکرد قطعی	سفرهای چندگانه	سکوهای تخلیه مبنایی	افق برنامه ریزی	مسیرهای Roll-on Roll-off	مسیرهایی گره	مسیرهایی گمان	بئجروه زمانی	پسماند های شهری (خانگی)		پسماند های الکترونیکی	پسماند های خطرناک	انتشار
Artificial Bee Colony (ABC) and Variable Neighborhood Decent (VND)		*			*		*				*		*			۲۰۱۹	Wei et al.	۳۲
Local Search (LS) strategies			*		*	*					*	*	*			۲۰۱۹	Willemse et al.	۳۳
Heuristic algorithm			*		*			*		*			*			۲۰۱۹	Cárdenas-Barrón et al.	۳۴
MILP/ Exact methods+ Metaheuristics		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۰۱۹	Current study	۳۵

پس از بررسی ادبیات موضوع مشخص می شود که اکثر پژوهش های انجام گرفته نتوانسته اند برخی از مفروضات اصلی مسأله را با توجه به شرایط و ضروریات دنیای واقعی از جمله تسهیلات میانی دفع پسماند، پنجره های زمانی، سفرهای چندگانه وسایل نقلیه و ... را به صورت همزمان برآورده کنند. هم چنین، مطالعات انجام گرفته در رابطه با کاهش آلاینده های حمل و نقل هم بسیار اندک بوده و از سوی دیگر اکثر پژوهش ها ماهیت غیرقطعی تقاضا را نادیده گرفته اند و مسائل را در حالات قطعی مورد مطالعه قرار دادند. به همین دلیل، هدف اصلی این پژوهش پوشش خلاها و شکاف های موجود در ادبیات موضوعی تحقیق است که در ادامه مهم ترین نوآوری های پژوهش ذکر می شود:

- ۱- مطالعه عدم قطعیت پارامتر تقاضا و مقابل با آن با استفاده از برنامه ریزی فازی مبتنی بر نظریه اعتبار،
- ۲- در نظر گرفتن مکان پارکینگ وسایل نقلیه، سکویهای تخلیه و نقاط تقاضا به صورت مجزا در شبکه و فراهم نمودن امکان سفرهای چندگانه برای وسایل نقلیه،
- ۳- در نظر گرفتن پنجره های زمانی برای انواع مختلف پسماندهای جامد شهری (خانگی، بیمارستانی و ...) و تعریف اولویت سرویس دهی با توجه به نوع پسماند،
- ۴- مطالعه مسأله به صورت مسیریابی کمان و مسیریابی گره و مقایسه نتایج بدست آمده در هر دو حالت،
- ۵- ارزیابی نقش جمع آوری سبز با افزودن بند کمینه سازی هزینه کل نشر کربن دی اکسید در تابع هدف یعنی کمینه سازی هزینه های کل سیستم جمع آوری،
- ۶- توسعه الگوریتم های فراابتکاری از قبیل الگوریتم SA، الگوریتم GWO و الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان بهبود یافته بیشینه-کمینه<sup>۱۳۰</sup> (IMMAS) برای حل کارای مسأله در ابعاد بزرگ،
- ۷- بهبود عملکرد الگوریتم های پیشنهادی با استفاده از روش های طراحی آزمایشات از جمله روش طراحی تاگوچی<sup>۱۳۱</sup> جهت تعیین مقادیر بهینه پارامترهای

<sup>130</sup> Improved max-min ACO

<sup>131</sup> Taguchi design method

الگوریتم‌ها،

۸- ارزیابی کاربردپذیری متدولوژی پیشنهادی پژوهش با حل یک مسأله مطالعه موردی در یکی از مناطق شهری شهر اصفهان.

### ۲-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل

در این فصل با مفاهیم اولیه و سلسله مراتب شکل‌گیری و تعریف مسائل VRP و ARP و جنبه کاربردی آن‌ها در بحث جمع‌آوری و حمل و نقل MSW آشنا شدیم. سپس به بررسی کارهای شاخص و مهم انجام گرفته در این حوزه توسط پژوهشگران پرداخته و در نهایت خلاصه‌ای از مقایسات جهت بررسی نوآوری‌های پژوهش در انتهای فصل مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل بعد، مسأله VRP و ARP توسعه یافته مورد بررسی در این پژوهش به همراه ارائه فرمولاسیون‌های ریاضی تشریح می‌شود.

## فصل سوم: تشریح مسأله و مدل‌سازی

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به معرفی فضای مسأله و تشریح ویژگی آن در قالب دو مسأله VRP و ARP توسعه یافته می‌پردازیم. سپس با در نظر گرفتن مفروضات و شرایط خاص جمع‌آوری MSW، مدل‌های ریاضی MILP برای مسأله توسعه داده می‌شود.

### ۳-۲- معیار سبز بودن

برآورد مصرف سوخت و نشر دی‌اکسید کربن برای وسایل نقلیه نیاز به محاسبات پیچیده دارد که تنها نشان‌دهنده یک تخمین و تقریب است، چونکه تعیین برخی از متغیرهای اساسی مانند شیب جاده‌ها، نحوه رانندگی، وضعیت جوی، تصادفات و ... مشکل است (پالمر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷).

تحقیقات بررسی شده برای محاسبه میزان نشر دی‌اکسید کربن یا مبتنی بر روش

---

<sup>1</sup> Palmer

سوخت محور بوده و یا مبتنی بر روش مسافت محور می باشد. در جدول ۳-۱ بر اساس رویکرد ابتکاری پروتوکل گازهای گلخانه ای، برخی از معیارهای مورد نیاز جهت تعیین موجه بودن هر یک از روش ها مشخص شده است (اوبدا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). از یک طرف، در روش سوخت محور، مصرف سوخت در فاکتور نشر دی اکسید کربن در هر یک از انواع سوخت ها ضرب می شود. و از طرفی دیگر، در روش مسافت محور، نشر دی اکسید کربن می تواند با استفاده از فاکتورهای نشر مسافت محور محاسبه شود. یک فاکتور نشر سوخت محور بر اساس حجم گرمای سوخت، کسری از کربن که در سوخت با اکسیژن ترکیب می شود، و ضریب حجمی کربن گسترش می یابد. روش مسافت محور موقعی که داده های مرتبط با وسایل نقلیه بر اساس میزان مسافت طی شد باشد می تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما فاکتورهای اقتصاد سوخت در دسترس نمی باشد. تصمیم گیری راجع به در نظر گرفتن کدام یک از این دو روش بستگی به میزان در دسترس بودن داده ها دارد.

جدول ۱-۳. مقایسه رویکرد سوخت محور در برابر با رویکرد مسافت محور.

رویکرد ها شاخص مقایسه	روش سوخت محور	روش مسافت محور
مزایا	مطمئن تر	آسانتر در تهیه داده
معایب	تنها وقتی که داده های مصرف سوخت موجود باشد، انجام محاسبات آسان است	سطح بالای عدم قطعیت
داده بر اساس نوع وسیله نقلیه	- مسافت طی شده - فاکتور مصرف سوخت - مقادیر گرمایش	- مسافت طی شده - مصرف سوخت
منابع گردآوری داده	- رسیدهای سوخت - سوابق هزینه ای سوخت - سوابق اندازه گیری مستقیم، شامل ثبت های رسمی گنج های (اندازه گیرهای) مصرف سوخت و مخازن	- ثبت های کیلومتر شمار - سوابق کمپانی نشان دهنده داده در اقتصاد سوخت بر اساس نوع وسیله نقلیه

<sup>1</sup> Úbeda et al.

رویکرد ها شاخص مقایسه	روش سوخت محور	روش مسافت محور
محاسبه نشر	<p>-محاسبه داده بر اساس مسافت طی شده توسط نوع وسیله نقلیه و نوع سوخت</p> <p>-تبدیل داده مسافت طی شده به مقادیر مورد استفاده برای سوخت مبتنی بر فاکتورهای اقتصاد سوخت</p> <p>- تبدیل برآوردهای سوخت به اشارات دی اکسید کربن از طریق ضرب مقادیر مورد استفاده برای سوخت در فاکتورهای ثابت سوخت</p>	<p>-جمع آوری داده بر اساس مسافت طی شده توسط نوع وسیله نقلیه و نوع سوخت.</p> <p>- تبدیل برآوردهای مسافت به نشر دی اکسید کربن از طریق ضرب مسافت طی شده در فاکتور نشر مبتنی بر مسافت</p>

واضح است، هنگامیکه می خواهیم یک فرمولاسیون تئوری از این مسأله داشته باشیم، روش مسافت محور برای محاسبه نشر دی اکسید کربن که مبتنی بر مسافت طی شده و فاکتورهای نشر مبتنی بر مسافت بوده، آسان تر است. این امر مستلزم دو گام اصلی است: (۱) جمع آوری داده های مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه مشخص و نوع سوخت (به عنوان مثال کیلومتر یا تن - کیلومتر)؛ (۲) تبدیل برآوردهای مسافتی به نشر دی اکسید کربن از طریق ضرب نتایج بدست آمده از گام اول در فاکتورهای نشر مسافت محور. علاوه براین، محاسبات نشر دی اکسید کربن مبتنی بر فرضی است که تمام کربنی که به عنوان سوخت می سوزد اکثراً به صورت دی اکسید کربن نشر پیدا می کند. سپس، ما فرض می کنیم که این محاسبه در درجه اول به دو فاکتور بستگی دارد: نوع وسیله نقلیه و نوع و کمیت سوخت مصرف شده. همینطور، این بدان معنی است که نشر تابعی از دو فاکتور است، با عنوان نوع حمل و نقل (یعنی وسیله نقلیه و بار آن) و مسافت طی شده (فرتی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). بنابراین، برآوردهای نشر دی اکسید کربن با توجه به جرم خودرو و میزان بار حمل شونده که یک پارامتر مهم است، متفاوت می باشد (کنی و گری<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). فاکتور برآورد نشر با دو گام اصلی ذکر شده را همانطور که در جدول ۲-۳ مشخص شده است، در نظر می گیرد. گام اول شامل برآورد فاکتور تبدیل سوخت با استفاده از

<sup>1</sup> Ferretti et al.

<sup>2</sup> Kenny and Gray

واکنش شیمیایی احتراق سوخت ( $C_{13}H_{28} + 20O_2 \rightarrow 13CO_2 + 14H_2O$ ) می باشد (کنی و گری، ۲۰۰۹). با دانستن جرم مولکولی دیزل ( $C_{13}H_{28}$ ) و دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) که به ترتیب برابر با ۱۸۴ و ۴۴ است و همچنین دانستن اینکه به ازای هر مولکول دیزل ۱۳ مولکول دی اکسید کربن وجود دارد، محاسبه  $3.11 = 13 \times \frac{44}{184}$  کیلوگرم از دی اکسید کربن به ازای هر کیلوگرم دیزل براحتی انجام می شود. سپس با داشتن چگالی دیزل ( $0.84 \text{ kg/litre}$ )، می توان میزان دی اکسید کربن موجود به ازای هر لیتر دیزل مصرف شده را محاسبه کرد (کیلوگرم  $2.61 = 3.11 \times 0.84$ ). مشاهده می شود که این فاکتور تبدیل تئوریک برآورد شده دیزل بسیار نزدیک به عدد ۲.۶۳ کیلوگرم است، که فاکتورهای تبدیل گازهای گلخانه ای را برای استفاده از منابع داده موجود و تبدیل آنها به داده های معادل با نشر دی اکسید کربن فراهم می کند. سپس با داشتن فاکتور تبدیل سوخت ( $2.61 \text{ kg of } CO_2/\text{litre of diesel}$ )، گام دوم برآورد فاکتور نشر ( $\epsilon$ ) شامل تعریف یک تابع دربرگیرنده داده مرتبط با میزان متوسط مصرف است که آن هم به حجم بار بستگی دارد. جدول ۳-۲ نشان دهنده برآورد این فاکتور برای چندین سناریوی ظرفیت برای یک کامیون با ظرفیت ۱۰ تن است (اوبدا و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۳-۲. برآورد میزان فاکتور نشر برای یک کامیون ۱۰ تن.

وضعیت وسیله نقلیه	درصد حجم بار وسیله نقلیه (%)	مصرف (litre/100km)	فاکتور تبدیل سوخت (kg CO <sub>2</sub> /litre)	فاکتور نشر (kg CO <sub>2</sub> /km)
خالی	0	29.6	×2.61	0.733
بار کم	25	32		0.831
نیمه بار	50	34.4		0.9
بار زیاد	75	36.7		0.958
پر	100	39		1.018

میزان کل نشر  $CO_2$  بر اساس ماتریس محیطی ( $\omega$ ) است که با در نظر گرفتن ماتریس مسافت بین هر دو جفت گره یا هر یال و فاکتور نشر و وسیله نقلیه  $k$  ام ( $\epsilon_k$ ) بین آن ها محاسبه می گردد:

$$\omega_{ijk} = c_{ij} \times \varepsilon_k(d_{ij}) \quad \forall (i, j) \in E, \forall k \in K. \quad (3-1)$$

بطوریکه مجموعه  $E$  بیانگر مجموعه یال های شبکه،  $c_{ij}$  مسافت یال  $(i, j)$  یا فاصله گره  $i$  تا گره  $j$  و  $d_{ij}$  تقاضای یال  $(i, j)$  می باشد. اگر تقاضای گره مطرح باشد  $d_{ij}$  به  $d_j$  تبدیل می شود.

### ۳-۳-۲ مسأله MTRPTW

مسأله مورد بررسی پژوهش بدنبال بدست آوردن تعداد بهینه وسایل نقلیه و تعیین سفر-های بهینه برای هر یک از این وسایل نقلیه با توجه به کمینه سازی تابع هدف کل شامل هزینه بکارگیری وسایل نقلیه، هزینه نشر دی اکسید کربن، هزینه عبور از یال های شبکه حمل و نقل و هزینه های جریمه خروج از پنجره های زمانی مجاز می باشد. شبکه مورد نظر را می توان با گراف  $G=(NE, NT)$  نمایش داد و در آن  $NT=\{1, 2, \dots, n\}$  مجموعه ای از گره ها است که گره شماره ۱ بیانگر قرارگاه وسایل نقلیه و گره شماره  $n$  بیانگر سکوی تخلیه می باشد و مابقی گره ها نیز نشان دهنده گره های دارای زباله (گره های تقاضا) هستند. وسایل نقلیه قبل از آغاز سفر در قرارگاه قرار دارند و سفر خود را جهت سرویس دهی به گره های تقاضا از آنجا آغاز می کنند و پس از پر شدن ظرفیت آن ها به محل سکوی تخلیه می روند تا ظرفیت خود را صفر کنند و دوباره در صورت امکان سفر خود را از سکوی تخلیه آغاز کنند و به محل عملیاتی باز گردند. علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، محدودیت زمانی هر یک از وسایل نقلیه نیز در مسأله پیشنهادی دارای اهمیت است؛ هنگامیکه زمان باقیمانده وسایل نقلیه صفر شود به ناچار باید به سکوی تخلیه برگشته و پس از خالی کردن بار خود، در نهایت به قرارگاه باز گردند. از سوی دیگر، در نظر گرفتن بازه های زمانی نرم در کنار بازه های زمانی سخت برای هر یک از نقاط تقاضا جهت برپایی سیاست های بهینه جمع آوری زباله شهری دارای اهمیت است و منجر به پیچیدگی مسأله خواهد شد.

مفروضات اصلی این مسأله عبارتند از:

- هر گره تقاضا، تنها توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده می شود.

-یک نقطه قرارگاه و یک سکو جهت تخلیه زباله جمع‌آوری شده وسایل نقلیه وجود دارد.

-وسایل نقلیه سفر خود را از قرارگاه آغاز می‌کنند و پس از هر بار تکمیل ظرفیت، به سکوی تخلیه رفته و سپس در صورت داشتن زمان باقیمانده، دوباره سفر خود را از سکوی تخلیه آغاز کنند.

-وسایل نقلیه ناهمگن بوده و شبکه گراف نامتقارن است.

-وسایل نقلیه پس از پایان سفر خود در نهایت به قرارگاه باز می‌گردند.

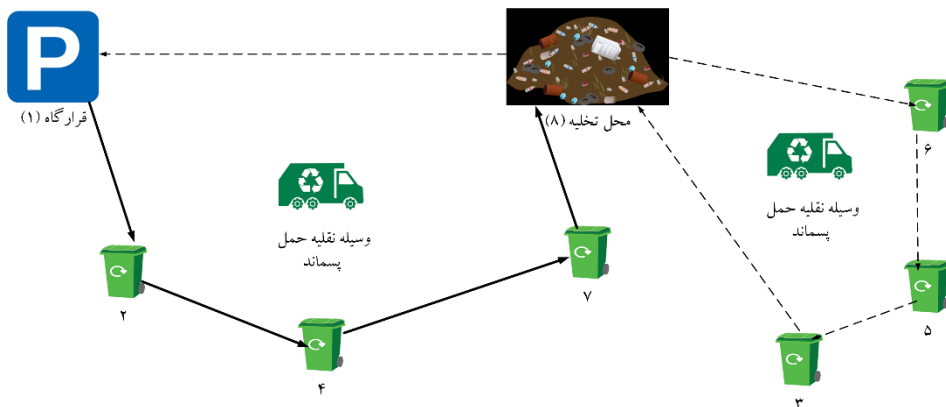
-هر وسیله نقلیه دارای حداکثر زمان به خدمت گرفتن می‌باشد.

- هر وسیله نقلیه می‌تواند دارای چندین سفر باشد، که سفر اول از قرارگاه به سکوی تخلیه و سفرهای بعدی از سکوی تخلیه به سکوی تخلیه می‌باشد.

-زمان و هزینه طی کردن یک مسیر در بین تمامی وسایل نقلیه یکسان است.

-هر گره تقاضا دارای پنجره زمانی نرم جهت سرویس‌دهی بوده که خروج از پنجره زمانی نرم با تحمیل هزینه جریمه همراه است.

برای درک بهتر مسأله، فضای شماتیک آن در شکل ۳-۱ ارائه شده است.



شکل ۳-۱. فضای شماتیک مسأله MTRPTW با سفرهای چندگانه برای جمع‌آوری MSW.

در شکل ۳-۱، یک شبکه جمع‌آوری MSW با در نظر گرفتن ۶ نقطه تقاضا، ۱ نقطه

قرارگاه و ۱ نقطه تخلیه نشان داده شده است. تمامی تقاضا توسط یک وسیله نقلیه و با تشکیل دو سفر جمع آوری می شود، بطوریکه خطوط پررنگ نشان‌دهنده سفر اول و خطوط منقطع نشان‌دهنده سفر دوم وسیله نقلیه می باشد. به عبارتی دیگر، ترتیب و توالی مسیر سفر اول به صورت  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8$  و توالی مسیر سفر دوم وسیله نقلیه به صورت  $1 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 8$  بوده که در نهایت وسیله نقلیه جهت تکمیل تور خود به قرارگاه باز گشته است.

حال جهت ارائه فرمولاسیون ریاضی مسأله به معرفی اجزای مختلف مدل می پردازیم.

### اندیس ها و مجموعه ها:

مجموعه کل گره‌ها	$NT$
مجموعه گره‌های تقاضا؛ $NC = NT \setminus \{1, n\}$	$NC$
مجموعه وسایل نقلیه	$K$
مجموعه سفرهای وسایل نقلیه	$P$
هر زیر مجموعه اختیاری از مجموعه گره‌های تقاضا	$S$
اندیس گره‌های تقاضا	$i$ و $j$
اندیس وسایل نقلیه	$k$
اندیس سفرهای وسایل نقلیه	$p$

### پارامترها:

مسافت بین گره $i$ و گره $j$ (کیلومتر)	$c_{ij}$
میزان نشر کربن دی اکسید بین گره $i$ و گره $j$ توسط وسیله نقلیه $k$ ام ( $\text{kg.CO}_2$ )	$\omega_{ijk}$
هزینه نشر واحد کربن دی اکسید ( $\$/\text{kg.CO}_2$ )	$\gamma$
هزینه واحد زودکرد سرویس دهی به هر گره تقاضا (\$)	$Q_e$
هزینه واحد دیرکرد سرویس دهی به هر گره تقاضا (\$)	$Q_l$
بازه زمانی نرم برای سرویس دهی به هر گره تقاضای $j$ ام	$(ee_j, ll_j)$
ظرفیت وسیله نقلیه $k$ ام (کیلوگرم)	$W_k$

میزان تقاضای گره تقاضای زام (کیلوگرم)	$d_j$
زمان در دسترس هر وسیله نقلیه (دقیقه)	$T_{max}$
عدد بزرگ	$M$
واحد زمان بارگیری وسایل نقلیه در گره‌های دارای زباله (دقیقه)	$ul$
واحد زمان تخلیه بار وسایل نقلیه در سکوی تخلیه (دقیقه)	$uu$
زمان طی کردن کمان $(i, j)$ (دقیقه)	$t_{ij}$
هزینه بکارگیری وسیله نقلیه $k$ ام	$cv_k$
ضریب تبدیل مسافت به هزینه (\$/km)	$\theta$

### متغیرهای غیر تصمیم مسأله:

زمان حضور در فرارگاه یا سکوی تخلیه یا گره تقاضا $i$ ام	$tt_i$
مجموع زمان بارگیری وسیله نقلیه $k$ در سفر $p$	$LT_k^p$
مجموع زمان تخلیه بار وسیله نقلیه $k$ در سفر $p$	$UT_k^p$
میزان زودکرد وسیله نقلیه $k$ ام جهت سرویس‌دهی گره تقاضا $i$ ام	$Ye_{ki}$
میزان دیرکرد وسیله نقلیه $k$ ام جهت سرویس‌دهی گره تقاضا $i$ ام	$Yl_{ki}$

### متغیرهای تصمیم مسأله:

$$\begin{cases} 1, & \text{اگر وسیله نقلیه } k \text{ ام در سفر } p \text{ ام خود از گره } i \text{ به گره } j \text{ برود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad x_{ijk}^p \quad (3-2)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{اگر وسیله نقلیه } k \text{ ام در سفر } p \text{ ام خود تقاضای گره } j \text{ را برآورده کند} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad y_{jk}^p \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{اگر وسیله نقلیه } k \text{ ام بکار گرفته شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad u_k \quad (3-4)$$

روابط ریاضی شامل تابع هدف و محدودیت‌ها عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 \text{minimize } Z = & \theta \left( \sum_{i \in NT} \sum_{j \in NT} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c_{ij} x_{ijk}^p \right) \\
 & + Y \left( \sum_{i \in NT} \sum_{j \in NT} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \omega_{ijk} x_{ijk}^p \right) \quad (5-3) \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{i \in NC} (Qe Y_{eki} + Ql Y_{lki}) + \sum_{k \in K} cv_k u_k
 \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{j \in NT} x_{ijk}^p = \sum_{j \in NT} x_{jik}^p \quad \forall i \in NT, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (6-3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} y_{jk}^p = 1 \quad \forall j \in NC, \quad (7-3)$$

$$\sum_{j \in NC} d_j y_{jk}^p \leq W_k \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (8-3)$$

$$y_{jk}^p \leq x_{ijk}^p \quad \forall i, j \in NT, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (9-3)$$

$$\sum_{i \in NT} \sum_{j \in NT} \sum_{p \in P} x_{ijk}^p \leq M u_k \quad \forall k \in K, \quad (10-3)$$

$$LT_k^p = ul \sum_{j \in NC} d_j y_{jk}^p \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (11-3)$$

$$UT_k^p = uu \sum_{j \in NC} d_j y_{jk}^p \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (12-3)$$

$$\sum_{p \in P} LT_k^p + \sum_{p \in P} UT_k^p + \sum_{(i,j) \in NE} \sum_{p \in P} t_{ij} x_{ijk}^p \leq T_{max} \quad \forall k \in K, \quad (13-3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ i \neq j}} \sum_{k \in K} x_{ijk}^p \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq NC; |S| \geq 2, \forall p \in P, \quad (14-3)$$

$$\sum_{j \in NC} x_{1jk}^1 \geq \sum_{j \in NC} x_{njk}^2 \quad \forall k \in K, \quad (15-3)$$

$$\sum_{j \in NC} x_{njk}^p \geq \sum_{j \in NC} x_{njk}^{p+1} \quad \forall p \in \{2, 3, \dots, |P| - 1\}, \forall k \in K, \quad (16-3)$$

$$tt_j = \sum_{i \in NT} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (tt_i + t_{ij}) x_{ijk}^p \quad \forall j \in NC, \quad (17-3)$$

$$tt_i = 0 \quad \forall i = 1, \quad (18-3)$$

$$Ye_{ki} \geq ee_i - tt_i \quad \forall k \in K, \forall i \in NC, \quad (19-3)$$

$$Yl_{ki} \geq tt_i - ll_i \quad \forall k \in K, \forall i \in NC, \quad (20-3)$$

$$\sum_{j \in NC} x^1_{1jk} = u_k \quad \forall k \in K, \quad (21-3)$$

$$\sum_{i \in NC} x^1_{ink} = u_k \quad \forall k \in K, \quad (22-3)$$

$$\sum_{i \in NC} x^p_{ink} \leq u_k \quad \forall p \in P \setminus \{1\}, \forall k \in K, \quad (23-3)$$

$$\sum_{j \in NC} x^p_{nj k} \leq u_k \quad \forall p \in P \setminus \{1\}, \forall k \in K, \quad (24-3)$$

$$x^p_{ijk}, y^p_{jk}, u_k \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in NE, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (25-3)$$

$$Ye_{ki}, Yl_{ki}, tt_i, LT_k^p, UT_k^p \geq 0 \quad \forall (i,j) \in NE, \forall k \in K, \forall p \in P. \quad (26-3)$$

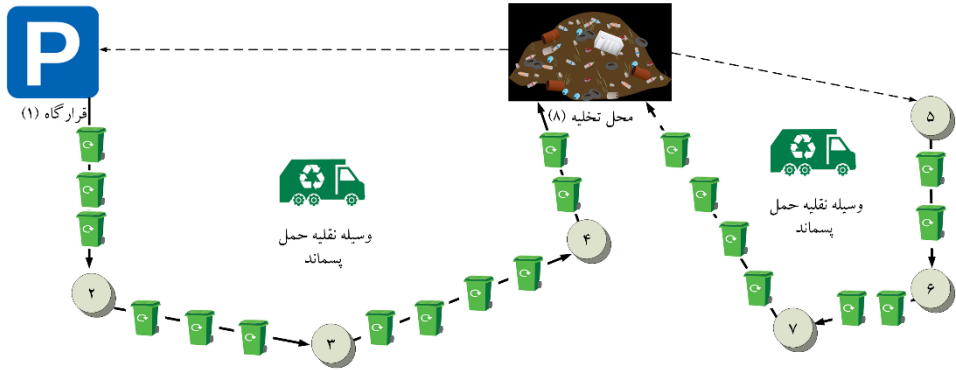
رابطه (۳-۵) بیانگر کمینه‌سازی هزینه کل شامل هزینه عبور از یال‌های شبکه تعریف شده، هزینه‌های نشر کربن دی‌اکسید، هزینه بکارگیری وسایل نقلیه و هزینه‌های جریمه خروج از پنجره‌های زمانی مجاز می‌باشد. محدودیت (۳-۶) نشان‌دهنده روابط موازنه جریان برای هر وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۷) این موضوع را تضمین می‌کند که هر گره تقاضا تنها توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود. محدودیت (۳-۸) بیانگر محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۹) بیانگر آن است که گره تقاضا توسط وسیله نقلیه‌ای که از آن عبور کرده است، سرویس داده می‌شود (یا وسیله نقلیه ممکن است از گره‌ای صرفاً عبور کند و آن را سرویس ندهد). محدودیت (۳-۱۰) بیانگر آن است که از وسیله نقلیه هنگامی استفاده می‌شود که هزینه آن پرداخت شده باشد. روابط (۳-۱۱) و (۳-۱۲) به ترتیب نشان‌دهنده مجموع زمان بارگیری و تخلیه بار برای هر وسیله نقلیه در هر سفر است. محدودیت (۳-۱۳) نشان‌دهنده محدودیت زمانی بکارگیری هر وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۱۴) از ایجاد زیرتور در هر سفر جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶) منجر به رعایت ترتیب شماره گذاری سفرهای وسایل

نقلیه از ۱ تا  $P$  می‌شود. محدودیت‌های (۳-۱۷) تا (۳-۱۸) به ترتیب زمان رسیدن به گره-های تقاضا و زمان آغاز سفر اول را مشخص می‌سازد. محدودیت‌های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) نیز به ترتیب مقدار واحد زمانی عدم دریافت سرویس در بازه زمانی نرم به ترتیب به صورت زودکرد و دیرکرد تعیین می‌کند. محدودیت‌های (۳-۲۱) و (۳-۲۲) به ترتیب تضمین می‌کند که سفر اول وسیله نقلیه از قرارگاه شروع و به سکوی تخلیه ختم می‌گردد. محدودیت‌های (۳-۲۳) و (۳-۲۴) به ترتیب بیانگر آن است که در صورت نیاز به سفرهای دوم، سوم و ...، وسایل نقلیه سفر خود را از سکوی تخلیه آغاز و به سکوی تخلیه باز می‌گردند. محدودیت‌های (۳-۲۵) و (۳-۲۶) نیز نوع متغیرهای مسأله را مشخص می‌سازد.

#### ۳-۴- مسأله MTCARPTW

این مسأله هم بدنبال بدست آوردن تعداد بهینه وسایل نقلیه و تعیین سفرهای بهینه برای هر یک از این وسایل نقلیه با توجه به کمینه‌سازی تابع هدف کل شامل هزینه بکارگیری وسایل نقلیه، هزینه‌های نشر کربن دی‌اکسید، هزینه عبور از یال‌های شبکه حمل و نقل و هزینه‌های جریمه خروج از پنجره‌های زمانی مجاز می‌باشد. شبکه مورد نظر را می‌توان با گراف  $G=(V, E)$  نمایش داد و در آن  $V=\{1, 2, \dots, n\}$  مجموعه‌ای از گره‌هاست که گره شماره ۱ بیانگر قرارگاه وسایل نقلیه و گره شماره  $n$  بیانگر سکوی تخلیه می‌باشد و  $E$  مجموعه یال‌های تشکیل شده از ترکیب دوتایی گره‌ها نیز نشان‌دهنده یال‌های دارای زباله (yal‌های تقاضا) و هم چنین یال‌های فاقد زباله (yal‌های عبوری) هستند. هر یال توسط تو کمان در جهت‌های مخالف یک دیگر نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال یال  $(i, j)$  متشکل از دو کمان  $(i, j)$  و  $(j, i)$  می‌باشد. هم چنین اگر دو یال به صورت متوالی توسط وسیله نقلیه ای عبور شوند، نمایش آن با در نظر گرفتن گره واسط  $h$  به صورت  $arc(i, h, j) := (arc(i, h), arc(h, j)) \in E$  خواهد بود. سایر مفروضات مسأله MTCARPTW همانند MTVRPTW می‌باشد.

برای درک بهتر مسأله، فضای شماتیک آن در شکل ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۳. فضای شماتیک مسأله MTCARPTW با سفرهای چندگانه برای جمع آوری MSW.

در شکل ۲-۳، یک شبکه جمع آوری MSW با در نظر گرفتن ۷ یال دارای تقاضا یعنی ۱-۲، ۲-۳، ۳-۴، ۴-۸، ۵-۶، ۶-۷ و ۷-۸، ۱ نقطه تخلیه نشان داده شده است. تمامی یال های تقاضا توسط یک وسیله نقلیه و با تشکیل دو سفر جمع آوری می شود، بطوریکه یال های دارای سطل های زباله به عنوان یال های تقاضا و یال های منقطع به عنوان یال های عبوری در نظر گرفته می شود.

ترتیب و توالی مسیر سفر اول به صورت ۱-۲ → ۲-۳ → ۳-۴ → ۴-۸ و توالی مسیر سفر دوم وسیله نقلیه به صورت ۸-۱ → ۱-۲ → ۲-۳ → ۳-۴ → ۴-۸ بوده که در نهایت وسیله نقلیه جهت تکمیل تور خود به قرارگاه باز گشته است.

حال جهت ارائه فرمولاسیون ریاضی مسأله به معرفی اجزای مختلف مدل می پردازیم.

### اندیس ها و مجموعه ها:

مجموعه کل گره ها	$V$
مجموعه کل یال های شبکه	$E$
مجموعه کل یال های تقاضا؛ $E_R = \{(i, j)   d_{ij} > 0\}$	$E_R$
مجموعه وسایل نقلیه	$K$
مجموعه سفرهای وسایل نقلیه	$P$
هر زیر مجموعه اختیاری از مجموعه یال ها	$S$
مجموعه گره های تعریف شده در مجموعه $S$	$V[S]$

اندیس وسایل نقلیه	$k$
اندیس سفرهای وسایل نقلیه	$P$
<b>پارامترها:</b>	
مسافت یال $(i, j)$	$c_{ij}$
میزان نشر کربن دی اکسید بر روی یال $(i, j)$ توسط وسیله نقلیه $k$ ام (kg.CO <sub>2</sub> )	$\omega_{ij}$
هزینه نشر واحد کربن دی اکسید (\$/kg.CO <sub>2</sub> )	$\gamma$
هزینه واحد زودکرد سرویس دهی به هر یال تقاضا	$Q_e$
هزینه واحد دیرکرد سرویس دهی به هر یال تقاضا	$Q_l$
بازه زمانی نرم برای سرویس دهی به هر یال تقاضای $(i, j)$	$(ee_{ij}, ll_{ij})$
ظرفیت وسیله نقلیه $k$ ام	$W_k$
میزان تقاضای یال $(i, j)$	$d_{ij}$
زمان در دسترس هر وسیله نقلیه	$T_{max}$
عدد بزرگ	$M$
واحد زمان بارگیری وسایل نقلیه در گره‌های دارای زباله	$ul$
واحد زمان تخلیه بار وسایل نقلیه در سکوی تخلیه	$uu$
زمان طی کردن یال $(i, j)$	$t_{ij}$
هزینه بکارگیری وسیله نقلیه $k$ ام	$cv_k$
ضریب تبدیل مسافت به هزینه	$\theta$
<b>متغیرهای غیر تصمیم مسأله:</b>	
زمان حضور در یال $(i, j)$	$tt_{ij}$
مجموع زمان بارگیری وسیله نقلیه $k$ در سفر $p$	$LT_k^p$
مجموع زمان تخلیه بار وسیله نقلیه $k$ در سفر $p$	$UT_k^p$
میزان زودکرد وسیله نقلیه $k$ ام جهت سرویس دهی یال تقاضای $(i, j)$	$Ye_{kij}$
میزان دیرکرد وسیله نقلیه $k$ ام جهت سرویس دهی یال تقاضای $(i, j)$	$Yl_{kij}$

متغیر های تصمیم مسأله:

$$= \begin{cases} r & \text{اگر یال } (i, j) \in E \text{ توسط وسیله نقلیه } k \text{ ام درسفر } p \text{ ام } r \text{ بار عبور شود،} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad x_{ijk}^p \quad (3-27)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{اگر یال } (i, j) \in E_R \text{ توسط وسیله نقلیه } k \text{ ام درسفر } p \text{ ام سرویس داده شود،} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad y_{ijk}^p \quad (3-28)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{اگر وسیله نقلیه } k \text{ ام بکار گرفته شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad u_k \quad (3-29)$$

روابط ریاضی شامل تابع هدف و محدودیت‌ها عبارتند از:

$$\begin{aligned} \text{minimize } Z = & \theta \left( \sum_{(i,j) \in E} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk}^p \right) \\ & + Y \left( \sum_{i \in NT} \sum_{j \in NT} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \omega_{ijk} x_{ijk}^p \right) \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} (Qe Y e_{kij} + Ql Y l_{kij}) + \sum_{k \in K} cv_k u_k \end{aligned} \quad (3-30)$$

subject to

$$\sum_{i \in V[E]} x_{ijk}^p = \sum_{j \in V[E]} x_{jik}^p \quad \forall i \in V[E]; (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-31)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} (y_{ijk}^p + y_{jik}^p) = 1 \quad \forall (i, j) \text{ or } (j, i) \in E_R, \quad (3-32)$$

$$\sum_{(i,j) \in E_R} d_{ij} y_{ijk}^p \leq W_k \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-33)$$

$$y_{ijk}^p \leq x_{ijk}^p \quad \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-34)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in E} x_{ijk}^p \leq M u_k \quad \forall k \in K, \quad (3-35)$$

$$LT_k^p = ul \sum_{(i,j) \in E_R} d_{ij} y_{ijk}^p \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-36)$$

$$UT_k^p = uu \sum_{(i,j) \in E_R} d_{ij} y_{ijk}^p \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-37)$$

$$\sum_{p \in P} LT_k^p + \sum_{p \in P} UT_k^p + \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in E} t_{ij} x_{ijk}^p \leq T_{max} \quad \forall k \in K, \quad (3-38)$$

$$\sum_{(j,h) \in S} x_{jhk}^p \leq M \sum_{i \in V[S], j \in V[S]} x_{ijk}^p \quad \forall S \subseteq E; \{1, n\} \notin V[S], \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-39)$$

$$\sum_{j \in V[E]} x_{1jk}^1 \geq \sum_{j \in V[E]} x_{njk}^2 \quad \forall k \in K, \quad (3-40)$$

$$\sum_{j \in V[E]} x_{njk}^p \geq \sum_{j \in V[E]} x_{njk}^{p+1} \quad \forall p \in \{2, 3, \dots, |P| - 1\}, \forall k \in K, \quad (3-41)$$

$$tt_{jh} = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (tt_{ij} + t_{jh}) x_{jhk}^p \quad \forall (j, h) \in E_R; arc(i, j, h) \in E, \quad (3-42)$$

$$tt_{1j} = t_{1j} \quad \forall j \in V[E], \quad (3-43)$$

$$Ye_{kij} \geq ee_{ij} - tt_{ij} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in E_R, \quad (3-44)$$

$$Yl_{kij} \geq tt_{ij} - ll_{ij} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in E_R, \quad (3-45)$$

$$\sum_{\substack{(1,j) \in E \\ j \in V[E] \setminus \{1, n\}}} x_{1jk}^p = u_k \quad \forall k \in K, \forall p = 1, \quad (3-46)$$

$$\sum_{\substack{(j,n) \in E \\ j \in V[E] \setminus \{1, n\}}} x_{jnk}^p = u_k \quad \forall k \in K, \forall p = 1, \quad (3-47)$$

$$\sum_{\substack{(n,j) \in E \\ j \in V[E] \setminus \{1, n\}}} x_{njk}^p \leq u_k \quad \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{1\}, \quad (3-48)$$

$$\sum_{\substack{(j,n) \in E \\ j \in V[E] \setminus \{1, n\}}} x_{jnk}^p \leq u_k \quad \forall k \in K, \forall p \in P \setminus \{1\}, \quad (3-49)$$

$$x_{ijk}^p \in Z^+, y_{ijk}^p \in \{0, 1\}, u_k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (3-50)$$

$$Ye_{kij}, Yl_{kij}, tt_{ij}, LT_k^p, UT_k^p \geq 0 \quad \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall p \in P. \quad (3-51)$$

رابطه (۳-۳۰) بیانگر تابع هدف کمینه‌سازی هزینه کل شامل هزینه عبور از یال‌های شبکه تعریف‌شده، هزینه‌های نشر کربن دی‌اکسید، هزینه بکارگیری وسایل نقلیه و هزینه‌های جریمه خروج از پنجره‌های زمانی مجاز می‌باشد. محدودیت (۳-۳۱) نشان‌دهنده روابط موازنه جریان برای هر وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۳۲) این موضوع را تضمین می‌کند که هر یال تقاضا تنها توسط یک وسیله نقلیه و یک کمان تشکیل دهنده سرویس‌دهی می‌شود. محدودیت (۳-۳۳) بیانگر محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۳۴) بیانگر آن است که یال تقاضا توسط وسیله نقلیه‌ای که از آن عبور کرده است، سرویس داده می‌شود (یا وسیله نقلیه ممکن است از یالی صرفاً عبور کند و آن را سرویس ندهد). محدودیت (۳-۳۵) بیانگر آن است که از وسیله نقلیه هنگامی استفاده می‌شود که هزینه آن پرداخت شده باشد. روابط (۳-۳۶) و (۳-۳۷) به ترتیب نشان‌دهنده مجموع زمان بارگیری و تخلیه بار برای هر وسیله نقلیه در هر سفر است. محدودیت (۳-۳۸) نشان‌دهنده محدودیت زمانی بکارگیری هر وسیله نقلیه است. محدودیت (۳-۳۹) از ایجاد زیرتور در هر سفر جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های (۳-۴۰) و (۳-۴۱) منجر به رعایت ترتیب شماره گذاری سفرهای وسایل نقلیه از ۱ تا  $P$  می‌شود. محدودیت‌های (۳-۴۲) تا (۳-۴۳) به ترتیب زمان رسیدن به گره‌های تقاضا و زمان آغاز سفر اول را مشخص می‌سازد. محدودیت‌های (۳-۴۴) و (۳-۴۵) نیز به ترتیب مقدار واحد زمانی عدم دریافت سرویس در بازه زمانی نرم به ترتیب به صورت زودکرد و دیرکرد تعیین می‌کند. محدودیت‌های (۳-۴۶) و (۳-۴۷) به ترتیب تضمین می‌کند که سفر اول وسیله نقلیه از قرارگاه شروع و به سکوی تخلیه ختم می‌گردد. محدودیت‌های (۳-۴۸) و (۳-۴۹) نیز به ترتیب بیانگر آن است که در صورت نیاز به سفرهای دوم، سوم و ...، وسایل نقلیه سفر خود را از سکوی تخلیه آغاز و به سکوی تخلیه باز می‌گردند. محدودیت‌های (۳-۵۰) و (۳-۵۱) نیز نوع متغیرهای مسأله را مشخص می‌سازد.

### ۳-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل

در این فصل به تشریح فضای مسأله در قالب دو مدل پیشنهادی برای MTVRPTW و MTCARPTW پرداخته شد بطوریکه ابتدا تعریف مسأله، مفروضات و در نهایت

مدلسازی ریاضی ارائه گردید. در فصل بعد، به معرفی روش فازی مبتنی بر نظریه اعتبار جهت مقابله با عدم قطعیت تقاضا در مسأله پرداخته و در نهایت روش های حل پیشنهادی هر یک از مسائل مورد بررسی و تشریح قرار می گیرد.



## فصل چهارم: متدولوژی پژوهش



### ۴-۱- مقدمه

در این بخش، متدولوژی پیشنهادی پژوهش شامل رویکرد برنامه ریزی فازی مبتنی بر اعتبار مطرح و سپس الگوریتم های پیشنهادی حل مسائل شامل SA، GWO و IMMAS مطرح می شوند. سپس سازوکار متدولوژی پیشنهادی متناسب با هر مسأله به تفصیل مورد بحث قرار می گیرد.

### ۴-۲- عدم قطعیت

همانطور که واضح است، در بسیاری از مسائل بهینه سازی در دنیای واقعی با عدم قطعیت داده ها مواجه هستیم. در بسیاری از مسائل فرض می شود که داده های ورودی دقیقاً معلوم هستند و اثر عدم قطعیت داده ها بر روی بهینگی و موجه بودن مدل نادیده گرفته می شود. بدین منظور بهترین برآوردی را که از داده های مورد نیاز مدل در دست است به عنوان

داده‌های قطعی مدل استفاده می‌گردد. بنابراین به نظر می‌رسد که به محض اینکه داده‌ها مقادیری غیر از مقادیر برآورد شده خود بگیرند ممکن است برخی از محدودیت‌ها نقض شده و جواب بهینه قبلی بدست آمده دیگر بهینه و حتی موجه نباشد. این امر موجب می‌شود تا مسائل با دیدی غیر واقعی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

با توجه به بررسی مسائل مرتبط با جمع‌آوری MSW، همواره سازمان‌هایی هم چون شهرداری با عدم قطعیت حجم زباله‌ها در مناطق شهری مواجه هستند. هم چنین ممکن است این عدم قطعیت با توجه به سیاست‌های شهرداری یا الگوهای جمع‌آوری تشدید نیز گردد و در نتیجه عدم مقابله با آن می‌تواند مشکلات زیادی را در جمع‌آوری زباله ایجاد می‌کند.

### ۳-۴- برنامه‌ریزی در شرایط عدم قطعیت

مسئله تصمیم‌گیری<sup>۱</sup> به سه حوزه قطعیت<sup>۲</sup>، ریسک و عدم قطعیت<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. در حوزه قطعیت، همه پارامترها قطعی و معلوم هستند، یعنی همه ورودی‌های مدل (مانند تقاضا و زمان سفر) به شکل مقادیر مشخص به مدل وارد می‌شوند و خروجی‌ها تصمیمات معتبر برای یک دوره زمانی هستند. اگر چه این مسائل تصمیم‌گیرندگان را در کسب یک دیدگاه کلی نسبت به مسائل بهینه‌سازی یاری می‌دهند، اما نمی‌توانند عدم قطعیت موجود در اتخاذ تصمیمات استراتژیک در دنیای واقعی را نشان دهند.

در محیط‌های دارای ریسک، پارامترهای غیر قطعی وجود دارند که مقادیر آن‌ها توسط توزیع‌های احتمالی مشخص قابل تخمین است. در فضاها غیر قطعی، پارامترها غیر قطعی بوده و به علاوه هیچ اطلاعاتی در مورد توزیع احتمالی آن‌ها در دسترس نیست. مسائلی که در حوزه ریسک مطرح می‌شوند مسائل بهینه‌سازی تصادفی<sup>۴</sup> نامیده می‌شوند و هدف کلی آن‌ها بهینه‌سازی مقادیر مورد انتظار توابع هدف می‌باشد. مسائلی که در حوزه عدم قطعیت وارد می‌شوند مسائل بهینه‌سازی استوار نامیده می‌شوند که در آن‌ها تلاش بر این است که

<sup>1</sup> decision making

<sup>2</sup> certainty

<sup>3</sup> uncertainty

<sup>4</sup> stochastic optimization problem

عملکرد سیستم در بدترین حالت بهینه گردد. هدف برنامه‌ریزی تصادفی و استوار، یافتن راه حلی است که بتواند در همه حالت‌های تصادفی مربوط به متغیرهای غیر قطعی عملکرد مناسبی داشته باشد. تعریف "عملکرد مناسب" در شرایط متفاوت مختلف بوده و تعریف معیار مناسب برای اندازه‌گیری عملکرد<sup>۱</sup> جزو فرایند مدل‌سازی محسوب می‌گردد. پارامترهای تصادفی می‌توانند پیوسته باشند. یا با سناریوهای گسسته ارائه شوند. اگر در مورد توزیع احتمالی پارامترها اطلاعاتی در دست باشد، می‌توان عدم قطعیت را در قالب یک توزیع گسسته و یا پیوسته نمایش داد. در غیر این صورت لازم است پارامترهای پیوسته در بازه‌های مشخصی محدود گردند.

#### ۴-۴- منطقی فازی

منطق فازی تاکنون جهت حل مسائل بسیاری استفاده شده است. نیاز به استفاده از این منطق در مسائل به دلیل وجود ابهامات و عدم قطعیت در ماهیت پارامترها می‌باشد. در اکثر موارد، اطلاعات کافی برای بدست آوردن یک توزیع آماری برای پارامتر تقاضا وجود ندارد. از طرف دیگر، بر اساس قضاوت متخصصان می‌توان این تقاضا را برآورد کرد. بنابراین، هنگامیکه استفاده از نظریه احتمال بسیار سخت و هزینه‌بر است، از منطق فازی برای مقابله با عدم قطعیت استفاده می‌شود. نظریه اعتبار فازی نیز تاکنون در بسیاری از مسائل با پارامترهای فازی مورد استفاده قرار گرفته است، که در ادامه به توضیح بیشتر این نظریه می‌پردازیم.

#### ۴-۴-۱- تئوری فازی و معیار اعتبار فازی

یک مجموعه کلاسیک به طور عادی مجموعه‌ای از اعضای آن تعریف می‌شود. هر داده به تنهایی می‌تواند عضو این مجموعه باشد یا نباشد. در نتیجه عضویت یا عدم عضویت هر داده به وضوح مشخص است. اما در برخی مجموعه‌ها عضویت با قطعیت همراه نیست. در برخورد با چنین مجموعه‌هایی از تئوری فازی استفاده می‌شود. تئوری مجموعه فازی در ابتدا توسط زاده<sup>۲</sup> (۱۹۶۵) معرفی و برای مسائل گوناگون توسعه داده شد. همچنین متغیر

<sup>۱</sup> performance measure

<sup>۲</sup> Zadeh

فازی ابتدا توسط کافمن<sup>۱</sup> (۱۹۷۵) و سپس توسط زاده (۱۹۷۵) و ناهمیاس<sup>۲</sup> (۱۹۷۸) معرفی شد. لیو<sup>۳</sup> (۲۰۰۴) در تحقیقات خود به تئوری اعتبار پی برده است. در این قسمت به طور مختصر به معرفی مفاهیم اساسی مجموعه فازی و اندازه گیری فازی پرداخته می شود. در ابتدا اصول معیار امکان<sup>۴</sup> معرفی می شود که پایه و اساس مفهوم اعتبار می باشد.

فرض کنید  $\Theta$  مجموعه ای غیر تهی و  $P(\Theta)$  را توان مجموعه  $\Theta$  باشد. هر عضو  $P(\Theta)$  یک رخداد نامیده می شود. همچنین  $\emptyset$  را یک مجموعه تهی در نظر بگیرد.

برای هر رخداد  $A$  که  $A \in P(\Theta)$  می باشد، عدد غیر منفی  $pos\{A\}$  وجود دارد که از

۴ اصل زیر پیروی می کند:

$$\text{اصل ۱: } Pos\{\emptyset\} = 0$$

$$\text{اصل ۲: } Pos\{\Theta\} = 1$$

۳ اصل: برای هر زیر مجموعه دلخواه  $\{A_K\}$  از مجموعه  $P(\Theta)$  رابطه زیر برقرار است:

$$Pos\{\cup_K A_K\} = \sup_K (A_K) \quad (۴-۱)$$

سه تایی  $(\Theta, P(\Theta), Pos)$  فضای امکان نامیده می شود و تابع  $pos\{\}$  به عنوان معیار

سنجش امکان معرفی می شود.

۴ اصل: اگر  $\Theta_i$  یک مجموعه غیر تهی باشد و تابع  $Pos_i\{ \}; i=1, 2, \dots, n$  دارای

۳ اصل فوق باشد و  $\Theta = \Theta_1 \times \Theta_2 \times \dots \times \Theta_n$  آنگاه برای هر  $A \in P(\Theta)$  رابطه زیر

برقرار است.

$$Pos\{A\} = \sup_{(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n) \in A} Pos_1\{\Theta_1\} \wedge Pos_2\{\Theta_2\} \wedge \dots \wedge Pos_n\{\Theta_n\} \quad (۴-۲)$$

به کمک ۴ اصل فوق می توان اساس معیار اعتبار را تشکیل داد و تمام مفاهیم نظریه

اعتبار را از آن ها مشتق کرد. بدین منظور ۲ تعریف زیر ارائه می شود (فیشتی و همکاران<sup>۵</sup>،

(۱۹۹۷):

<sup>1</sup> Kaufman

<sup>2</sup> Nahmias

<sup>3</sup> Liu

<sup>4</sup> Possibility

<sup>5</sup> Fischetti et al.

**تعریف ۱:**  $(\Theta, P(\Theta), Pos)$  را فضای امکان و  $A$  را مجموعه ای در  $P(\Theta)$  در نظر بگیرد. آنگاه معیار الزام<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف می شود.

$$Nec\{A\} = 1 - Pos\{A^c\} \quad (۴-۳)$$

**تعریف ۲:**  $(\Theta, P(\Theta), Pos)$  را فضای امکان و  $A$  را مجموعه ای در  $P(\Theta)$  در نظر بگیرد. آنگاه معیار اعتبار<sup>۲</sup> به صورت زیر تعریف می شود.

$$Cr\{A\} = \frac{1}{2}(Nec\{A\} + Pos\{A\}) \quad (۴-۴)$$

اگر تابع  $\mu_{\tilde{D}}(x)$  عضویت پارامتر فازی  $\tilde{D}$  باشد. آنگاه برای رخداد  $\{\tilde{D} \geq r\}$  امکان، الزام و اعتبار به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Pos\{\tilde{D} \geq r\} &= \sup_{x \geq r} \mu_{\tilde{D}}(x) \\ Nec\{\tilde{D} \geq r\} &= 1 - \sup_{x < r} \mu_{\tilde{D}}(x) \end{aligned} \quad (۴-۵)$$

$$Cr\{\tilde{D} \geq r\} = \frac{1}{2}(Pos\{\tilde{D} \geq r\} + Nec\{\tilde{D} \geq r\})$$

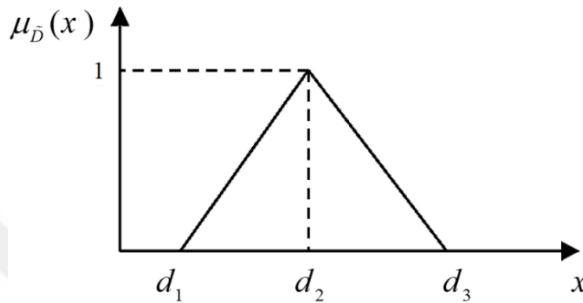
در اینجا اعتبار یک رخداد فازی، میانگین امکان و الزام آن رخداد تعریف شده است. یک رخداد فازی ممکن است به شکست بخورد حتی اگر امکان رخ دادن آن برابر ۱ باشد و ممکن است اتفاق بیفتد حتی اگر الزام آن برابر با ۰ باشد (فیشتی و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۷). به همین دلیل معیار اعتبار از ترکیب این دو تابع استفاده می کند و در اصل نقش احتمال رخداد را در شرایط فازی ایفا می کند. برای همین، یک رخداد فازی باید رخ دهد وقتی اعتبار آن برابر ۱ باشد و باید شکست بخورد وقتی اعتبار آن ۰ باشد.

اگر برای تقاضا عدد فازی یک متغیر فازی مثلثی  $\tilde{D} = (d_1, d_2, d_3)$  را در نظر بگیریم تابع عضویت و نمودار آن به صورت زیر خواهد بود:

<sup>1</sup> Necessity

<sup>2</sup> Credibility

<sup>3</sup> Fischetti et al.



شکل ۱-۴. تابع عضویت عدد فازی مثلثی.

$$\mu_{\bar{D}}(x) = \begin{cases} \frac{(x - d_1)}{(d_2 - d_1)}, & \text{if } d_1 \leq r < d_2, \\ 1, & \text{if } x = d_2, \\ \frac{(d_3 - x)}{(d_3 - d_2)}, & \text{if } d_2 < r \leq d_3, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (۶-۴)$$

بر این اساس تقاضای یک یال از  $d_1$  کمتر و از  $d_3$  نیز بیشتر نیست و  $d_2$  معقول‌ترین مقدار برای تقاضای یال با نمره عضویت ۱ است. بر اساس تعاریف فوق توابع امکان و الزام و اعتبار به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$Pos\{\bar{D} \geq r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r < d_2, \\ \frac{d_3 - r}{d_3 - d_2}, & \text{if } d_2 \leq r \leq d_3, \\ 0, & \text{if } r > d_3, \end{cases} \quad (۷-۴)$$

$$Nec\{\bar{D} \geq r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r < d_1, \\ \frac{d_2 - r}{d_2 - d_1}, & \text{if } d_1 \leq r \leq d_2, \\ 0, & \text{if } r > d_2, \end{cases} \quad (۸-۴)$$

$$Cr\{\bar{D} \geq r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r < d_1, \\ \frac{2d_2 - d_1 - r}{2(d_2 - d_1)}, & \text{if } d_1 \leq r \leq d_2, \\ \frac{d_3 - r}{2(d_3 - d_2)}, & \text{if } d_2 < r \leq d_3, \\ 0, & \text{if } r > d_3. \end{cases} \quad (۹-۴)$$

بطوریکه  $r$  یک مقدار تصادفی برای پارامتر تقاضا است که با مقادیر  $d_1$ ،  $d_2$  و  $d_3$

مقایسه می‌گردد.

## ۲-۴-۴- مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس مبتنی بر نظریه اعتبار فازی

در این پژوهش، به بررسی مسائل MTCARPTW و MTVRPTW با تقاضای فازی می‌پردازیم. فرض بر این است که تمام وسایل نقلیه در ابتدا با ظرفیت خالی از قرارگاه سفر خود را آغاز کرده و هر وسیله نقلیه باید تقاضاهای از پیش تعیین شده را سرویس دهد. بعد از پر شدن ظرفیت هر یک به سکوی تخلیه رفته و پس از خالی شدن ظرفیت در صورت وجود زمان کافی، به منطقه عملیاتی باز گردند. در مسأله MTVRPTW یک عدد فازی مثلثی نشان‌دهنده میزان تقاضای گره  $j$  به صورت  $\tilde{d}_j = (d_{1j}, d_{2j}, d_{3j})$  تعریف می‌شود. ظرفیت باقیمانده هر وسیله نقلیه در هر تور بعد از سرویس دهی به تعداد مشخصی گره (مثلاً  $\rho$ ) برابر با رابطه (۴-۱۰) است. این متغیر نیز یک عدد فازی مثلثی با استفاده از قواعد حسابی فازی بوده و خواهیم داشت:

$$A_j = W_k - \sum_{\substack{j \in NC, \\ |j| = \rho; \\ \rho \leq |NC|}} d_j,$$

$$\tilde{A}_j = \left( W_k - \sum_{\substack{j \in NC, \\ |j| = \rho; \\ \rho \leq |NC|}} d_{3j}, W_k - \sum_{\substack{j \in NC, \\ |j| = \rho; \\ \rho \leq |NC|}} d_{2j}, W_k - \sum_{\substack{j \in NC, \\ |j| = \rho; \\ \rho \leq |NC|}} d_j \right) \quad (۴-۱۰)$$

$$= (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \lambda_{3j}).$$

حال می‌توانیم یک اعتبار برای گره تقاضای بعدی ( $d_{j'}$ ) که میزان آن بیشتر از ظرفیت

باقیمانده وسیله نقلیه نباشد، بدست آوریم

$$Cr\{d_{j'} \leq A_j\} = Cr\{(d_{1j'} - \lambda_{1j}, d_{2j'} - \lambda_{2j}, d_{3j'} - \lambda_{3j}) \leq 0\} \quad (۴-۱۱)$$

$$= \begin{cases} 0, & \text{if } d1_{j'} > \lambda3_j, \\ \frac{\lambda3_j - d1_{j'}}{2(\lambda3_j - d1_{j'} + d2_{j'} - \lambda2_j)}, & \text{if } d1_{j'} \leq \lambda3_j, d2_{j'} > \lambda2_j, \\ \frac{d1_{j'} - \lambda1_{(i,j)} - 2(d2_{j'} - \lambda1_j)}{2(\lambda2_j - d2_{j'} + d3_{j'} - \lambda1_j)}, & \text{if } d2_{j'} \leq \lambda2_j, d3_{j'} > \lambda1_j, \\ 1, & \text{if } d3_{j'} \geq \lambda1_j. \end{cases}$$

همانطور که مشخص است، اگر ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه بزرگتر از تقاضای گره تقاضای بعدی باشد، در این صورت شانس سرویس دهی به این مشتری بیشتر می شود. در واقع، هر چه اختلاف بین ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه و تقاضای گره تقاضای بعدی بیشتر باشد، اولویت فرستادن وسیله نقلیه جهت سرویس دهی قبل از رفتن به سکوی تخلیه بیشتر می شود. این معیار اولویت را با  $Cr$  توصیف می کنیم، که نشان دهنده بزرگی اولویت ما جهت فرستادن وسیله نقلیه برای سرویس دهی به گره تقاضای بعدی پس از سرویس دهی گره تقاضای فعلی بر اساس رابطه (۴-۱۱) است. به عبارتی دیگر،  $Cr \in [0,1]$  کمترین مقداری است که اولویت برای تصمیم گیری جهت سرویس دهی به گره تقاضای بعدی به آن نیاز دارد. هنگامیکه  $Cr = 0$  است، ارسال کننده<sup>۱</sup> (تصمیم گیرنده) کاملاً مطمئن است که وسیله نقلیه باید به سکوی تخلیه برود و وقتی  $Cr = 1$  است، او کاملاً مطمئن است که وسیله نقلیه باید به سراغ گره تقاضای بعدی برود.

معیار اولویت ارسال کننده را با  $Cr^*$  نشان می دهیم که  $Cr^* \in [0,1]$  است، و بیانگر نگرش ارسال کننده در مقابل ریسک است. وقتی ارسال کننده ریسک پذیر باشد، مقدار کمتری را برای این پارامتر انتخاب می کند، که نشان دهنده تلاش ارسال کننده جهت استفاده کامل تا حد ممکن از ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه است. با این وجود، بسیاری از موارد وجود دارد که وقتی وسیله نقلیه به محل گره تقاضای بعدی می رسد قادر به انجام سرویس دهی برنامه ریزی شده به دلیل کمبود ظرفیت باقیمانده نیست. به عبارت دیگر، اگر ارسال کننده مقدار بزرگتری را برای پارامتر  $Cr^*$  انتخاب کند، بیانگر این است که او

<sup>1</sup> Dispatcher

ریسک‌گریز است. بنابراین براساس معیار اولویت ارسال‌کننده و اعتبار اینکه تقاضای گره تقاضای بعدی بیشتر از ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه نیست، یک تصمیم‌گیری جهت ارسال وسیله نقلیه به گره تقاضای بعدی و یا رفتن به سکوی تخلیه باید انجام شود. در این پژوهش، این تصمیم بر اساس معیار زیر مشخص می‌شود:

اگر رابطه  $C_r \geq C_r^*$  برقرار باشد، آنگاه وسیله نقلیه باید به سراغ گره تقاضای بعدی برود؛ در غیر این صورت، وسیله نقلیه باید به سکوی تخلیه برگردد و پس از تخلیه در صورت وجود زمان باقیمانده کافی، به منطقه عملیاتی باز می‌گردد. برای حالت  $C_r < C_r^*$ ، وسیله نقلیه بعدی سفر خود را آغاز می‌کند. در تمامی موارد بالا همواره زمان باقیمانده در دسترس هر وسیله نقلیه علاوه بر ظرفیت باقیمانده بررسی می‌شود و اگر زمان در دسترس وسیله نقلیه کوچکتر یا مساوی زمان رسیدن به سکوی تخلیه از محل فعلی باشد، وسیله نقلیه باید به سکوی تخلیه رفته و نهایتاً جهت تکمیل تور به قرارگاه بازگردد و در صورت وجود گره تقاضای سرویس داده‌نشده، وسیله نقلیه جدید سفر خود را آغاز می‌کند. روند بالا تا هنگامیکه تمامی گره‌های تقاضا سرویس داده نشوند، ادامه پیدا خواهد کرد. به طور مشابه موارد ذکر شده در بالا برای مسأله MTCARPTW نیز صدق می‌کند و اعمال می‌شود.

### ۳-۴-۴- اعمال نظریه اعتبار در مدل ریاضی

با استفاده از مدل فازی، جاییکه پارامتر تقاضا در مدل نقش دارد یعنی محدودیت (۳-۳) (۷) مسأله MTCARPTW و محدودیت (۳-۳۲) مسأله MTCARPTW، تاثیر سطح اعتبار لحاظ می‌گردد که بیانگر محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه  $k$  ام برای یک سطح اعتبار خاص است. محدودیت‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) به ترتیب رابطه متناظر مبتنی بر نظریه اعتبار فازی برای محدودیت‌های (۳-۷) و (۳-۳۲) می‌باشند. بنابراین مدل نهایی فازی هر یک از مسائل با این جایگزینی تشکیل می‌گردد.

$$C_r \left( \sum_{j \in NC} \tilde{d}_j y_{jk}^p \leq W_k \right) \geq C_r^* \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \quad (12-4)$$

$$C_r \left( \sum_{(i,j) \in E_R} \tilde{d}_{ij} y_{ijk}^p \leq W_k \right) \geq C_r^* \quad \forall k \in K, \forall p \quad (13-4)$$

$$\in P,$$

بطوریکه  $\tilde{d}_j$  و  $\tilde{d}_{ij}$  به ترتیب پارامتر تقاضای فازی گره  $j$  ام در مدل مسأله MTCARPTW و پارامتر تقاضای فازی یال  $(i, j)$  در مدل مسأله MTVRPTW می باشد.

#### ۴-۴-۴- تعیین سطح اعتبار بهینه

به منظور تخمین تقاضای یال ها از روش نظریه اعتبار فازی در این پژوهش استفاده شده است. برای این منظور یک سطح اعتبار در نظر گرفته شده و بر اساس آن مقدار تقاضای یال های ضروری تخمین زده می شود و در ادامه با توجه به تقاضای تخمین زده شده مسیریابی انجام می شود. یافتن مقدار بهینه  $C_r$  نقش تعیین کننده ای در مقدار تابع هدف واقعی مسأله خواهد داشت. انتخاب اولیه تقاضای یال ها بر اساس اعتبار یک تخمین است و مسلماً ممکن است هنگامیکه وسایل نقلیه قصد سرویس دهی تقاضای یال های ضروری را دارند، با تقاضای متفاوتی نسبت به میزان از پیش تعیین شده مواجه شوند. انتخاب مقادیر کم برای اعتبار باعث می گردد که مقادیر در نظر گرفته شده برای تقاضای یال های ضروری با مقدار کمینه ممکن تخمین زده می شود؛ این امر باعث کاهش هزینه های مسیره های یافته شده می - شود، ولی امکان شکست در مسیرها به وجود می آید، زیرا ممکن است مقدار تخمین زده - شده تقاضا از مقدار واقعی آن بیشتر باشد. شکست بدین معنی است که وسیله نقلیه برای پوشش تقاضای باقی یال های ضروری تور مجبور است به سکوی تخلیه باز گردد و عمل تخلیه را انجام دهد. از سوی دیگر انتخاب مقدار اعتبار بزرگ سبب می گردد تا برای هر یال ضروری حد بالایی تقاضای آن انتخاب شود، که در این صورت مسیره های یافته شده برای مسأله در این حالت پایدار باقی مانده و امکان عدم سرویس دهی به تقاضای یال های ضروری رخ ندهد. در این شرایط به دلیل برآورد بیش از حد تقاضای یال های ضروری، از ظرفیت وسایل نقلیه استفاده مناسب نشده و ممکن است هزینه های حمل و نقل افزایش یابد. به منظور یافتن بهترین مقدار اعتبار که با توجه به آن مقدار تقاضای یال های ضروری

در ابتدا تخمین زده شود لازم است تا از ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شود. حال به منظور یافتن مقدار بهینه پارامتر  $Cr$  از الگوریتم زیر بهره برده می‌شود (غفاری نسب و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳):

**گام اول:** برای  $Cr = 0:0.1:1$  گام‌های دوم تا پنجم را تکرار کنید،  
**گام دوم:** در سطح  $Cr$  انتخاب شده تقاضای مشتریان را مشخص نموده و جواب بهینه مسأله را بیابید،  
 - الگوریتم زیر برنامه تولید عدد تصادفی را برای مشخص نمودن میزان تقاضای یال اجرا کنید.

### زیر برنامه تولید عدد تصادفی:

**زیر گام اول:** قرار بده  $i = 1$

**زیر گام دوم:** یک عدد تصادفی  $m_i$  بین حد بالا و پایین عدد فازی تقاضای یال  $(i, j)$  تولید کنید، مقدار عضویت آن را  $f$  بر اساس تابع عضویت تقاضای یال  $(i, j)$  مشخص کنید،

**زیر گام سوم:** عدد تصادفی  $r$  را در بازه  $[0, 1]$  تولید کنید.

**زیر گام چهارم:** اگر  $r \leq f$  بود،  $m_i$  را به عنوان مقدار واقعی تقاضای یال  $(i, j)$  معرفی کنید و به زیر گام ۵ بروید و در غیر این صورت به زیر گام ۲ بروید.  
**زیر گام پنجم:**  $i$  را یک واحد افزایش دهید. اگر  $i \leq n$  به زیر گام ۲ بروید و در غیر این صورت به زیر گام ۶ بروید.

**زیر گام ششم:** پایان.

**گام سوم:** با توجه به تقاضای شبیه‌سازی شده یال‌های ضروری، هزینه تورهای بهینه در سطح  $Cr$  مشخص را بدست آورید. این هزینه‌ها برابر هزینه شکست‌های رخ داده در نظر گرفته می‌شود.

**گام چهارم:** برای ۱۰۰۰ مرتبه گام‌های دوم و سوم را انجام دهید و میانگین هزینه‌ها را با عنوان "هزینه‌های اضافی ناشی از شکست" محاسبه کنید.

<sup>1</sup> Ghaffari-Nasab et al.

**گام پنجم:** مقدار  $Cr$  با کمترین مقدار میانگین تابع هدف را به عنوان  $Cr$  بهینه گزارش کنید.

با افزایش  $Cr$  از 0 به سمت 1، میزان تقاضای برنامه‌ریزی شده کاهش می‌یابد پس می‌توان انتظار داشت تابع هدف برنامه‌ریزی شده نیز کاهش یابد. اما با افزایش  $Cr$  میزان شکست در مسیر وسایل نقلیه افزایش می‌یابد؛ از طرفی چون تابع هدف کل برابر جمع تابع هدف برنامه‌ریزی شده و میزان شکست مسیرها می‌باشد می‌توان ادعا کرد که به ازای مقدار مشخصی از  $Cr$  تابع هدف کل کمینه می‌شود.

#### ۴-۵- روش های حل مسأله MTVRPTW

در این بخش ابتدا به معرفی روش های استفاده شده جهت تولید جواب های اولیه در هر مسأله و هم چنین به بررسی الگوریتم های منتخب حل مسأله با توجه به بررسی ادبیات موضوع پرداخته می‌شود.

به دلیل درجه پیچیدگی بالای مسأله پایه یعنی VRP و VRPTW (سولومن<sup>۱</sup>، ۱۹۸۷)، حل مدل پیشنهادی پژوهش توسط روش های دقیق کارآمد نمی‌باشد. بنابراین، یک روش ابتکاری جهت تولید جواب اولیه و الگوریتم جدید فراابتکاری GWO جهت حل مسأله پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر، از الگوریتم SA نیز به عنوان رقیب الگوریتم GWO و جهت ارزیابی کارایی آن در حل مسائل با ابعاد بالا استفاده می‌شود. در بخش های بعدی سازوکار الگوریتم های پیشنهادی و الگوریتم ابتکاری جهت تولید جواب های اولیه مناسب شرح داده می‌شود.

از جمله دلایل اصلی انتخاب الگوریتم جدید GWO جهت حل مسأله بهینه سازی پیشنهادی این پژوهش این است که، پس از بررسی ادبیات موضوعی مشخص شده است که این الگوریتم با استفاده از توابع تست استاندارد ارزیابی می‌شود که بیانگر خصوصیات جستجو و بهره برداری برتر نسبت به سایر تکنیک های هوش ازدحامی می‌باشد (فریس و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). علاوه بر این، این الگوریتم به صورت موفقیت آمیزی برای حل مسائل

<sup>1</sup> Solomon

<sup>2</sup> Faris et al.

مختلف بهینه‌سازی مهندسی بکارگرفته شده است و عملکرد بسیار بالایی در مقابل سایر الگوریتم‌های شناخته شده از خود نشان داده است (فریس و همکاران، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، این الگوریتم تعداد پارامترهای کمی داشته و براحتی قابل پیاده‌سازی است و در پژوهش انجام شده توسط گوپتا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) برتری آن نسبت به چندین الگوریتم مشابه به اثبات رسیده است.

از سوی دیگر، جهت ارزیابی الگوریتم GWO از الگوریتم SA استفاده شده است که دلیل اصلی آن نیز کاربرد فراوان در حل مسائل بهینه‌سازی (سونگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵) از یک سو و از سوی دیگر، سادگی پیاده‌سازی، قابلیت بالای حل مسائل بزرگ بهینه‌سازی ترکیبی و همگرایی کارا می‌باشد (کوبوتانی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳).

#### ۱-۵-۴- الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم GWO، یک الگوریتم فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله مراتب رهبری و روش شکار آنها را تقلید می‌کند. این الگوریتم ابتدا توسط میرجلیلی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) بر مبنای شکار دسته جمعی آنها ارائه شده است. گرگ خاکستری از خانواده گرگ‌های کشور کانادا است. گرگ‌های خاکستری در بالای زنجیره غذایی قرار دارند و ترجیح می‌دهند به صورت گروهی زندگی کنند و بطور میانگین، گروه‌های آن‌ها ۵-۱۲ نفر است. جالب توجه است که آن‌ها حکومت خیلی سختگیرانه‌ای دارند. به این صورت که گرگ آلفا، گرگ حاکم در گروه نامیده می‌شود، چرا که دستورات او باید توسط گروه پیروی شود. آلفاها اساساً مسئول تصمیم‌گیری درباره شکار، محل خواب، زمان حرکت و ... هستند. دومین سطح درجه بندی گرگ‌های خاکستری، بتا است، بتاها گرگ‌های تحت امر آلفا هستند که به آلفا در تصمیم‌گیری و دیگر فعالیت‌های گروه کمک می‌کنند. گرگ بتا، احتمالاً بهترین کاندیدا برای آلفا شدن است و نقش یک معاون را برای آلفا و ناظم را برای گروه بازی

<sup>1</sup> Gupta et al.

<sup>2</sup> Song et al.

<sup>3</sup> Kubotani et al.

<sup>4</sup> Mirjalili et al.

می کند. پایین ترین طبقه گرگ خاکستری امگا است. گرگ های امگا نقش قربانی را برای سایر اعضای گروه دارند. آن ها آخرین گرگ هایی هستند که اجازه خوردن غذا را دارند. اگر گرگی آلفا، بتا یا امگا نباشد او فرمانبردار یا دلتا نامیده می شود. گرگ های دلتا از آلفاها و بتاها تبعیت می کنند و به امگاها حکمرانی می کنند. برای مدل سازی ریاضی حکومت اجتماعی گرگ ها هنگام طراحی GWO، شایسته ترین راه حل را گرگ آلفا ( $\alpha$ ) نامگذاری می کنند.

در نتیجه، دومین و سومین راه حل های بهتر به ترتیب گرگ های  $\beta$  و  $\delta$  نامیده شدند. راه حل های باقیمانده فرض می شود که  $\omega$  هستند. لذا در الگوریتم GWO، بهینه سازی با  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  رهبری می شود و گرگ های  $\omega$  از این سه دسته پیروی می کنند. گرگ های خاکستری در طول شکار طعمه را دور می زنند. برای مدل سازی ریاضی رفتار دور زدن روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵) پیشنهاد شده است:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|, \quad (14-4)$$

$$\vec{X}(t+1) = X_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, \quad (15-4)$$

که  $t$  نشان دهنده شماره تکرار فعلی،  $A$  و  $C$  ضریب بردار،  $\vec{X}_p$  بردار موقعیت شکار، و  $X$  نشاندهنده بردار موقعیت یک گرگ خاکستری است. بردارهای  $A$  و  $C$  مطابق روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) محاسبه می شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad (16-4)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2, \quad (17-4)$$

عناصر  $\vec{a}$  به طور خطی از ۲ به ۰ تحت مسیر تکرارها کاهش می یابند و  $r_1$  و  $r_2$  بردارهای تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند.

گرگ های خاکستری توانایی تشخیص موقعیت طعمه و دور زدن آن ها را دارند. شکار کردن معمولاً توسط آلفا راهنمایی می شود. همچنین بتا و دلتا ممکن است بعضی اوقات در شکار مشارکت کنند. بنابراین، در یک فضای جستجوی مطلق هیچ راه حلی درباره موقعیت بهینه (شکار) نداریم. برای شبیه سازی ریاضی رفتار شکار گرگ های خاکستری فرض می کنیم که آلفا (بهترین حل کاندیدا)، بتا و دلتا آگاهی کافی درباره موقعیت بالقوه شکار دارند.

بنابراین، اولین سه راه حل بهتر بدست آمده تا اینجا را ذخیره می‌کنیم و عامل‌های دیگر جستجو (امگاها) را مجبور می‌کنیم تا موقعیت خودشان را مطابق موقعیت بهترین عامل‌های جستجو بروز کنند (شکل ۴-۲). این عملیات مطابق روابط (۴-۱۸) تا (۴-۲۰) انجام می‌شود:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad (18-4)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|,$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|,$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad (19-4)$$

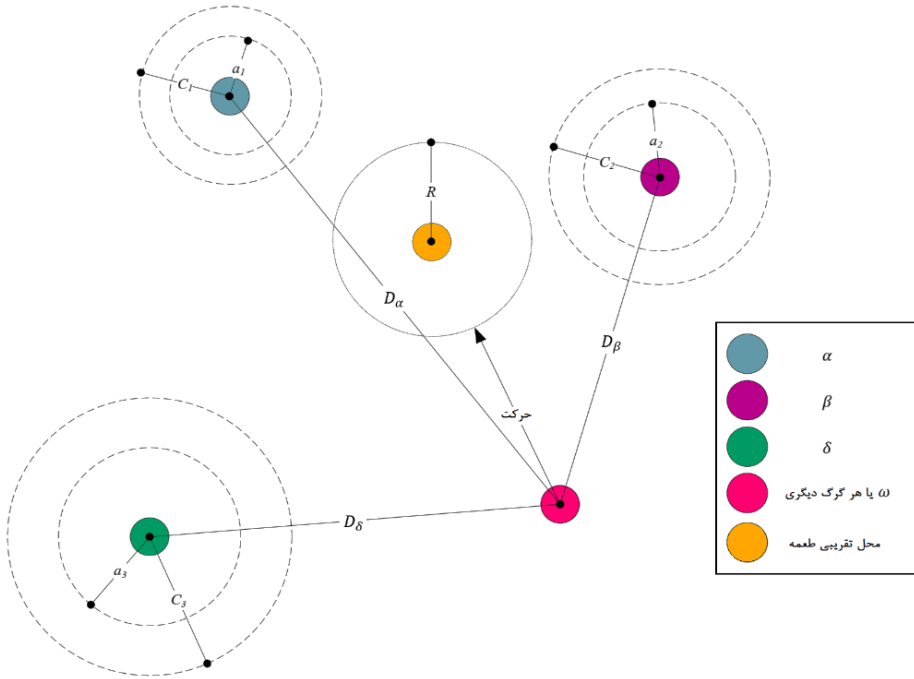
$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\beta),$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\delta),$$

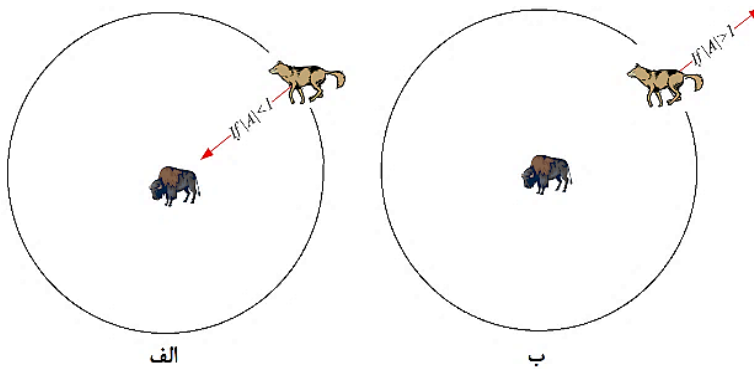
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}. \quad (20-4)$$

به طور خلاصه در الگوریتم GWO فرایند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری (راه‌های کاندید) شروع می‌شود. در طول دوره تکرار، گرگ‌های آلفا و بتا و دلتا موقعیت احتمالی شکار را برآورد می‌کنند.

هر راه حل کاندید فاصله خود را با طعمه بروز رسانی می‌کند. پارامتر  $a$  از مقدار ۲ تا ۰ کاهش پیدا می‌کند تا فرایند شناسایی و حمله به طعمه را تقویت نمایند. زمانیکه  $|A| > 1$  باشد، راه حل‌های کاندید واگرا می‌شوند و زمانیکه  $|A| < 1$  باشد راه حل‌های کاندید همگرا می‌گردند. شکل ۴-۳ نیز این مورد را به روشنی نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۴. بروزرسانی موقعیت در الگوریتم GWO.



شکل ۳-۴. مکانیزم حمله به طعمه در برابر جستجوی طعمه.

با توجه به شکل ۳-۴، تا زمانی که  $|A| < 1$  باشد، گرگ‌ها مجبور به حمله به سوی طعمه خواهند بود و تا زمانی که  $|A| > 1$  باشد، به امید یافتن طعمه بهتری از طعمه فعلی دور می‌شوند. بردار  $\vec{C}$  نیز به عنوان موانع موجود در طبیعت که نزدیک شدن گرگ‌ها به شکار را کند می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. این بردار منجر به تخصیص وزن به شکار شده و آن

را برای گرگ ها غیر قابل دستیابی تر می کند. این بردار بر خلاف  $a$  به صورت خطی از ۲ تا ۰ کاهش نمی یابد و با توجه به رابطه (۳۶)، برداری تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است. در واقع، هنگامیکه  $C > 1$  باشد، تاثیر بیشتری در شکار برای تغییر موقعیت گرگ لحاظ می شود و هنگامیکه  $C < 1$  باشد این تاثیر کمتر خواهد بود. جستجوی محلی به نحوه عملکرد پارامتر و نحوه انتخاب نخبه گرایی به جهت بروزرسانی جمعیت جواب های کاندید، وابستگی زیادی دارد. این رویکرد در نهایت منجر به نزدیک شدن گرگ های آلفا، بتا و دلتا، و در نتیجه کاهش جستجوی محلی جهت یافتن بهینه سراسری خواهد شد. به عبارتی دیگر، کاهش جستجوی محلی باعث مستعد شدن الگوریتم GWO برای افتادن در دام بهینه محلی خواهد شد. بنابراین در این پژوهش، جهت افزایش کارایی الگوریتم از جستجوی محلی بخش ۴-۵-۴ نیز در اجرای الگوریتم استفاده می شود (در صورتیکه در الگوریتم GWO ساده اجرای آن کاربردی نیست). جهت درک بهتر مکانیزم الگوریتم GWO پیشنهادی، شبه کد آن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

ورود جمعیت گرگ های خاکستری  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ؛  
 مقداردهی به  $a, A$  و  $C$ ؛  
 برازش هر یک از عوامل جستجو را محاسبه کن؛  
 $X_{\alpha} =$  بهترین عامل جستجو؛  
 $X_{\beta} =$  دومین بهترین عامل جستجو؛  
 $X_{\delta} =$  سومین بهترین عامل جستجو؛  
 هنگامیکه بیشترین تعداد تکرارها  $t < T$  بود  
 برای هر عامل جستجو  
 موقعیت کنونی عامل جستجو را با استفاده از روابط  
 (۴-۱۸) - (۴-۲۰) بروزرسانی کن؛  
 پایان  
 مقادیر  $a, A$  و  $C$  را بروزرسانی کن؛  
 برازش همه عوامل جستجو را محاسبه کن؛  
 مقادیر  $X_{\alpha}, X_{\beta}$  و  $X_{\delta}$  را بروزرسانی کن؛  
 قرار بده  $t = t + 1$ ؛  
 پایان  
 مقدار  $X_{\alpha}$  را گزارش کن.

شکل ۴-۴. شبه کد الگوریتم GWO (مجاهد و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶).

<sup>1</sup> Medjahed et al.

## ۲-۵-۴- الگوریتم شبیه سازی تبرید

الگوریتم SA ابتدا توسط کرکپاتریک و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۳) معرفی شد و سپس مورد توجه بسیاری از پژوهشگران تا به امروز قرار گرفته است. دارای مکانیزمی جهت بهبود جواب‌های اولیه بوده و تمامی جواب‌های اولیه به صورت جداگانه با این الگوریتم بهبود داده می‌شوند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی محلی بوده که قابلیت فرار از دام بهینه‌های محلی را داراست. این الگوریتم توانایی بسیاری در حل مسائل با فضای حل غیرمحدب یا گسسته دارد و برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح نیز استفاده می‌شود (گلاور و کوچنبرگر<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). همچنین سادگی اجرا، خواص همگرایی و همینطور حرکات تپه‌نوردی برای فرار از دام بهینه محلی سبب شده است که از آن جهت بهبود جواب‌های اولیه ایجاد شده در هر تکرار استفاده شود. چارچوب کلی الگوریتم به این گونه است که با یک جواب اولیه الگوریتم شروع می‌شود، پارامترهای اولیه الگوریتم شامل تعداد تکرارهای الگوریتم در هر دم (M)، مقدار دمای اولیه ( $T_0$ )، نرخ کاهش دم (α)، مقدار دمای نهایی ( $T_{end}$ ) و ثابت بولتزمن (K) می‌باشد که قبل از شروع جستجو مقداردهی اولیه می‌شوند. سپس یک همسایگی برای جواب اولیه در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتیکه مقدار تابع هدف همسایه تولید شده بهتر از تابع هدف جواب باشد، همسایه جایگزین جواب شده و در غیر این صورت یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک تولید شده با مقدار رابطه الگوریتم مقایسه می‌گردد در صورتیکه عدد تصادفی از مقدار رابطه الگوریتم کمتر باشد جواب بدتر پذیرفته می‌شود. در هر دم تعدادی تکرار رخ می‌دهد و پس از آن دم کاهش می‌یابد. شرط توقف رسیدن به دمای نهایی است. برای اعمال جستجوی محلی از عملگرهای معرفی شده در بخش ۴-۵-۴ یعنی عملگرهای جابه‌جایی، تعویض، 2-Opt و Or-Opt استفاده می‌شود. در ادامه جهت درک بهتر، روند اجرای الگوریتم در شبه کد ارائه شده در شکل ۴-۵ آمده است:

<sup>1</sup> Kirkpatrick

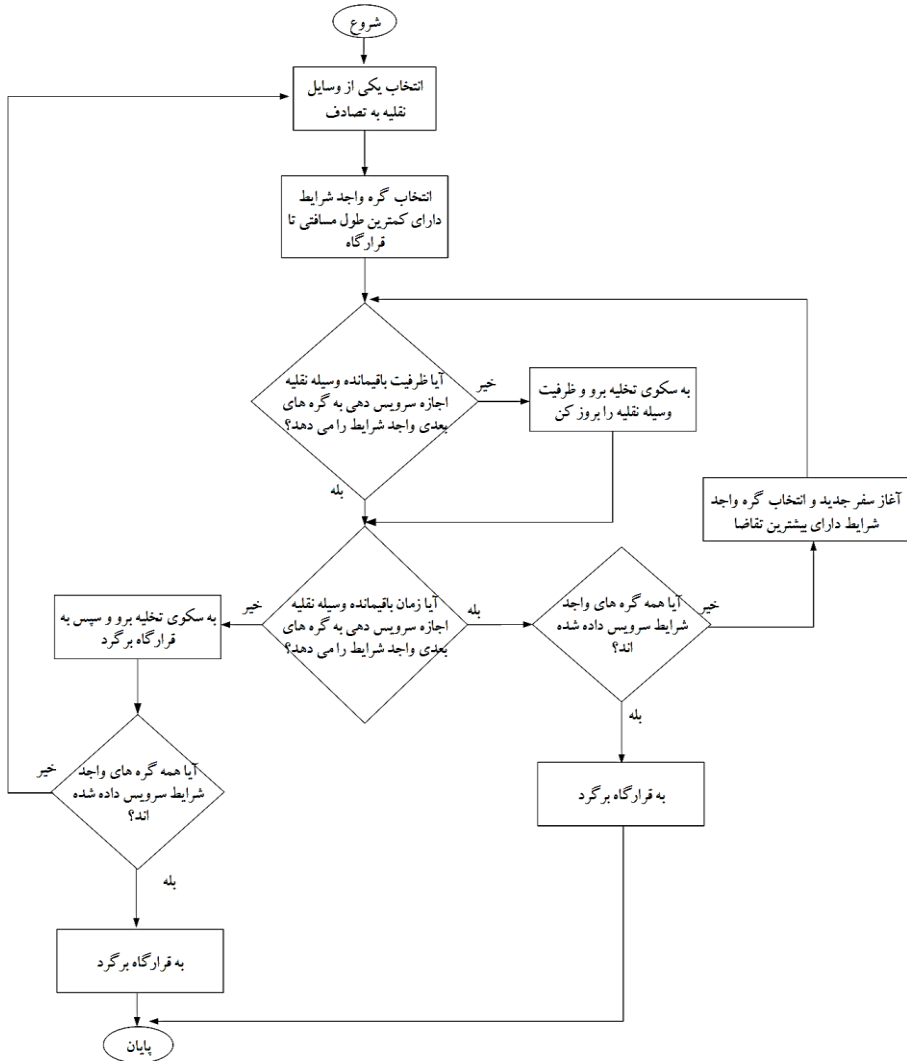
<sup>2</sup> Glover and Kochenberger

شروع  
 بهترین جواب اولیه را انتخاب کن (S1)  
 یک دمای اولیه انتخاب کن ( $t_0$ )  
 تازمانیکه  $t < t_{end}$   
 هنگامیکه (تکرار الگوریتم  $M$ )  
 یک همسایگی برای جواب S1 تولید کن؛  
 قرار بده  $\Delta = \text{تابع هدف (S1)} - \text{تابع هدف (S2)}$ ؛  
 اگر  $\Delta < 0$  بود، آنگاه  
 S2 را جایگزین S1 قرار بده؛  
 در غیر این صورت اگر  $\text{rand}(0,1) > e^{-\Delta/K.t}$ ، آنگاه  
 S2 را جایگزین S1 قرار بده؛  
 پایان  
 قرار بده  $M=M+1$   
 پایان  
 $t=a.t$   
 پایان

شکل ۴-۵. شبه کد الگوریتم SA (تیرکلایی و همکاران، ۲۰۱۸).

### ۳-۵-۴- الگوریتم تولید جواب اولیه

برای تولید جواب های اولیه برای مسأله، یک الگوریتم ابتکاری تصادفی سازنده توسعه داده می شود که مکانیزم دقیق آن به صورت فلوجارت در شکل ۴-۶ ارائه شده است. بدین منظور، تعداد جواب های اولیه تولید شده برابر با ۵۰۰ جواب در نظر گرفته شده است. گره واجد شرایط گره ای است که در محدودیت پنجره زمانی گنجانده می شود و هزینه جریمه برای خروج از آن در سیستم لحاظ نگردد.

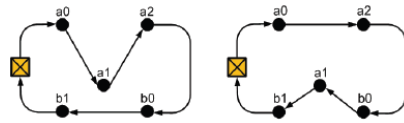


شکل ۴-۶. فلوچارت الگوریتم ابتکاری تولید جواب اولیه.

#### ۴-۵-۴- جستجوی محلی

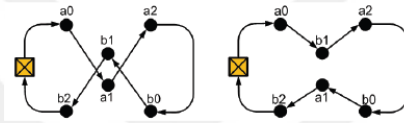
روشهای جستجوی محلی در ایجاد ساختار همسایگی نیز در الگوریتم در شکل های ۴-۷ الی ۴-۱۰ ارائه شده است.

**الف) جابه جایی:** در این روش محل قرارگیری یکی از گره‌ها در رشته تشکیل دهنده مسیر (از قرارگاه تا سکوی تخلیه و از سکوی تخلیه تا سکوی تخلیه) تغییر می کند.



شکل ۷-۴. عملگر جابجایی در جستجوی محلی.

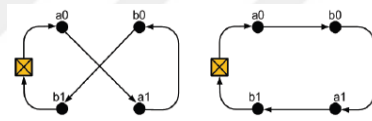
**ب) تعویض:** در این روش جای دو گره در رشته تشکیل دهنده جواب تغییر می کند.



شکل ۸-۴. عملگر تعویض در جستجوی محلی.

**ج) 2-Opt:** در این روش جای یک گره ابتدایی و یک گره انتهایی دو یال مسیر عوض

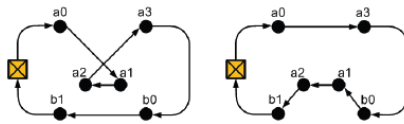
می شود.



شکل ۹-۴. عملگر 2-Opt در جستجوی محلی.

**د) Or-Opt:** در این روش جایگاه دو گره به صورت هم زمان در رشته تشکیل دهنده مسیر

عوض می شود.



شکل ۱۰-۴. عملگر Or-Opt در جستجوی محلی.

### ۵-۵-۴- نمایش جواب

نحوه نمایش جواب تاثیر مستقیم بر کیفیت نتایج الگوریتم های فراابتکاری دارد. در این بخش، از یک رشته جواب به صورت یک ماتریس دو بعدی برای نمایش توالی گره های بازدید شده در کنار نوع وسیله نقلیه مورد استفاده و شماره سفر آن استفاده می شود. از سمت چپ، سلول اول تعریف شده در ماتریس جواب بیانگر شماره وسیله نقلیه، سلول دوم در بردارنده مقدار صفر برای جدا کردن آن با بخش شماره سفر وسیله نقلیه می باشد. بنابراین، سلول سوم در برگیرنده شماره سفر وسیله نقلیه، سلول شماره چهارم در برگیرنده مقدار صفر و در نهایت سلول پنجم شامل مسیرهای طی شده در سفر مورد نظر وسیله نقلیه

مورد نظر می باشد. به عنوان مثال، برای نمایش رشته جواب شکل ۳-۱، به شکل ۴-۱۱ توجه کنید.

شماره وسیله نقلیه	جدا کننده	شماره سفر	جدا کننده	مسیر
1	0	1	0	1-2-4-7-8
1	0	2	0	8-6-5-3-8-1

شکل ۴-۱۱. نمایش جواب تولید شده الگوریتم های فراابتکاری MTVRPTW.

#### ۴-۶- روش های حل مسأله MTCARPTW

به دلیل درجه پیچیدگی بالای مسأله پایه یعنی CARP (گلدن و وانگ، ۱۹۸۱)، حل مدل پیشنهادی پژوهش توسط روش های دقیق کارآمد نمی باشد. بنابراین، یک روش ابتکاری جهت تولید جواب اولیه و الگوریتم فراابتکاری IMMAS جهت حل مسأله پیشنهاد می شود. از سوی دیگر، از الگوریتم SA و سیستم مورچگان بیشینه- کمینه<sup>۱</sup> (MMAS) نیز به عنوان رقیب الگوریتم IMMAS و جهت ارزیابی کارایی آن در حل مسائل با ابعاد بالا استفاده می شود. در بخش های بعدی سازوکار الگوریتم های پیشنهادی و الگوریتم ابتکاری جهت تولید جواب های اولیه مناسب شرح داده می شود. از جمله دلایل اصلی انتخاب الگوریتم IMMAS جهت حل مسأله بهینه سازی پیشنهادی این پژوهش این است که، پس از بررسی ادبیات موضوعی مشخص شده است که این الگوریتم ACO در حل مسائل CARP توانایی بسیار بالایی داشته است (باتیستا و همکاران، ۲۰۰۸؛ سانتوس و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰).

##### ۴-۶-۱- سیستم مورچگان

این روش از جمله روش های فراابتکاری می باشد، این روش که از رفتار مورچه ها در یافتن مسیر بین محل لانه و غذا الهام گرفته شده؛ اولین بار توسط دوریگو<sup>۳</sup> (۱۹۹۲) در پایان نامه دکترایش مطرح شد. دوریگو پس از ایده گرفتن از زندگی جمعیت مورچه ها، راه حل

<sup>۱</sup> Max-Min Ant System

<sup>۲</sup> Santos et al.

<sup>۳</sup> Dorigo

های خوبی در مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار داد و الگوریتم سیستم مورچگان<sup>۱</sup> (AS) را ارائه کرد. گروهی از مهم‌ترین مسائلی که به وسیله این روش مورد حل قرار گرفتند، مسائل فروشنده دوره گرد<sup>۲</sup> (TSP)، تخصیص و مسیریابی در شبکه‌های ارتباطی از راه دور و گسترش‌های آن‌ها می‌باشند. در AS وظیفه اصلی هر مورچه مصنوعی مانند همتای طبیعی خود، یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین یک جفت گره در یک گراف است که در آن، مسأله به نحو مناسبی روی آن نگاشته شده است. بنابراین، یک مسأله واقعی مانند TSP (اولین مسأله ای که با AS حل شد) به زیر مسأله‌هایی تبدیل می‌شود که در آن مورچه‌های مصنوعی وظیفه دارند که انتخاب گره بعدی را بر اساس فرومون ریخته شده روی یال واصل و فاصله تا گره بعدی، انجام دهند.

از آنجاییکه الگوریتم AS اولین نسخه از الگوریتم جامعه مورچگان (ACO) بود که برای این مسأله مورد استفاده قرار گرفت و متأسفانه نتایج خوبی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری آن زمان تولید نکرد، دانشمندان به تکاپو افتادند که نسخه‌های جدیدتری از این الگوریتم را ایجاد کنند که بتواند در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نتایج بهتری را بدست آورد. تلاش‌ها سبب شد که الگوریتم‌هایی مانند سیستم مورچگان نخبه‌گرا<sup>۳</sup> (EAS)، رتبه‌بندی مورچگان<sup>۴</sup> (RAS) و MMAS ارائه شوند که همگی نسخه‌هایی اصلاح شده از ACO هستند که در تابع احتمال انتخاب گره بعدی، ریختن و بروز کردن فرومون با یکدیگر تفاوت دارند. این اصلاحات سبب شد که نسخه‌های جدید در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به یکی از بهترین روش‌ها برای حل مسأله TSP تبدیل شوند و کارایی بیشتری از لحاظ زمان و کیفیت پیدا کنند. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان بعد از قالب‌بندی اولیه، در سه فاز تکرار می‌شود: در هر تکرار، یک سری جواب توسط مورچه‌ها ایجاد می‌شود. این جواب‌ها سپس توسط جستجوی محلی بهبود می‌یابند (این گام اختیاری است) و

<sup>1</sup> Ant System

<sup>2</sup> Traveling Salesman Problem

<sup>3</sup> Elite Ant System

<sup>4</sup> Rank Ant System

در نهایت فرومون‌ها بروز می‌شوند.

در این پژوهش از سیستم مورچگان بیشینه-کمینه استفاده شده است. سازنده بودن این الگوریتم و محدود کردن فرومون برای هر مسیر از وسایل نقلیه که از یک مقدار کمینه‌ای کمتر نمی‌شود مزیت اصلی آن برای ایجاد مسیر و در واقع جوابی که تابع هدف کل را بهینه کند، می‌باشد. این نسخه از الگوریتم جامعه مورچگان در واقع با محدود کردن مقادیر فرومون‌ها امکان انتخاب مسیر مشابه توسط مورچه‌ها را کاهش می‌دهد و در واقع از بروز پدیده رکود<sup>۱</sup> جلوگیری می‌کند.

## ۲-۶-۴- الگوریتم جامعه مورچگان بیشینه-کمینه بهبود یافته

نسخه MMAS توسط استوتزل و هوس<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) با ایجاد ۴ تغییر عمده در الگوریتم AS با هدف بهبود آن ارائه شد. اولین تغییر این بود که الگوریتم فقط اجازه فرومون‌گذاری روی یال‌های متناظر با بهترین جواب را بدهد که بهترین جواب می‌تواند متناظر با بهترین جواب تکرار فعلی یا بهترین جوابی که تاکنون بدست آمده است، باشد. متأسفانه این روش منجر به رکود هوشمندی در الگوریتم می‌شود. لذا تغییر دوم این بود که برای مقدار فرومون ردپای هر یال یک کران بالا و پایین همانند  $[t_{min}, t_{max}]$  تعیین می‌شود تا جلوی تراکم بیش از حد فرومون در بعضی یال‌های به خصوص کمتر شود. تغییر سوم این بود که مقدار اولیه فرومون یال‌ها برابر کران بالا ( $t_{max}$ ) باشد و در عین حال نرخ تبخیر فرومون کوچک باشد تا الگوریتم در تکرارهای آغازین بتواند جواب‌های متنوع‌تری را پیدا کند. تغییر چهارم آن بود که به منظور جلوگیری از بروز رکود هوشمندی الگوریتم، هرگاه یکی از موارد زیر رخ داد، مقدار فرومون کلیه یال‌ها برابر مقدار آغازین‌شان ( $t_{max}$ ) شود:

- هرگاه در چند تکرار متوالی هیچ بهبودی در بهترین جواب هر تکرار حاصل نشود.
- هرگاه بوسیله یک شاخص آماری مناسب معلوم شد که الگوریتم در مرز ابتلا به رکود هوشمندی قرار دارد.

در این پژوهش یک روش بهبود یافته از MMAS با نام IMMAS ارائه می‌شود که

<sup>1</sup> Stagnancy

<sup>2</sup> Stützle and Hoos

در دنباله فرومون گذاری با روش معمولی آن تفاوت دارد و به مکانیزم هموارسازی دنباله فرومون گذاری<sup>۱</sup> (PTS) معروف است. این امر سبب جلوگیری از همگرایی زودرس، فرار از نقاط بهینه محلی و افزایش فضای جستجوی کارا برای الگوریتم می شود (استوتزل و هوس، ۲۰۰۰). به این الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم جامعه مورچگان پیشینه-کمینه بهبود یافته<sup>۲</sup> (IMMAS) می گوئیم.

✓ چارچوب کلی این الگوریتم بر اساس اطلاعات ابتکاری از قرار زیر است:

- اندازه جمعیت: که برابر است با تعداد مورچگان در هر تکرار

- ساختار جواب: از آنجاییکه این الگوریتم سازنده است، بنابراین پس از آغاز سفر از قرارگاه برای هر وسیله نقلیه، گره اول تشکیل دهنده یال را بطور تصادفی انتخاب می کند، سپس در تعریف همسایگی ( $N_i$ ) هر مورچه براساس میزان فرومون یال ها و مسافت بین گره ها و از روی رابطه (۴-۲۱) مقدار احتمال ( $P_{ij}$ ) برای رفتن گره  $i$  به گره  $j$  برای هر مورچه (که  $(i, j)$  عضو مجموعه یال های شبکه باشد) بدست می آید.

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^A \times \eta_{ij}^B \times d_{ij}^C}{\sum_j \tau_{ij}^A \times \eta_{ij}^B \times d_{ij}^C} \quad j \in N_i, (i, j) \in E, \quad (4-21)$$

بطوریکه:

✓  $\tau_{ij}$ : مقدار فرومون موجود در یال  $(i, j)$

✓  $\eta_{ij}$ : یکی از ضرایبی است که از اهمیت بالایی برخوردار است و در انتخاب یال ها به خصوص در تکرارهای اولیه الگوریتم که در آن فرومون از اهمیت کمتری برخوردار است، نقش کلیدی دارد و برابر عکس میزان مسافت بین دو گره تشکیل-دهنده یال در نظر گرفته می شود.

✓  $d_{ij}$ : میزان تقاضای یال  $(i, j)$  که اگر میزان تقاضای یال برابر صفر باشد، در رابطه احتمال به جای مقدار 0، مقدار 1 قرار می گیرد.

<sup>1</sup> Pheromone trail smoothing

<sup>2</sup> Improved MMAS

- ✓  $A$ : میزان اثر گذاری مقدار فرومون موجود بر روی یال  $(i, j)$  در محاسبه احتمال
- ✓  $B$ : میزان اثر گذاری میزان مسافت بین دو گره تشکیل دهنده یال در محاسبه احتمال
- ✓  $C$ : میزان اثر گذاری میزان تقاضای یال بین دو گره در محاسبه احتمال
- شرایط خاتمه الگوریتم: پس از رسیدن به شرایط توقف الگوریتم که تعداد تکرار نهایی می باشد، بهترین جواب بدست آمده گزارش می شود.
- در جدول ۴-۱ تمامی علائم مرتبط با این الگوریتم تشریح می شود.
- جدول ۴-۱. علائم بکار رفته در طراحی الگوریتم IMMAS.

علائم	تعریف
$P_{ij}$	احتمال عبور از یال $(i, j)$
$\tau_{ij}$	مقدار فرومون موجود بر روی یال $(i, j)$
$\tau_{ij}^{new}$	میزان بروز شده فرومون بر روی یال $(i, j)$
$\rho$	نرخ تبخیر فرومون
$0 < \delta < 1$	میزان اثر گذاری انحراف فرومون از حد بالای فرومون
$SP_{ij}$	کوتاه ترین مسیر رسیدن از نقطه $i$ به نقطه $j$
$\eta_{ij}$	برابر با $\frac{1}{SP_{ij}}$
$N_b$	تعداد جواب موجود در بازه ای است که جواب در آن قرار دارد
$A$	ضریب تاثیر مقدار فرومون موجود بر روی یال $(i, j)$ در محاسبه احتمال $P_{ij}$
$B$	ضریب تاثیر کوتاه ترین مسیر بین دو یال در محاسبه احتمال $P_{ij}$
$C$	ضریب تاثیر میزان پارامتر تقاضا
$\Delta\tau_{ij}^t$	مقدار فرومون ریخته شده روی زوج کمان $(i, j)$ توسط مورچه های موجود در جمعیت در تکرار $t$
$\Delta\tau_{ij}^{best}$	مقدار فرومون ریخته شده روی زوج کمان $(i, j)$ توسط بهترین جواب
$f(S_r)$	مقدار تابع هدف $r$ امین جواب موجود در جمعیت
$f(S_{best})$	بهترین مقدار تابع هدف یافت شده در آن تکرار

علائم	تعریف
$\tau_{max}$	کران بالای میزان فرومون در هر یال
$K'$	یک مقدار ثابت
$\mu_r$	وزن جواب $r$ ام
$N_i$	مجموعه نقاط واقع در همسایگی گره $i$ ( $i \in V[E]$ )
$R$	مجموعه جواب های بدست آمده

هم چنین بر اساس روابط زیر مقادیر متغیرهای این الگوریتم تعیین می شوند:

$$\mu_r = \frac{1}{f(s_r)} \quad \forall r \in R, \quad (4-22)$$

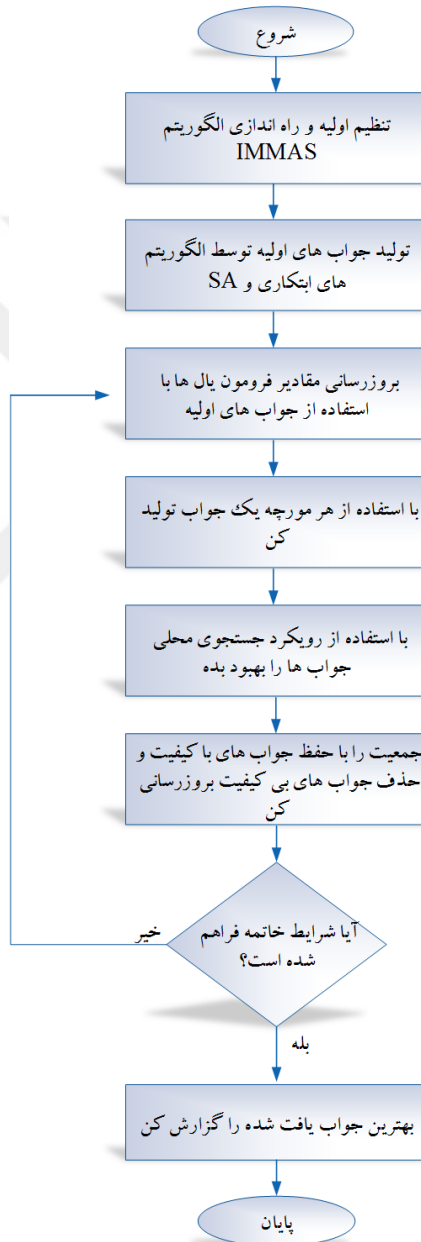
$$\tau_{ij}^{new} = \tau_{ij}(1-\rho) + \Delta\tau_{ij}^{best} + \sum_{r=1}^R \Delta\tau_{ij}^r, \quad \Delta\tau_{ij}^r = \frac{1}{f(s_r)}, \quad (4-23)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{best} = \frac{1}{f(s_{best})} \quad \forall (i, j) \in E, \forall r \in R,$$

$$\left[ \frac{\tau_{Max}}{k'}, \tau_{Max} \right], \tau_{Max} = \frac{1}{\rho f(s_{best})}, K' = \frac{(n-2)^2 \sqrt{0.05}}{2(1-\sqrt{0.05})}, \quad (4-24)$$

$$\tau_{ij}^*(\text{iteration}) = \tau_{ij}(\text{iteration}) + \delta(\tau_{max}(\text{iteration}) - \tau_{ij}(\text{iteration})) \quad \forall (i, j) \in E. \quad (4-25)$$

جهت درک بهتر این الگوریتم شکل ۴-۱۲ به ارائه فلوچارت پیشنهادی می پردازد.



شکل ۱۲-۴. فلوجارت پیشنهادی الگوریتم IMMAS.

### ۳-۶-۴- الگوریتم شبیه سازی تبرید

سازوکار این الگوریتم دقیقاً همانند الگوریتم SA پیشنهادی در مسأله MTRPTW

می باشد ولی تنها با این تفاوت که نحوه نمایش جواب و رویکرد جستجوی محلی مورد استفاده مسأله MTCARPTW متفاوت بوده که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۴-۶-۴- الگوریتم تولید جواب های اولیه

در این مقاله از یک روش تولید جوابهای اولیه ابتکاری بهره برده شده است. این روش مبتنی بر الگوریتم تصادفی و الگوریتم SA می باشد. این روش شامل سه بخش است. در بخش اول تعدادی جواب تصادفی ساخته می شود در بخش دوم با توجه به یک رویه پیشنهادی از بین جواب های تولید شده تعدادی جواب که کیفیت مناسبی دارند انتخاب می شوند و در بخش سوم جواب های انتخاب شده توسط الگوریتم SA بهبود می یابند.

گام های این الگوریتم به صورت زیر است :

- (۱) یک وسیله نقلیه را به تصادف انتخاب کنید و سفر اول را از قرارگاه شروع کن،
- (۲) در هر مرحله، از میان  $L$  یال تقاضا با کمترین فاصله نسبت به آخرین یال بازدید شده،  $k$  یالی را که بیشترین تقاضا را دارند در نظر بگیرید و یکی را به تصادف انتخاب کنید. در انتخاب هر یال تقاضا، میزان ظرفیت وسایل نقلیه، پنجره زمانی تعریف شده آن و زمان باقیمانده وسایل نقلیه با توجه به در نظر گرفتن زمان طی یال انتخابی و زمان رفتن از منطقه عملیاتی به سکوی تخلیه در نظر گرفته می شود. اشاره به این نکته ارزشمند است که وسایل نقلیه همواره از طریق کوتاه ترین مسیر که توسط الگوریتم دایجسترا تعیین شده است، مسیریابی یال های تقاضا را طی می کنند. در صورتی که ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه از یک مقدار مشخص کمتر باشد و یا کل زمان در دسترس وسیله از یک زمان مشخص کمتر باشد، تعداد  $L$  یال تقاضا با کمترین فاصله انتخاب می - شوند. توضیحات بیشتر در این مورد، در ادامه الگوریتم ارائه می شود.

- (۳) در صورتی که محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه امکان انتخاب هیچ یالی از بین یال های تقاضا را ندهد وسیله به سکوی تخلیه می رود. همچنین در صورتی که محدودیت

زمان وسیله امکان تشکیل سفر جدید را بدهد به گام ۲ بروید و در غیر این صورت به گام ۱ بروید. گام های الگوریتم را تا سرویس دهی به تمام یال های تقاضا تکرار کنید.

۴) اگر تمام یال های تقاضا پوشش داده شده باشند، الگوریتم را به اتمام برسان.

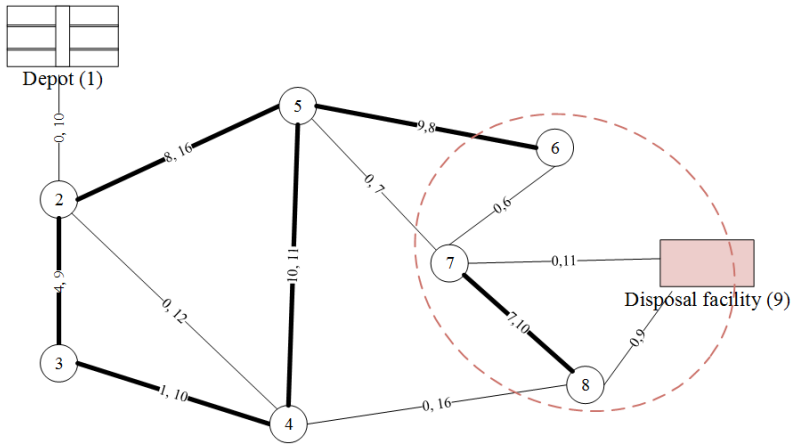
در هنگام انتخاب یال تقاضا، توجه همزمان به فاصله، تقاضا و پنجره زمانی باعث می شود که اولاً یال های نزدیکتر به یال فعلی انتخاب شوند و ثانياً ابتدا یال های با میزان تقاضای بالا پوشش داده شوند که این امر باعث می شود که تعداد بیشتری یال دارای تقاضا در یک سفر پوشش داده شود و در نهایت کمترین میزان جریمه دیرکرد و زودکرد وارد سیستم شود. فرض کنید ۴ یال با تقاضاهای به ترتیب ۱، ۴، ۸، ۱۰ در دسترس باشند با فرض آنکه ظرفیت وسیله برابر با ۱۲ است. اگر یال های با تقاضای پایین در ابتدا انتخاب شوند، وسیله نقلیه اول پس از عبور از یال های با تقاضای ۱ و ۴ دیگر نمی تواند یال های دیگر را پوشش دهد و به دیو باز می گردد و برای پوشش دو یال دیگر به دو سفر دیگر نیاز است اما انتخاب یال های با تقاضای ۴ و ۸ برای یک سفر و یال های با تقاضای ۱۰ و ۱ برای سفر دوم می توان با دو سفر کل یال های دارای تقاضا را پوشش داد.

در هنگام انتخاب یال این موضوع مورد توجه قرار می گیرد که در صورتی که ظرفیت وسیله نقلیه در حال پر شدن باشد احتمال انتخاب یال نزدیکتر به سکوی تخلیه بیشتر می گردد. با فرض آنکه یال  $(h, i)$  آخرین یال دارای تقاضای بازدید شده،  $(p, j)$  یال کاندید دارای تقاضا،  $SP$  کوتاه ترین مسیر بین دو نقطه،  $C$  هزینه عبور یال (طول یال)،  $RT, RC$  و  $TW$  به ترتیب ظرفیت باقیمانده، زمان باقیمانده و مدت زمان سپری شده از وسیله نقلیه،  $MD$  میانگین تقاضای یال های دارای تقاضا،  $MC$  میانگین طول یال های دارای تقاضا،  $MAC$  میانگین زمان طی کل یال ها،  $SL$  و  $SU$  نیز به ترتیب کران پایین و بالای پنجره زمانی نرم و  $n$  سکوی تخلیه باشد، آنگاه در صورتی که  $RC$  از  $\alpha \times MD$  کمتر باشد تنها وقتی یال  $(p, j)$  پوشش داده می شود که روابط زیر بطور همزمان برقرار باشد.

$$SL(p, j) \leq TW(p, j) \leq SU(p, j) \quad (4-26)$$

$$SP(i, p) + C(p, j) + SP(j, n) \leq MC + SP(i, n) \quad (4-27)$$

رابطه (۲۶-۴) امکان سرویس دهی به یال تقاضا بر اساس پنجره زمانی جهت جلوگیری از اعمال هزینه جریمه را نشان می دهد. رابطه (۲۷-۴) می کند که وقتی ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه از مقدار مشخصی کمتر شد تنها یال هایی می توانند مورد بازدید قرار گیرند که هزینه بازدید از آن ها و سپس رفتن به سکوی تخلیه تنها کمی بیشتر از حرکت وسیله نقلیه به سمت سکوی تخلیه بدون بازدید از یال دارای تقاضا باشد. این قانون سبب می شود در انتهای سفر (با توجه به محدودیت ظرفیت و زمان وسیله نقلیه) در صورت امکان تنها یال های نزدیک به کوتاه ترین مسیر حرکت از آخرین یال بازدید شده به سکوی تخلیه جهت بازدید انتخاب شوند. انتخاب مقدار  $\alpha$  تاثیر زیادی در کیفیت جواب های حاصل دارد. مقدار زیاد  $\alpha$  باعث می شود که شرط شماره ۱ (رابطه (۲۷-۴)) در ابتدای تشکیل سفر چک گردد و اجازه بازدید از یال های دور از سکوی تخلیه به وسیله نقلیه داده نشود و مقدار کم  $\alpha$  سبب می شود که شرط شماره ۱ خیلی دیر چک شود و عملاً شرط ۱ تاثیری بر تشکیل سفرها نداشته باشد. در این پژوهش مقدار  $\alpha = 1.5$  در نظر گرفته شد (سانتوس و همکاران، ۲۰۰۹). بیان این موضوع ارزشمند است که در صورتی که هیچ یال دارای تقاضایی که شرایط تخصیص به وسیله نقلیه را داشته باشد، وجود نداشته باشد؛ وسیله به طور مستقیم به سکوی تخلیه می رود. به طور مشابه از همین رابطه می توان برای محدودیت زمان نیز بهره برد. به طوری که اگر زمان باقیمانده از  $\alpha \times \text{MAC}$  کمتر باشد تنها وقتی یال  $(p, j)$  پوشش داده می شود که رابطه (۲۷-۴) برقرار باشد. بنابراین وقتی ظرفیت و یا زمان باقیمانده از حدی کمتر باشد تنها یال هایی شانس انتخاب شدن دارند که در رابطه (۲۶-۴) صدق کنند. برای بیان بهتر این موضوع یک مثال در شکل ۴-۱۳ ارائه شده است که امکان سرویس دهی بر اساس رابطه (۲۷-۴) را بررسی می کند. فرض بر آن است که رابطه (۲۶-۴) برقرار باشد.



$MC=10.6$        $e(h,i)=e(5,6), e(p,j)=e(7,8), C(p,j)=10$   
 $MD=8.1$        $SP(i,p)=SP(6,7)=6, SP(j,n)=SP(8,9)=9, SP(i,n)=SP(6,9)=17$   
 $RT=50$   
 $MAC=9.5$        $[RC < \alpha \times MD]$  or  $[RT < \alpha \times MAC]$      $[12 < 12.15]$  or  $[50 < 9.5]$   
 $RC=12$   
 $SP(i,p)+C(p,j)+SP(j,n) \leq MC+SP(i,n), \quad 25 \leq 27.6$   
 So  $e(7,8)$  is assigned to the tour

شکل ۱۳-۴. روش انتخاب یال جهت سرویس دهی.

در شکل ۴-۱۳ مقادیر هر یال به ترتیب تقاضا و طول یال هستند و گره های ۱ و ۹ به ترتیب بیانگر دپو و سکوی تخلیه هستند. همانگون که در شکل ارائه شده است با توجه به اینکه ظرفیت باقیمانده وسیله نقلیه (۱۲) کمتر از  $\alpha \times MD$  (۱۲.۵) است لذا رابطه (۲۷-۴) برای انتخاب یال (۷,۸) چک می شود و چون این شرط برای یال مذکور صادق است این یال به تور اضافه می شود.

در بخش دوم الگوریتم از بین جواب های تولید شده تعدادی جواب به گونه ای انتخاب می شود که اولاً کیفیت مناسبی داشته باشند و ثانیاً نسبت به هم فاصله داشته باشند تا پراکندگی در بین جواب ها وجود داشته باشد و این امر باعث گردد تا الگوریتم زود همگرا نگردد. برای این منظور رویه ای برای انتخاب جواب های اولیه به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- (۱) به تعداد ۱۰۰۰ جواب اولیه توسط رویه پیشنهادی بخش اول ایجاد می شوند،
- (۲) جوابهای مشابه<sup>1</sup> حذف می شوند (جواب هایی مشابه در نظر گرفته شدند که دارای تابع هدف یکسان هستند،
- (۳) تعداد 3Pop با کمترین مقدار تابع هدف از جواب های اولیه انتخاب می شوند. Pop (جمعیت) پارامتر تعداد جواب اولیه الگوریتم است،
- (۴) جواب های انتخاب شده به صورت غیر نزولی مرتب شده و بازه بهترین جواب و بدترین جواب به تعداد Pop قسمت مساوی تقسیم می شوند،
- (۵) به هر جواب مقدار  $\frac{1}{N_b}$  نسبت دهید.  $N_b$  تعداد جواب های موجود در بازه b است که جواب در آن قرار دارد.

بهترین جواب و بدترین جواب موجود در لیست 3Pop را برای جمعیت اولیه انتخاب کنید و بقیه جمعیت اولیه را از بین جوابهای با بیشترین مقدار تخصیص داده شده انتخاب کنید.

#### ۵-۶-۴- جستجوی محلی

- به منظور بهبود جوابهای تولید شده از چندین جستجوی محلی بهره برده شده است
- جستجوی های محلی به کار رفته عبارتند از
- (۱) انتخاب دو وسیله نقلیه و جابه جایی آن،
- (۲) انتقال یک یال از یک سفر و انتخاب بهترین مکان استقرار از بین مکانهای قبل و بعد از یال های موجود در شعاع همسایگی یال انتخاب شده همان سفر،

---

<sup>1</sup> Clone

۳) انتقال یک یال از یک سفر به سفر دیگر و انتخاب بهترین مکان استقرار از بین مکانهای قبل و بعد از یال های موجود در شعاع همسایگی یال انتخاب شده با توجه به محدودیت ظرفیت و زمان،

۴) تغییر مکان دو یال در یک سفر و در بین دو سفر،

۵) تغییر مکان دو یال متوالی با دو یال متوالی در همان سفر و انتخاب بهترین مکان استقرار از بین مکانهای قبل و بعد از یال های موجود در شعاع همسایگی لااقل یکی از یال انتخاب شده،

۶) تغییر مکان دو یال متوالی با دو یال متوالی در سفر دیگر و انتخاب بهترین مکان استقرار از بین مکانهای قبل و بعد از یال های موجود در شعاع همسایگی لااقل یکی از یال انتخاب شده با توجه به محدودیت ظرفیت و زمان و سائط نقلیه،

۷) استفاده از جستجوی محلی 2-opt (لاکومه و همکاران، ۲۰۰۴) و 3-opt (منیزو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴).

یال هایی در شعاع همسایگی یک یال قرار می گیرند که فاصله آنها تا یال انتخابی از مقدار میانگین فاصله بین یال های دارای تقاضا بیشتر نباشد. سیاست اعمال جستجوهای محلی بدین صورت است که هر بار یک جستجوی محلی به تصادف انتخاب شده سپس تمامی حالات ممکن جستجوی همسایگی اعمال می شود و بهترین حالت به عنوان خروجی جستجوی محلی انتخاب شده بر گردانده می شود. در صورتیکه پس از اعمال جستجوی محلی بهبودی در جواب حاصل نشد جستجوی محلی دیگری به تصادف انتخاب شده و بر جواب اعمال می شود. اعمال جستجوی محلی بر روی جواب با یکی از دو شرط متوقف می شود در یکی از جستجوهای محلی جواب اولیه بهبود پیدا کند و یا تمامی جستجوهای محلی بر جواب اعمال شود.

<sup>1</sup> Maniezzo et al.

### ۶-۶-۴- نمایش جواب

نحوه تعریف رشته جواب برای MTCARPTW نیز همانند MTRVPTW بوده تنها با این تفاوت که در نمایش مسیر یال‌ها مورد نظر می‌باشند. به عنوان مثال، برای نمایش رشته جواب شکل ۳-۲، به شکل ۴-۱۴ توجه کنید.

شماره وسیله نقلیه	جدا کننده	شماره سفر	جدا کننده	مسیر
1	0	1	0	(1-2)-(3-4)-(4-8)
1	0	2	0	(8-5)-(5-6)-(6-7)-(7-8)

شکل ۴-۱۴. نمایش جواب تولید شده الگوریتم‌های فراابتکاری MTCARPTW.

### ۷-۴- طراحی آزمایشات با استفاده از روش تاگوچی

همانطور که در بخش‌های قبلی مشاهده شد، الگوریتم پیشنهادی دارای تعداد زیادی فاکتور و پارامتر بوده‌اند که هر یک از این پارامترها بر روی نتیجه نهایی و کارایی الگوریتم تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین دستیابی به ترکیب مناسب این فاکتورها می‌تواند عملکرد الگوریتم‌ها را تا حد زیادی بهبود ببخشد. یکی از اهداف طراحی آزمایشات<sup>۱</sup> (DOE) این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، بتوان تغییرات خروجی را مشاهده و شناسایی کرد.

روش‌های مختلفی برای طراحی آزمایش وجود دارد که یکی از اولین روش‌هایی که در این زمینه ارائه شد روش فاکتوریل است که تعداد آزمایش‌های کل را از رابطه  $N = L^m$  تعیین می‌کند. اشکال عمده این روش این است که در صورت وجود متغیرهای زیاد تعداد آزمایش‌ها خیلی زیاد می‌شود و این مسأله از نظر زمان و هزینه به هیچ وجه به صرفه نیست. بنابراین، محققین در راستای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به پژوهش پرداختند. یکی از این رویکردها، روش طراحی تاگوچی<sup>۲</sup> است.

این روش را می‌توان در ۴ گام کلی خلاصه کرد:

۱. معرفی عوامل موثر در واکنش،

<sup>1</sup> Design of Experiments

<sup>2</sup> Taguchi design method

۲. تعداد آزمایشات مورد نیاز،

۳. تحلیل جواب‌ها،

۴. ارزیابی شرایط بهینه.

در مرحله اول عوامل موثر را مشخص کرده و برای هر کدام چند حالت را در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعداد پارامترهای موثر و تعداد سطوح هر کدام، تعداد آزمایش‌ها مشخص می‌شود.

پس از تعیین تعداد آزمایش‌ها ماتریسی تشکیل داده می‌شود که سطرهای این ماتریس مشخص‌کننده شرایط آزمایش است. در این روش انتظار می‌رود که از تحلیل جواب‌ها نتایج زیر بدست آید:

- شرایط بهینه‌ای که در آن کیفیت مطلوب بدست می‌آید،
- میزانی که هر فاکتور روی عملکرد و کیفیت تأثیر گذار است،
- کدام فاکتور بیشترین تأثیر را دارد.

برای تحلیل آزمایش نیز دو روش ارائه می‌گردد:

۱- روش استاندارد ANOVA (تحلیل واریانس)،

۲- استفاده از نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup> (S/N).

مقدار S/N میزان پراکندگی را حول یک مقدار مشخص بیان می‌کند یا به بیان دیگر اینکه جواب‌های ما در بین چند آزمایش انجام شده چگونه تغییر کرده‌اند. به منظور کمینه کردن پراکندگی تابع هدف از نسبت S/N تاگوچی استفاده می‌گردد. نسبت‌های S/N عوامل نویز را به همراه پارامترهای قابل کنترل را شرح می‌دهد. روش تحلیل واریانس اگرچه ساده است، اما توانایی بررسی پراکندگی پاسخ‌ها را ندارد، بنابراین مواقعی که آزمایش‌ها تکرار می‌شوند، جواب دقیقی بیان نمی‌کند. از همین رو، در این پژوهش از رویکرد S/N استفاده می‌گردد. تاگوچی برای یک مسأله کمینه‌سازی رابطه زیر بنام کوچکتز بهتر را پیشنهاد کرده است (تاگوچی و همکاران، ۲۰۰۵).

<sup>1</sup> Signal to Noise

$$S/N = -10 \log \sum_{i=1}^k (y_i^2 / k) \quad (۲۸-۴)$$

بطوریکه  $y_i$  بیانگر میزان عملکرد آزمایش  $i$  ام و  $k$  تعداد کل تکرارهای آزمایش را نشان می‌دهد. بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز به کمینه کردن پراکندگی توابع هدف منجر می‌شود. تاگوچی توابع هدف را به سه دسته تقسیم می‌کند: هرچه کمتر بهتر<sup>۱</sup>، هرچه بیشتر بهتر<sup>۲</sup>، و بهتر اسمی<sup>۳</sup>. از آنجاییکه تابع هدف مسائل ما کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی است، جزء نوع اول محسوب می‌شود.

### ۱-۷-۴- تنظیم پارامتر الگوریتم‌های پیشنهادی پژوهش

در این بخش، مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌ها با استفاده از روش طراحی تاگوچی تعیین می‌شود. به عنوان مثال، در الگوریتم SA، ۵ متغیر به عنوان فاکتورهای قابل کنترل تعیین شده‌اند که عبارتند از: تعداد تکرارهای الگوریتم در هر دما ( $M$ )، مقدار دمای اولیه ( $T_0$ )، نرخ کاهش دما ( $\alpha$ )، ثابت بولتزمن ( $K$ ) و مقدار دمای نهایی ( $T_{end}$ ). درجه آزادی فاکتورهای مربوطه برابر ۱۰ است که از حاصل جمع تعداد سطوح هر فاکتور منهای ۱ بدست می‌آید. در نتیجه جدول مورد استفاده حداقل باید دارای ۱۰ سطر باشد و با توجه به تعداد فاکتورها که برابر با ۵ است، تعداد ستون‌های جدول نیز باید برابر با ۵ باشد. با جستجو در میان جداول مختلف تاگوچی که توسط نرم افزار آماری Minitab ارائه می‌شود، جدول مربوط به آرایه  $L^{27}$  برای بدین منظور پیشنهاد می‌شود.

برای اینکه بتوان نتایج حاصل از مسأله (بطور همزمان تابع هدف و زمان اجرای الگوریتم) را با هم مقایسه کرد و محاسبات مشترکی بر روی آن‌ها اعمال کرد، نتایج حاصله به صورت درصد تغییرات نسبی<sup>۴</sup> (RPD) محاسبه گردید. RPD پیشنهادی این پژوهش از طریق رابطه (۲۹-۴) بدست می‌آید:

<sup>1</sup> The smaller-the-better

<sup>2</sup> The larger-the-better

<sup>3</sup> Nominal-is-best

<sup>4</sup> Relative percentage deviation

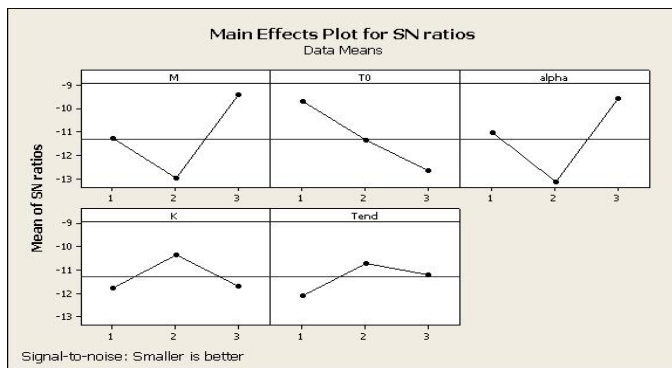
$$RPD = 100 \times \left[ 0.7 \left( \frac{trial_{obj} - min_{obj}}{min_{obj}} \right) + 0.3 \left( \frac{trial_{RT} - min_{RT}}{min_{RT}} \right) \right] \quad (29-4)$$

بطوریکه  $min_{obj}$  و  $min_{RT}$  بهترین نتیجه حاصله در هر اجرا به ترتیب از لحاظ تابع هدف و زمان حل الگوریتم،  $trial_{sol}$  و  $trial_{RT}$  نیز نتیجه بدست آمده در هر اجرا به ترتیب برای تابع هدف و زمان حل الگوریتم می‌باشد. در این پژوهش، میزان اهمیت مقدار تابع هدف و زمان حل الگوریتم به ترتیب برابر با ۷۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۴. پارامترهای الگوریتم SA.

پارامترها	1	2	3	مقدار بهینه
$M$	1	2	5	200
$T_0$	150	200	300	2
$\alpha$	0.8	0.95	0.98	0.98
$K$	0.2	0.5	0.8	5
$T_{end}$	1	2	5	0.5

ستون آخر جدول ۲-۴ در واقع پس از انجام آزمایش بر روی مقادیر اولیه در نظر گرفته شده در ۳ سطح برای هر پارامتر و تعیین میانگین نرخ S/N برای ۲۷ حالت از آزمایش تاگوجی تعیین شده است. شکل ۴-۱۵ مقادیر حاصل توسط آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵. میانگین نرخ S/N برای تعیین پارامترهای SA.

با توجه به رابطه (۲۸-۴) هر چقدر نسبت S/N بیشتر باشد، جواب‌های بهتری از الگوریتم حاصل می‌شود.

پارامترهای اصلی الگوریتم GWO نیز برابر تعداد بیشینه تکرارها ( $m$ )، تعداد عامل‌های

جستجو ( $num$ ) و مقدار پارامتر تعیین موقعیت ( $a$ ) با استفاده از رابطه  $a = 2 - \frac{2t}{m}$  به صورت خطی از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد بطوریکه  $t$  برابر تعداد تکرار هاست. مقادیر بهینه پارامترهای اکتسابی در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴. پارامترهای الگوریتم GWO.

پارامترها	1	2	3	مقدار بهینه
$m$	200	400	500	500
$num$	10	30	50	30

در الگوریتم IMMAS نیز ۸ متغیر به عنوان فاکتورهای قابل کنترل تعیین شده‌اند که عبارتند از تعداد تکرارهای الگوریتم ( $TI$ )، مقدار دمای اولیه ( $NoA$ )، میزان اثرگذاری مقدار فرومون در رابطه احتمال ( $A$ )، میزان اثرگذاری مقدار مسافت یال در رابطه احتمال ( $B$ ) و میزان اثرگذاری مقدار تقاضای یال در رابطه احتمال ( $C$ )، نرخ تبخیر ( $\rho$ )، میزان اثرگذاری انحراف فرومون از حد بالای فرومون ( $\delta$ ) و ضریب ثابت حد پایین فرومون ( $K$ ). پس از انجام آزمایش نیز مقادیر بهینه در جدول ۴-۴ ارائه می‌شود.

جدول ۴-۴. پارامترهای الگوریتم IMMAS.

پارامترها	1	2	3	مقدار بهینه
$TI$	100	150	200	200
$NoA$	5	10	15	10
$A$	1	2	3	1
$B$	1	3	5	5
$C$	1	3	5	3
$\rho$	0.05	0.1	0.2	0.1
$\delta$	0.25	0.5	0.75	0.75

#### ۴-۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل

در این فصل ابتدا به تعریف تنوری فازی مبتنی بر نظریه اعتبار و پیاده‌سازی آن در مدل‌های پیشنهادی پژوهش پرداختیم. سپس الگوریتم‌های حل پیشنهادی مسائل MTCARPTW و MTVRPTW به صورت کامل تشریح گردید و در نهایت نیز نحوه تنظیم پارامترهای این الگوریتم‌ها توسط روش طراحی آزمایشات تاگوچی مورد بحث قرار گرفت. در فصل بعد نتایج محاسباتی مربوط به مدل فازی و قطعی مسائل و مقایسه

خروجی های بدست آمده مورد بررسی قرار می گیرد. هم چنین در انتها نیز یک مطالعه موردی جهت ارزیابی کاربردی بودن متدولوژی پیشنهادی پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد.





#### ۱-۵- مقدمه

در این بخش، ابتدا به صحنه گذاری مدل پیشنهادی پژوهش با استفاده از بررسی و حل نمونه ها در ابعاد مختلف توسط هر دو مسأله پیشنهادی پرداخته می شود. در ابتدا در مسائل با ابعاد کوچک نتایج حاصل از الگوریتم های پیشنهادی، با نتایج حاصل از حل مدل توسط حل کننده CPLEX نرم افزار GAMS مورد مقایسه قرار می گیرد. سپس به منظور بررسی کارایی الگوریتم های پیشنهادی در حل مسائل با ابعاد بزرگ، نتایج حاصل از الگوریتم ها در مقایسه با یکدیگر در هر مسأله مورد بررسی قرار می گیرند. تمامی این مقایسات برای حالت قطعی و فازی و به ازای سطوح مختلف اعتبار انجام خواهد شد.

در نهایت نیز با تحلیل نتایج بدست آمده، بهترین فرمولاسیون برای مدلسازی مسأله جمع آوری MSW تعیین و با استفاده از آن و الگوریتم منتخب یک مسأله مطالعه در سپاهان شهر اصفهان مورد ارزیابی قرار می گیرد و در نهایت نیز آنالیز حساسیت پارامتر بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه انجام می شود.

#### ۲-۵- تولید نمونه های تصادفی

به منظور تولید مسائل نمونه در ابعاد مختلف، در فضای دوبعدی ابتدا شبکه گرافی

تشکیل داده می شود که متشکل از تعداد  $n$  گره، که گره ۱ بیانگر قرارگاه و گره  $n$  بیانگر سکوی تخلیه است. سپس مجموعه گره های تقاضا در مسأله MTVRPTW و مجموعه یال های بالقوه و یال های تقاضای در مسأله MTCARPTW تعریف می شوند. ابتدا ۱۵ مسأله در ابعاد کوچک و متوسط جهت مقایسه روش های حل مسائل با روش دقیق پیشنهادی پژوهش و ۵ مسأله هم در ابعاد بالا برای مقایسه الگوریتم ها تولید می شود. سایر اطلاعات مسائل شامل ابعاد آن ها و مقادیر پارامترها در جداول ۱-۵ و ۲-۵ ارائه می شود.

جدول ۱-۵. ابعاد مسائل نمونه.

مشترک	MTCARPTW			MTVRPTW		مسائل	
	$P$	$K$	$E_R$	$E$	$V$		$NC$
5	2	4	5	4	4	5	P1
5	3	6	8	5	6	8	P2
5	4	8	10	6	8	10	P3
5	5	11	15	7	11	15	P4
5	6	11	18	7	11	18	P5
5	8	15	22	8	15	22	P6
5	8	18	25	8	18	25	P7
5	9	21	28	9	21	28	P8
5	9	24	30	9	24	30	P9
5	10	28	32	10	28	32	P10
5	11	31	34	10	31	34	P11
5	12	34	43	11	34	43	P12
5	13	40	55	12	40	55	P13
5	14	45	65	13	45	65	P14
5	15	50	80	15	50	80	P15

جدول ۲-۵. مقادیر پارامترهای مدل های ریاضی.

مقادیر	پارامترهای مشترک	مقادیر	پارامترهای MTCARPTW	مقادیر	پارامترهای MTVRPTW
U(0.3, 1.5)	$t_{ij}$	U(0, 5)	$ee_{ij}$	U(0, 5)	$ee_j$
U(500, 1000)	$cv_k$	U(10, 80)	$ll_{ij}$	U(10, 80)	$ll_j$
0.25	$\theta$	U(4,6)	$d1_{ij}$	U(4,6)	$d1_j$
0.4	$uu$	U(6,8)	$d2_{ij}$	U(6,8)	$d2_j$
480	$T_{max}$	U(8,10)	$d3_{ij}$	U(8,10)	$d3_j$

U(500, 2000)	$W_k$	-	-	-	-
U(0.5, 10)	$c_{ij}$	-	-	-	-
0.1	$ul$	-	-	-	-
200	$Qe$	-	-	-	-
300	$Ql$	-	-	-	-
U(0.5, 0.9)	$\varepsilon_k$	-	-	-	-
1	$\Upsilon$	-	-	-	-

### ۳-۵- نتایج عددی در حالت قطعی

در این بخش، جهت مقایسه کارایی الگوریتم های پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر و روش دقیق CPLEX، به حل ۱۵ مسأله تصادفی تولید شده در بخش ۵-۲ می پردازیم. نتایج خروجی بدست آمده شامل مقادیر تابع هدف، زمان حل و تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده می باشد که برای حالت قطعی مسأله MTCARPTW و MTVRPTW به ترتیب در جداول ۳-۵ و ۴-۵ ارائه شده است. هم چنین، برای سطح بهینه اعتبار فازی هر کدام از مسائل نیز نتایج بدست آمده در جداول ارائه گشته است. لازم به ذکر است جهت ارزیابی الگوریتم های پیشنهادی در مقابل حل کننده CPLEX، محدودیت زمانی اجرای ۳۶۰۰ ثانیه توسط نرم افزار GAMS اعمال شده است.

جدول ۳-۵. نتایج محاسباتی MTVRPTW در ابعاد کوچک و متوسط تحت حالت قطعی.

مسأله	تعداد وسایل نقلیه استفاده شده	زمان اجرای CPLEX	زمان اجرای CPLEX (ثانیه)	زمان اجرای GWO	زمان اجرای GWO (ثانیه)	درصد انحراف GWO	درصد انحراف SA	زمان اجرای SA (ثانیه)	تابع هدف SA	درصد انحراف SA
P1	1	1853.38	1.70	2.71	1861.91	0.46	0.46	2.68	1863.03	0.52
P2	1	2025.18	8.61	4.78	2044.22	0.94	0.94	4.67	2050.29	1.24
P3	2	2690.67	40.07	9.47	2741.52	1.89	1.89	9.03	2755.01	2.39
P4	2	3256.65	87.68	13.90	3317.87	1.88	1.88	13.15	3336.85	2.46
P5	3	4043.83	193.75	17.48	4130.77	2.15	2.15	16.42	4165.83	3.02

2.33	4873.25	21.32	1.67	4842.04	22.91	297.39	4762.51	4	P6
2.94	5862.34	27.12	1.93	5804.82	28.84	671.33	5694.91	4	P7
1.66	7149.58	33.97	1.06	7107.38	36.79	955.26	7032.84	5	P8
2.62	8385.99	41.02	2.07	8341.22	44.12	1451.36	8172.06	6	P9
2.43	9427.59	44.71	1.861	9375.65	48.94	1696.58	9204.36	7	P10
2.59	10495.85	51.18	2.16	10451.68	55.44	1872.68	10230.70	8	P11
3.38	11661.00	69.33	2.67	11581.01	74.52	2598.78	11279.84	8	P12
2.78	13594.74	78.46	2.14	13510.54	84.99	3600	13227.47	9	P13
-	14862.00	96.55	-	14847.09	102.36	-	-	10	P14
-	16245.11	124.42	-	16208.11	132.40	-	-	11	P15
2.43	7792.07	42.27	1.76	7744.39	45.31	1036.55	6421.11	-	میانگین

جدول ۴-۵. نتایج محاسباتی MTCARPTW در ابعاد کوچک و متوسط تحت حالت قطعی.

درصد انجرا ف SA	تابع هدف SA	زمان اجرای SA (ثانیه)	درصد انحراف IMMA S	تابع هدف IMMAS	زمان اجرای IMMAS (ثانیه)	زمان اجرای CPLEX (ثانیه)	تابع هدف CPLEX	تعداد وسای ل تقلیه استف اده شده	مسأله
0.79	1837.57	14.69	0	1823.17	27.17	1.93	1823.17	1	P1
1.68	2020.02	26.1	0	1986.64	50.30	9.84	1986.64	1	P2
2.06	2666.77	41.09	0.49	2625.74	65.97	46.01	2612.94	2	P3
3.21	3293.31	52.84	0.67	3212.26	70.06	99.67	3190.88 4	2	P4
3.19	4090.46	63.19	0.59	3987.40	86.75	224.55	3964.01	3	P5
2.89	4806.23	89.13	0.91	4713.74	163.05	345.03	4671.23	4	P6

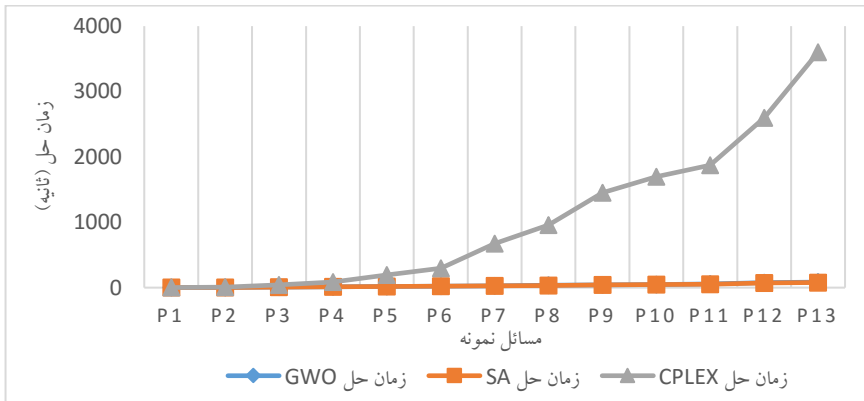
3.4	5408.33	121.97	1.07	5286.46	198.46	780.14	5230.49	4	P7
3.51	7132.20	150.66	1.34	6982.68	226.09	1104.68	6890.35	5	P8
2.76	8204.42	178.04	1.61	8112.60	249.74	1686.20	7984.06	6	P9
2.94	9271.33	202.95	1.83	9171.36	278.03	2283.15	9006.54	7	P10
3.17	10251.16	221.64	1.54	10089.20	297.5	2996.56	9936.18	8	P11
3.69	11395.23	249.78	1.32	11134.77	320.14	3600	10989.7 1	8	P12
-	13333.84	264.63	-	13004.16	339.95	-	-	9	P13
-	14943.10	285.09	-	14631.49	361.01	-	-	10	P14
-	16203.63	307.82	-	15994.86	403.92	-	-	11	P15
2.77	7657.17	151.31	0.95	7517.10	209.21	1098.15	5690.52	-	میانگ ین

همانطور که از نتایج بدست آمده در جداول ۵-۵ و ۵-۶ بر می آید، الگوریتم های پیشنهادی پژوهش توانسته اند عملکرد خوبی را از خود در مقابل CPLEX نشان دهند به طوریکه متوسط درصد انحراف GWO برابر ۱.۷۶ به عنوان بهترین الگوریتم در مسأله MTVRPTW و هم چنین متوسط درصد انحراف IMMAS برابر ۰.۹۵ به عنوان بهترین الگوریتم در حل مسأله MTCARPTW بوده است. هم چنین، متوسط زمان حل الگوریتم SA در هر دو مسأله دارای مقادیر بهتری بوده است ولی چون اختلاف ناچیز بوده است، ملاک برتری الگوریتم های حل درصد انحراف شمرده می شود.

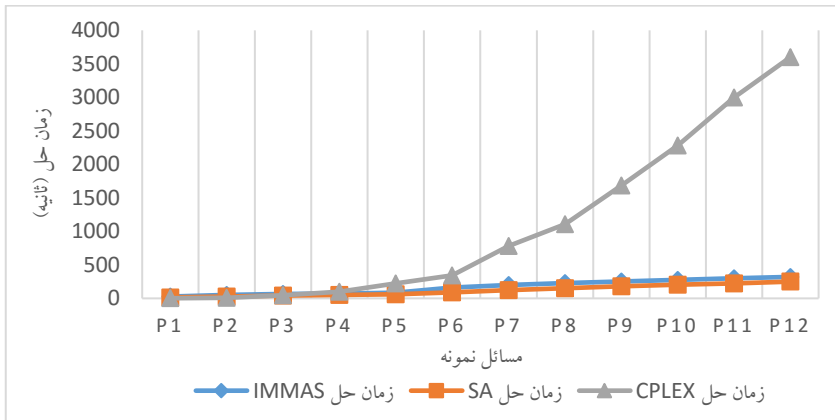
از جمله نتایج جالب توجه دیگر، اختلاف مقادیر توابع هدف در دو مسأله MTVRPTW و MTCARPTW بوده است به نحوی که متوسط مقادیر تابع هدف برای CPLEX در مسأله MTVRPTW و MTCARPTW به ترتیب برای ۱۲ نمونه اول برابر با ۵۸۵۳.۹۱ و ۵۶۹۰.۵۲ واحد بوده است؛ با توجه به اینکه حل کننده CPLEX قادر به حل مسأله ۲ مسأله آخر MTVRPTW و ۳ مسأله آخر MTCARPTW با در نظر گرفتن محدودیت زمانی اجرای ۳۶۰۰ ثانیه نبوده است. این اختلاف مقادیر تابع هدف برای بهترین الگوریتم های حل مسائل MTVRPTW و MTCARPTW نیز به ترتیب برابر با ۷۷۴۴.۳۹ و ۷۵۱۷.۱۰ بوده است. از عمده دلیل این اختلاف می توان به دقت بیشتر مسأله MTCARPTW در نمایش فواصل شبکه و تمامی یال های بالقوه دانست. در واقع

از آنجاییکه پارامتر تقاضا بر روی یال‌ها بجای گره‌ها تعریف می‌گردد، دقت محاسبات مربوط به مسافت کل پیموده شده و ارتباطات یال‌ها با یکدیگر با دقت بیشتری نمایش داده شده که در نهایت منجر به کاهش تابع هدف کل در تمامی نمونه‌های تصادفی گشته است. این در حالیست که، تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در هر دو نوع مسأله یکسان بوده است. در واقع هزینه‌های ثابت یکسان بوده است که بخش مهمی از هدف را نیز تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر، به دلیل پیچیدگی بیشتر شبکه MTCARPTW، زمان حل روش‌های حل مد نظر بیشتر از زمان حل روش‌های حل مسأله MTRVPTW بوده است؛ بطوریکه الگوریتم IMMAS با متوسط زمان ۲۰۹.۲۱ به عنوان کندترین الگوریتم در حل مسأله MTCARPTW و الگوریتم SA با متوسط زمان ۴۲.۲۷ به عنوان سریع‌ترین الگوریتم در حل مسأله MTRVPTW بوده است.

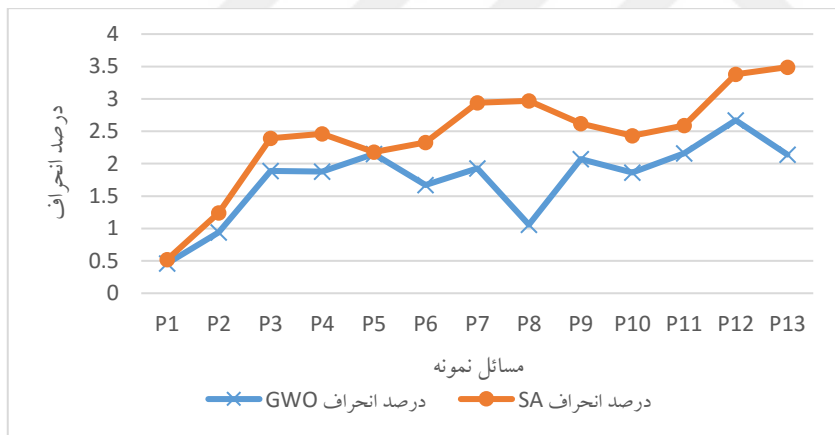
برای درک بهتر این اختلافات، مقایسه روش‌های حل از لحاظ درصد انحراف و زمان حل در نمودار ۵-۱ الی ۵-۴ ارائه شده است.



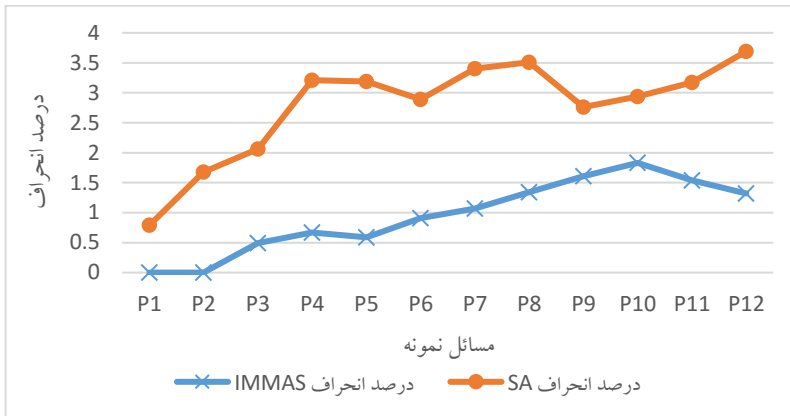
نمودار ۵-۱. مقایسه زمان حل روش‌های پیشنهادی حل MTRVPTW.



نمودار ۲-۵. مقایسه زمان حل روش های پیشنهادی حل MTCARPTW.



نمودار ۳-۵. مقایسه درصد انحراف روش های پیشنهادی حل MTRVPTW.



نمودار ۴-۵. مقایسه درصد انحراف روش های پیشنهادی حل MTCARPTW.

### ۱-۳-۵- تعیین سطح بهینه اعتبار در مسائل

در این بخش، بر اساس سطح اعتبار در نظر گرفته شده برآورد تقاضای گره ها و یال های شبکه در مسائل MTCARPTW و MTCARPTW بر اساس تقاضای تخمین زده شده، میزان تابع هدف بهینه برنامه ریزی شده به ترتیب توسط الگوریتم GWO و IMMAS انجام می شود. سپس در گام بعدی، با در نظر گرفتن تورهای حاصل از جواب بهینه و با استفاده از الگوریتم شبیه سازی مونت کارلو تقاضای واقعی یال ها تولید شده و تابع هدف مسأله با توجه به شکست های رخ داده محاسبه می شود. تولید تقاضای واقعی و محاسبه هزینه حاصله ۱۰۰۰ مرتبه تکرار می شود و میانگین ۱۰۰۰ بار شبیه سازی به عنوان هزینه مسأله در سطح اعتبار معین در نظر گرفته می شود. و بر اساس میانگین حاصل از متوسط هزینه های مسائل در نظر گرفته شده، سطح اعتبار بهینه در هر مسأله نمونه تعیین می شود. جدول ۵-۵ و ۶-۵ به ترتیب نتایج حاصل از حل بهینه و شبیه سازی را برای مسائل MTCARPTW و MTCARPTW نشان می دهد. در این جداول تابع هدف برنامه ریزی شده با OP، تابع هدف اضافی ناشی از شکست با OA و تابع هدف کل با OT نشان داده شده است.

جدول ۵-۵. نتایج محاسباتی بدست آمده از حل مسأله MTRPTW بر اساس نظریه اعتبار فازی.

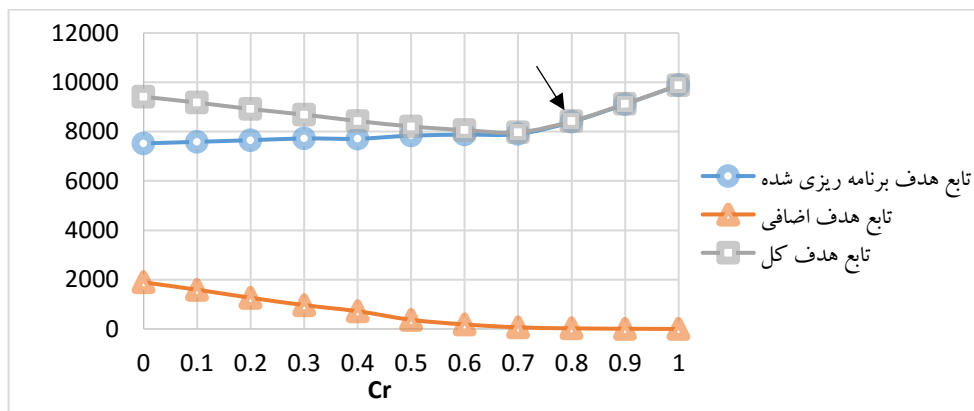
مسأله	Cr	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
P1	OP	1717.50	1755.14	1738.63	1705.67	1695.30	1672.53	1704.30	1698.25	1789.95	2003.49	2246.37
	OA	527.30	442.49	427.48	393.23	340.73	289.36	196.74	183.15	152.55	84.24	0
	OT	2244.81	2197.63	2166.10	2098.90	2036.03	1961.88	1901.04	1881.40	1942.51	2087.73	2246.37
P2	OP	2010.95	1983.93	1991.88	2057.74	2017.56	1977.22	1969.04	2032.12	2103.25	2155.57	2578.42
	OA	439.48	408.20	325.27	234.62	220.07	168.08	147.92	91.78	84.75	51.85	0
	OT	2450.43	2392.14	2317.15	2292.36	2237.63	2145.30	2116.96	2123.90	2188.00	2207.43	2578.42
P3	OP	2664.91	2668.32	2740.46	2710.36	2657.80	2663.78	2670.56	2684.32	2889.16	3227.82	3582.79
	OA	665.60	585.67	409.44	338.41	298.58	260.17	191.41	140.85	57.52	0	0
	OT	3330.51	3253.99	3149.90	3048.76	2956.38	2923.96	2861.97	2825.16	2946.67	3227.82	3582.79
P4	OP	2892.30	2869.30	2891.80	3021.80	3091.14	3083.66	3125.12	3218.39	3433.56	3683.91	4044.87
	OA	787.17	724.76	630.30	488.22	361.46	286.22	227.27	155.96	45.29	0	0
	OT	3679.46	3594.06	3522.10	3510.02	3452.60	3369.88	3352.39	3374.34	3478.85	3683.91	4044.87
P5	OP	3984.87	3945.94	3906.74	4123.97	4062.17	4034.25	3977.54	4053.31	4411.92	4860.74	5249.22
	OA	1004.46	893.63	884.76	587.26	506.41	350.08	255.77	134.79	47.49	0	0
	OT	4989.32	4839.58	4791.50	4711.23	4568.58	4384.33	4233.31	4188.10	4459.40	4860.74	5249.22
P6	OP	5091.19	5169.14	5003.36	4912.67	4868.45	4845.44	4901.84	4914.10	5488.88	5848.24	6470.43
	OA	1080.05	855.85	792.76	587.10	500.42	335.46	244.46	54.66	0	0	0
	OT	6171.24	6024.99	5796.12	5499.77	5368.87	5180.91	5146.30	4968.76	5488.88	5848.24	6470.43
P7	OP	5605.57	5621.34	5494.04	5528.85	5470.76	5572.33	5700.52	5906.53	6514.32	6904.37	7114.81
	OA	1272.54	1111.87	979.60	750.70	612.93	489.00	276.23	183.78	0	0	0
	OT	6878.11	6733.20	6473.64	6279.55	6083.69	6061.32	5976.75	6090.31	6514.32	6904.37	7114.81
P8	OP	6683.08	6821.28	6826.33	6825.67	6785.03	6891.64	7202.48	7181.35	7836.63	8607.92	9199.65
	OA	1684.59	1463.26	1208.29	1018.53	759.38	557.57	98.20	25.00	0	0	0
	OT	8367.67	8284.54	8034.61	7844.20	7544.41	7449.21	7300.68	7206.35	7836.63	8607.92	9199.65
	OP	8198.73	8138.94	8083.88	8140.33	8287.75	8398.68	8575.33	8487.24	9123.67	9811.81	10661.90

مسأله	Cr	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<b>P9</b>	<b>OA</b>	1960.80	1670.57	1437.62	1220.69	820.99	350.07	56.51	0	0	0	0
	<b>OT</b>	10159.54	9809.51	9521.51	9361.02	9108.74	8748.74	8631.84	8487.24	9123.67	9811.81	10661.90
<b>P10</b>	<b>OP</b>	9835.49	10075.08	10013.85	10107.44	10016.08	9654.03	9551.11	9615.21	9578.76	10513.85	12269.35
	<b>OA</b>	2073.76	1449.74	1238.05	991.10	718.46	617.64	401.07	0	0	0	0
<b>P11</b>	<b>OT</b>	11909.25	11524.82	11251.90	11098.54	10734.54	10271.66	9952.19	9615.21	9578.76	10513.85	12269.35
	<b>OP</b>	10598.74	10744.10	11126.26	10783.38	10613.00	10721.92	10746.66	10919.36	11656.38	12934.70	13884.26
<b>P12</b>	<b>OA</b>	2627.44	2092.54	1311.45	1196.74	875.59	688.92	327.20	0	0	0	0
	<b>OT</b>	13226.18	12836.64	12437.71	11980.12	11488.59	11410.84	11073.87	10919.36	11656.38	12934.70	13884.26
<b>P13</b>	<b>OP</b>	11090.08	11162.54	11519.16	11473.75	11734.39	11806.51	11747.07	12440.39	13559.90	14417.14	14963.69
	<b>OA</b>	2886.80	2365.60	1826.89	1293.66	854.79	377.44	321.84	0	0	0	0
<b>P14</b>	<b>OT</b>	13976.88	13528.14	13346.05	12767.41	12589.17	12183.96	12068.91	12440.39	13559.90	14417.14	14963.69
	<b>OP</b>	13142.91	12858.47	13236.44	13399.16	13392.61	13526.56	13964.02	13685.70	14095.67	15500.35	16720.70
<b>P15</b>	<b>OA</b>	3062.39	2718.43	1804.76	1339.21	1072.84	571.74	0	0	0	0	0
	<b>OT</b>	16205.30	15576.89	15041.20	14738.37	14465.45	14098.30	13964.02	13685.70	14095.67	15500.35	16720.70
<b>P16</b>	<b>OP</b>	14044.39	14056.84	14188.43	14688.44	14828.42	15399.90	15340.83	15146.84	15684.40	16780.33	18023.58
	<b>OA</b>	3616.91	3305.41	2617.91	1776.53	1112.51	222.81	0	0	0	0	0
<b>P17</b>	<b>OT</b>	17661.30	17362.24	16806.34	16464.96	15940.94	15622.72	15340.83	15146.84	15684.40	16780.33	18023.58
	<b>OP</b>	15256.83	15935.97	16020.05	16355.46	16152.61	17328.80	16993.42	16589.15	17748.10	19457.62	21208.80
<b>P18</b>	<b>OA</b>	4699.24	3756.66	3068.44	2275.77	1732.63	0	0	0	0	0	0
	<b>OT</b>	19956.07	19692.63	19088.49	18631.23	17885.24	17328.80	16993.42	16589.15	17748.10	19457.62	21208.80
<b>میانگین</b>	<b>OP</b>	7521.17	7587.09	7652.09	7722.31	7711.54	7838.48	7877.99	7904.82	8394.30	9113.86	9881.26
<b>میانگین</b>	<b>OA</b>	1892.57	1589.65	1264.20	966.12	719.19	370.97	182.97	64.66	25.84	9.07	0
<b>میانگین</b>	<b>OT</b>	9413.74	9176.73	8916.29	8688.43	8430.72	8209.45	8060.96	7969.48	8420.14	9122.93	9881.26

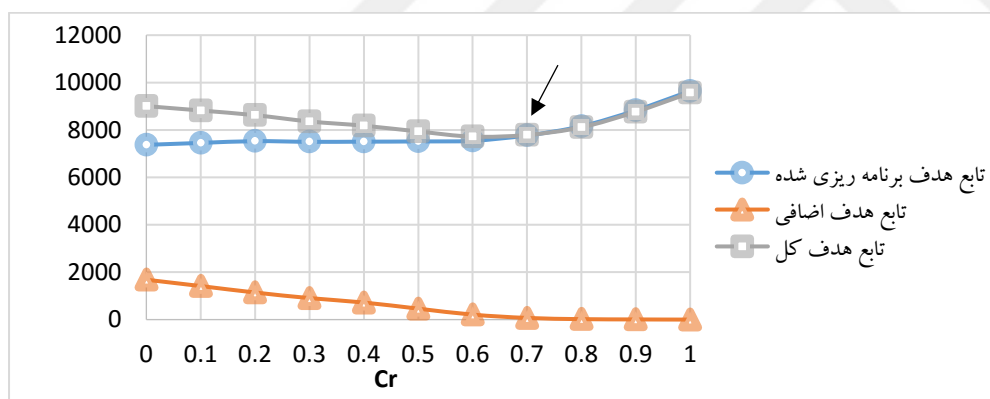
جدول ۵-۶. نتایج محاسباتی بدست آمده از حل مسئله MTCARPTW بر اساس نظریه اعتبار فازی.

مسئله	Cr	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
P1	OP	1696.77	1774.89	1760.17	1741.58	1760.54	1747.34	1769.12	1823.11	1933.83	2140.66	2386.89
	OA	520.94	440.13	389.85	364.51	316.35	262.66	193.74	148.74	102.07	67.58	0
	OT	2217.71	2215.02	2150.02	2106.08	2076.89	2010	1962.86	1971.85	2035.90	2208.24	2386.89
P2	OP	1914.60	1953.49	1940.97	1948.00	1955.52	1901.14	1903.14	1911.90	2035.71	2133.20	2542.24
	OA	449.10	363.12	316.96	256.97	219.30	187.69	164.72	107.45	55.73	43.25	0
	OT	2363.70	2316.61	2257.93	2204.98	2174.82	2088.84	2067.86	2019.35	2091.44	2176.45	2542.24
P3	OP	2639.70	2650.59	2644.78	2632.46	2575.86	2591.31	2542.80	2586.58	2788.37	3102.75	3438.46
	OA	565.84	492.15	403.02	325.32	254.43	210.81	149.98	123.82	58.80	0	0
	OT	3205.54	3142.74	3047.79	2957.78	2830.29	2802.12	2692.78	2710.40	2847.18	3102.75	3438.46
P4	OP	2902.61	2962.19	2949.38	2937.44	3072.03	3123.20	3061.27	3203.82	3345.89	3614.90	3943.43
	OA	766.88	649.60	546.10	504.29	337.54	238.21	184.69	76.21	35.73	0	0
	OT	3669.48	3611.79	3495.48	3441.73	3409.56	3361.41	3245.96	3280.03	3381.62	3614.90	3943.43
P5	OP	3921.14	3933.14	3903.40	4057.55	3988.13	4044.65	3960.62	4119.80	4561.87	5024.35	5337.46
	OA	918.85	784.17	722.65	552.50	437.06	295.04	211.33	186.16	45.50	0	0
	OT	4840	4717.31	4626.05	4610.05	4425.18	4339.69	4171.95	4305.97	4607.38	5024.35	5337.46
P6	OP	4640.73	4779.64	4815.09	4869.04	4925.25	4779.01	4688.00	5208.09	5724.15	6060.48	6588.03
	OA	1081.41	887.11	718.73	608.70	486.36	414.98	297.44	125.59	0	0	0
	OT	5722.14	5666.76	5533.82	5477.74	5411.61	5193.99	4985.44	5333.67	5724.15	6060.48	6588.03
P7	OP	5290.81	5220.06	5224.58	5249.01	5261.40	5293.39	5227.62	5403.42	6068.84	6556.94	6824.49
	OA	984.46	854.33	734.12	648.68	517.48	372.78	330.91	164.50	0	0	0
	OT	6275.27	6074.39	5958.70	5897.70	5778.88	5666.17	5558.53	5567.92	6068.84	6556.94	6824.49
P8	OP	6629.31	6923.04	6892.69	6797.48	6735.66	6821.05	6752.02	6940.07	7131.58	7748.59	8416.77
	OA	1644.44	1185.77	1051.13	831.44	739.72	512.19	434.22	116.74	0	0	0
	OT	8273.75	8108.81	7943.81	7628.92	7475.38	7333.24	7186.24	7056.81	7131.58	7748.59	8416.77
	OP	7614.52	7777.13	8116.64	7991.23	7999.28	8118.48	8006.73	8563.78	8934.92	9559.25	10228.25

مسأله	Cr	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<b>P9</b>	<b>OA</b>	1946.23	1591.44	1070.70	977.48	876.44	490.63	333.66	0	0	0	0
	<b>OT</b>	9560.75	9368.57	9187.34	8968.70	8875.72	8609.11	8340.40	8563.78	8934.92	9559.25	10228.25
<b>P10</b>	<b>OP</b>	8877.45	8909.48	9111.05	9018.08	9128.20	8851.22	9000.64	9332.61	9523.92	10479.34	11785.97
	<b>OA</b>	2200.42	1898.03	1487.15	1155.72	997.85	870.40	298.51	0	0	0	0
<b>P11</b>	<b>OT</b>	11077.87	10807.52	10598.20	10173.80	10126.05	9721.61	9299.15	9332.61	9523.92	10479.34	11785.97
	<b>OP</b>	10381.82	10479.64	10664.08	10688.60	10517.87	10498.90	10763.28	10665.52	11208.36	12396.17	13511.67
<b>P12</b>	<b>OA</b>	2136.23	1895.98	1458.61	1230.62	996.11	664.06	181.12	0	0	0	0
	<b>OT</b>	12518.05	12375.62	12122.69	11919.22	11513.98	11162.95	10944.40	10665.52	11208.36	12396.17	13511.67
<b>P13</b>	<b>OP</b>	11158.13	11196.72	11204.55	11310.47	11204.43	11057.69	10813.33	11282.52	12077.59	13055.59	14345.37
	<b>OA</b>	2483.69	2181.20	1859.26	1242.29	980.47	589.46	362.33	0	0	0	0
<b>P14</b>	<b>OT</b>	13641.82	13377.92	13063.82	12552.75	12184.90	11647.15	11175.67	11282.52	12077.59	13055.59	14345.37
	<b>OP</b>	12679.19	12581.43	12861.63	12979.14	13361.23	13259.77	13692.63	13235.71	13365.99	14735.68	16049.60
<b>P15</b>	<b>OA</b>	2989.26	2773.42	2281.42	1657.61	976.37	646.71	0	0	0	0	0
	<b>OT</b>	15668.46	15354.85	15143.05	14636.75	14337.60	13906.48	13692.63	13235.71	13365.99	14735.68	16049.60
<b>P16</b>	<b>OP</b>	14210.26	14548.33	14423.24	14165.11	14059.70	14294.45	14561.77	15080.89	16067.66	16869.36	18610.46
	<b>OA</b>	2867.21	2045.14	1780.39	1398.46	1337.66	651.09	0	0	0	0	0
<b>P17</b>	<b>OT</b>	17077.47	16593.47	16203.63	15563.56	15397.36	14945.55	14561.77	15080.89	16067.66	16869.36	18610.46
	<b>OP</b>	16026.78	16120.91	16412.02	16118.32	16060.21	16356.68	16422.27	17186.97	17594.09	18924.58	20625.41
<b>P18</b>	<b>OA</b>	3683.88	3175.58	2314.57	1855.10	1337.89	517.27	0	0	0	0	0
	<b>OT</b>	19710.66	19296.49	18726.58	17973.42	17398.10	16873.95	16422.27	17186.97	17594.09	18924.58	20625.41
<b>میانگین</b>	<b>OP</b>	7372.25	7454.04	7528.28	7500.23	7507.02	7515.89	7544.35	7769.65	8157.52	8826.79	9642.30
<b>میانگین</b>	<b>OA</b>	1682.59	1414.48	1142.31	907.31	720.74	461.60	209.51	69.95	19.86	7.39	0
<b>میانگین</b>	<b>OT</b>	9006.03	8821.04	8625.17	8358.88	8180.73	7937.22	7718.38	7790.68	8112.01	8766.33	9565.70



نمودار ۵-۵. تغییرات تابع هدف کل به ازای  $Cr$  های مختلف در مسأله MTVRPTW.



نمودار ۶-۵. تغییرات تابع هدف کل به ازای  $Cr$  های مختلف در مسأله MTCARPTW.

همانگونه که در نمودار ۵-۵ مشخص است با افزایش سطح اعتبار میانگین تابع هدف تا سطح ۰.۷ برای مسأله MTVRPTW کاهش می یابد و در واقع کمترین میزان تابع هدف در این سطح اتفاق می افتد. سپس همزمان با افزایش سطح اعتبار از سطح ۰.۷ تا ۱، مقدار میانگین تابع هدف افزایش می یابد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده، سطح بهینه اعتبار برای حل نمونه های تصادفی در مسأله MTVRPTW برابر با ۰.۷ در نظر گرفته می شود ( $Cr^* = 0.7$ ). از سوی دیگر، با توجه به نمودار ۶-۵، مشابه با همین روند برای مسأله MTCARPTW اتفاق می افتد ولی با این تفاوت که روند کاهشی میانگین تابع هدف تا سطح اعتبار ۰.۶ رخ داده و در نهایت پس از این سطح نیز مجدد میانگین تابع هدف با

افزایش همراه بوده است. بنابراین، سطح اعتبار بهینه برای مسأله MTCARPTW برابر با ۰.۶ می باشد ( $Cr^* = 0.6$ ).

#### ۴-۵- نتایج عددی در حالت فازی

در این بخش به جهت ارزیابی کارایی روش های حل پیشنهادی مسائل، به مقایسه آن ها با در نظر گرفتن سطح بهینه اعتبار هر یک در حل نمونه های تصادفی می پردازیم. در همین راستا، جداول ۵-۷ و ۸-۵ نتایج بدست آمده برای هر یک از روش های حل به ترتیب در مسائل MTCARPTW و MTCARPTW را نمایش می دهد.

جدول ۷-۵. نتایج محاسباتی MTCARPTW برای سطح اعتبار ۰.۷.

مسأله	تعداد وسایل نقلیه استفاده شده	GWO			SA			زمان حل (ثانیه)	مسأله
		OT	OA	OP	OT	OA	OP		
P1	1	1881.40	183.15	1698.25	1898.73	186.07	1712.66	3.13	P1
P2	1	2123.90	91.78	2032.12	2142.98	82.26	2060.72	5.60	P2
P3	2	2825.16	140.85	2684.32	2854.07	138.64	2715.43	10.65	P3
P4	2	3374.34	155.96	3218.39	3404.67	159.67	3245.01	16.02	P4
P5	3	4188.10	134.79	4053.31	4228.16	120.41	4107.75	20.63	P5
P6	4	4968.76	54.66	4914.10	5012.46	75.80	4936.66	28.06	P6
P7	4	6090.31	183.78	5906.53	6153.18	139.64	6013.54	36.34	P7
P8	5	7206.35	25.00	7181.35	7287.95	16.06	7271.89	46.95	P8
P9	6	8487.24	0	8487.24	8583.17	0	8583.17	57.39	P9
P10	7	9000.64	0	9000.64	9012.58	0	9012.58	62.74	P10
P11	8	10919.36	0	10919.36	10988.41	0	10988.41	72.47	P11
P12	8	12440.39	0	12440.39	12452.70	0	12452.70	96.41	P12
P13	9	13685.70	0	13685.70	13726.59	0	13726.59	114.47	P13
P14	10	15146.84	0	15146.84	15231.86	0	15231.86	141.61	P14
P15	11	16589.15	0	16589.15	16692.55	0	16692.55	184.13	P15
میانگهی ن	-	7928.51	64.66	7863.84	7978.00	61.24	7916.77	59.77	

جدول ۵-۸، نتایج محاسباتی MTCARPTW برای سطح اعتبار ۰.۶.

مسئله	تعداد وسایل نقلیه استفاده شده	IMMAS			SA			زمان حل (ثانیه)	مسئله
		OT	OA	OP	OT	OA	OP		
P1	1	1962.86	193.74	1769.12	1977.04	187.66	1789.38	42.14	P1
P2	1	2067.86	164.72	1903.14	2097.44	170.35	1927.09	52.53	P2
P3	2	2692.78	149.98	2542.80	2747.22	153.29	2593.93	84.28	P3
P4	2	3245.96	184.69	3061.27	3299.33	172.09	3127.24	139.40	P4
P5	3	4171.95	211.33	3960.62	4233.23	189.26	4043.97	127.73	P5
P6	4	4985.44	297.44	4688.00	5067.91	264.02	4803.89	184.06	P6
P7	4	5558.53	330.91	5227.62	5714.19	339.16	5375.03	274.45	P7
P8	5	7186.24	434.22	6752.02	7309.71	406.87	6902.84	296.82	P8
P9	6	8340.40	333.66	8006.73	8535.79	345.67	8190.12	346.24	P9
P10	7	9299.15	298.51	9000.64	9504.67	274.04	9230.63	352.48	P10
P11	8	10944.40	181.12	10763.28	11252.76	157.63	11095.13	373.79	P11
P12	8	11175.67	362.33	10813.33	11467.85	320.50	11147.35	412.08	P12
P13	9	13692.63	0	13692.63	14117.54	0	14117.54	493.12	P13
P14	10	14561.77	0	14561.77	15032.44	0	15032.44	584.26	P14
P15	11	16422.27	0	16422.27	16981.13	0	16981.13	670.07	P15
میانگی ن	-	7753.86	209.51	7544.35	7955.88	198.70	7757.18	295.56	

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می شود که در مسائل فازی نیز برتری الگوریتم ها در بدست آوردن بهترین مقدار هدف در هر نمونه برای مسائل MTVRPTW و MTCARPTW حفظ شده است. هم چنین مقدار متوسط تابع هدف در مسئله MTVRPTW در بهترین حالت (مقادیر بدست آمده توسط GWO) برابر با ۷۹۲۸.۵۱ برای سطح اعتبار ۰.۷ و مقدار متوسط تابع هدف در مسئله MTCARPTW در بهترین حالت (مقادیر بدست آمده توسط IMMAS) برابر با ۷۷۵۳.۸۶ برای سطح اعتبار ۰.۶ بوده است. در واقع همانند نتایج بدست آمده در حالت قطعی، مقادیر اهداف

بدست آمده برای مسأله MTVRPTW بیشتر از MTCARPTW بوده است. هم چنین، تعداد وسایل نقلیه تعیین شده به ازای سطوح بهینه اعتبار در هر مسأله معادل با تعداد وسایل نقلیه تعیین شده در حالت قطعی متناظر با هر مسأله بوده است.

بنابراین، به دلیل دقت بالاتر شبکه MTCARPTW در مدل کردن مسأله، در ادامه نتایج محاسباتی و برای ارزیابی مطالعه موردی از این مسأله و الگوریتم IMMAS استفاده می‌گردد.

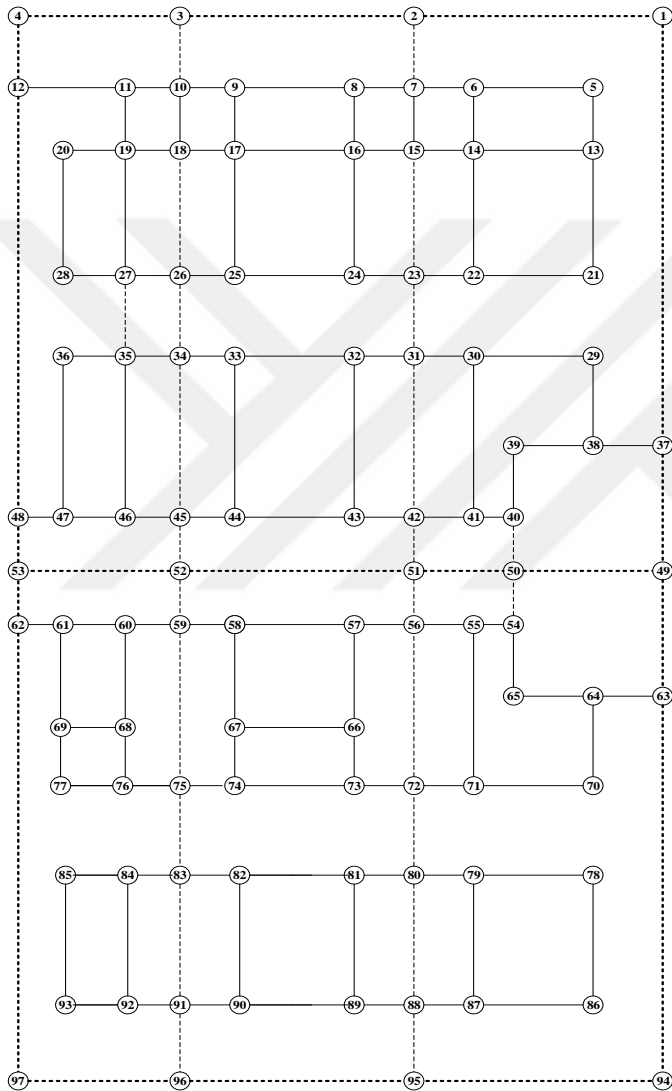
### ۵-۵- مطالعه موردی

در این بخش، جهت ارزیابی عملکرد متدولوژی پیشنهادی برتر پژوهش در دنیای واقعی، به بررسی یک مسأله مطالعه موردی با توجه به دسترسی به داده‌ها در منطقه سپاهان-شهر اصفهان پرداخته می‌شود. این منطقه واقع در جنوب غربی شهر اصفهان به مساحت ۴۰۰ هکتار است. جهت ترسیم شبکه جمع‌آوری، هر خیابان و کوچه را به صورت یال در نظر گرفته ایم. براساس اطلاعات بدست آمده این منطقه توسط شهرداری، سرویس دهی ناحیه مشخص شده در این منطقه جهت بررسی، با دو وسیله نقلیه انجام می‌شود و میزان تقاضای یال‌های دارای زباله نیز به صورت یک عدد فازی مثلثی و با استفاده از نظریه اعتبار فازی مدل می‌شود. وسایل دارای ظرفیت ۷ تن و ۵ تن و محدودیت زمانی عملیاتی به اندازه ۵ ساعت می‌باشند. هدف تعیین مجموعه مسیرهای بهینه و توالی با توجه به کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه‌های عبور از یال‌ها، هزینه‌های نشر کربن دی‌اکسید، هزینه‌های بکارگیری حداقلی وسایل نقلیه و هزینه‌های خروج از پنجره‌های زمانی می‌باشد. داده‌های مورد نظر جهت اجرای مدل از طریق مصاحبه با کارشناسان بخش مدیریت پسماند شهرداری اصفهان تهیه و جمع‌آوری گردید.

حال با در دست داشتن اطلاعات مربوط به این منطقه که در شکل ۵-۱ مشخص شده است، می‌توانی شبکه گراف شهری آن را رسم کرد. شبکه گراف پیشنهادی در شکل ۵-۲ ارائه شده است.



شکل ۱-۵. ناحیه مشخص شده جهت مطالعه در سپاهان شهر.



شکل ۲-۵. شبکه گراف شهری متناظر با ناحیه مشخص شده منطقه سپاهان شهر.

با توجه به شکل ۲-۵، در شبکه پیشنهادی، ۹۹ گره، ۱۵۲ یال و ۱۱۵ تقاضا تعریف شده است. گره شماره ۰ بیانگر نقطه قرارگاه یا پارکینگ وسایل نقلیه است که در شکل به دلیل فاصله داشتن از منطقه عملیاتی مشخص نشده است. علاوه بر این، گره شماره ۱۰۰ نیز بیانگر محل تخلیه بار بوده و خارج از این ناحیه و در فاصله ۱۲.۳ کیلومتری از منطقه واقع شده است. بنابر مقادیر در نظر گرفته شده توسط کارشناسان، میزان متوسط تقاضای هر یال

دارای زباله به عنوان حد پایین عدد فازی مثالی، میزان حد وسط معادل با ۱.۲ برابر متوسط و میزان حد بالا نیز معادل ۱.۲ برابر حد وسط در نظر گرفته شده است. در واقع، از آنجاییکه روزهای جمعه جمع آوری پسماند انجام نمی گیرد، هدف جمع آوری پسماندهای روز شنبه است که با عدم قطعیت بیشتری روبرو است. هزینه های ثابت استفاده از وسیله نقلیه ۷ تنی و ۵ تنی به ترتیب معادل ۱ میلیون و ۸۰۰ هزار تومان، هزینه متغیر استفاده از وسایل نقلیه برابر با ۱۴۰,۰۰۰ تومان برای هر ساعت می باشد. هر وسیله نقلیه دارای ۲ کارگر و ۱ راننده می باشد که مجموعاً هزینه ۹۰,۰۰۰ تومانی برای هر ساعت عملیات دارد. سرعت متوسط وسایل نقلیه معادل ۱۰ کیلومتر بر ساعت در منطقه عملیاتی و ۸۰ کیلومتر بر ساعت برای خارج از منطقه عملیاتی می باشد. از همین رو، متوسط زمان مورد نیاز عبور از یال  $(i, j)$  معادل است با  $t_{ij} = c_{ij} / v_{ij}$ ، بطوریکه  $c_{ij}$  و  $v_{ij}$  به ترتیب بیانگر مسافت یال  $(i, j)$  و متوسط سرعت وسایل نقلیه برای عبور یال  $(i, j)$  است. فاکتور برآوردی نشر به ازای وسایل نقلیه ۷ تن و ۵ تن در جدول ۵-۹ محاسبه شده است.

جدول ۵-۹. مقادیر برآورد شده فاکتور نشر کربن دی اکسید وسایل نقلیه مسأله مطالعه موردی.

وضعیت وسیله نقلیه	فاکتور نشر وسیله نقلیه ۵ تن (kg CO2/km)	فاکتور نشر وسیله نقلیه ۷ تن (kg CO2/km)
خالی	0.535	0.638
بار کم	0.607	0.723
نیمه بار	0.657	0.783
بار زیاد	0.699	0.833
پر	0.743	0.886

در ادامه جهت یافتن سطح بهینه اعتبار فازی برای مسأله مطالعه موردی، می بایست به ازای سطوح مختلف مسأله توسط الگوریتم IMMAS اجرا شود. هم چنین، هزینه های تحمیلی به خاطر شکست مسیرها نیز توسط الگوریتم شبیه سازی پیشنهادی در بخش ۴-۵-۲ تعیین می شود. نتایج بدست آمده در جدول ۵-۱۰ ارائه شده است. هم چنین، هزینه واحد نشر کربن دی اکسید معادل با ۱۰,۰۰۰ تومان و متوسط فاکتور نشر برای وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۱۰. نتایج بدست آمده به ازای سطوح مختلف اعتبار در مسأله مطالعه موردی.

اجزای محاسباتی	حالت قطعی	Cr										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<i>PT1</i>	-	2.4	2.5	2.61	2.76	3.05	3.12	3.38	3.09	3.17	3.95	4.64
<i>PT2</i>	-	0.86	0.94	1.12	1.15	1.18	1.42	1.57	1.82	1.96	1.78	1.83
<i>ATI</i>	-	2.32	2.12	1.86	1.57	1.4	1.18	0.67	0	0	0	0
<i>AT2</i>	-	1.89	1.51	1.43	0.97	0.58	0.39	0.25	0.18	0	0	0
<i>TT</i>	3.93	7.47	7.07	7.02	6.45	6.21	6.11	5.87	5.09	5.13	5.73	6.47
<i>UVI</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>UV2</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
<i>FCost</i>	2153700	2472300	2436300	2431800	2380500	2358900	2349900	2328300	3058100	3061700	3115700	3182300
<i>VCost</i>	550200	1045800	989800	982800	903000	869400	855400	821800	712600	718200	802200	905800
<i>GCost</i>	216500	224800	236500	249600	284500	292300	298600	306000	318000	354600	384700	398100
<b>Total cost</b>	2920400	3742900	3662600	3664200	3568000	3520600	3503900	3456100	4088700	4134500	4302600	4486200

در جدول ۵-۱۰،  $PT_1$ ،  $PT_2$ ،  $AT_1$ ،  $AT_2$ ،  $TT$ ،  $UV_1$ ،  $UV_2$ ،  $FCost$ ،  $VCost$  و  $Gcost$  نشان دهنده اجزای تشکیل دهنده تابع هدف می باشند به طوری که به ترتیب بیانگر زمان کل برنامه ریزی شده سرویس دهی وسیله نقلیه ۷ تن، زمان کل برنامه ریزی شده سرویس دهی وسیله نقلیه ۵ تن، زمان کل اضافی سرویس دهی ناشی از شکست مسیر وسیله نقلیه ۷ تن، زمان کل اضافی سرویس دهی ناشی از شکست مسیر وسیله نقلیه ۵ تن، زمان کل سرویس دهی بدست آمده برای سطح اعتبار، تعداد وسیله نقلیه ۷ تن استفاده شده، تعداد وسیله نقلیه ۵ تن استفاده شده، مجموع هزینه های ثابت وسایل نقلیه و خدمه، مجموع هزینه های متغیر وسایل نقلیه و خدمه و در نهایت مجموع هزینه های نشر کرین دی اکسید می باشد. در نهایت نیز  $Total\ cost$  بیانگر هزینه کل سرویس شامل مجموع هزینه های ثابت و متغیر برای هر سطح اعتبار می باشد. روابط مورد استفاده جهت انجام محاسبات جدول ۵-۱۰ در ادامه ارائه می شود.

$$FCost=(UV_1 \times 1000000)+(UV_2 \times 800000)+(90000 \times TT), \quad (5-1)$$

$$VCost=TT \times 140000, \quad (5-2)$$

$$GCost=CC \times \sum_{k=1}^2 \bar{\varepsilon}_k \cdot 10000, \quad (5-3)$$

$$Total\ cost= VCost+FCost+GCost. \quad (5-4)$$

حال هزینه های کل شامل هزینه های کل برنامه ریزی شده ( $PC$ ) و هزینه های کل اضافی ( $AC$ ) از طریق مقادیر  $PT_1$ ،  $PT_2$ ،  $AT_1$  و  $AT_2$  تعیین می شود. به عنوان مثال، برای محاسبات در سطح  $Cr = 0$  داریم:

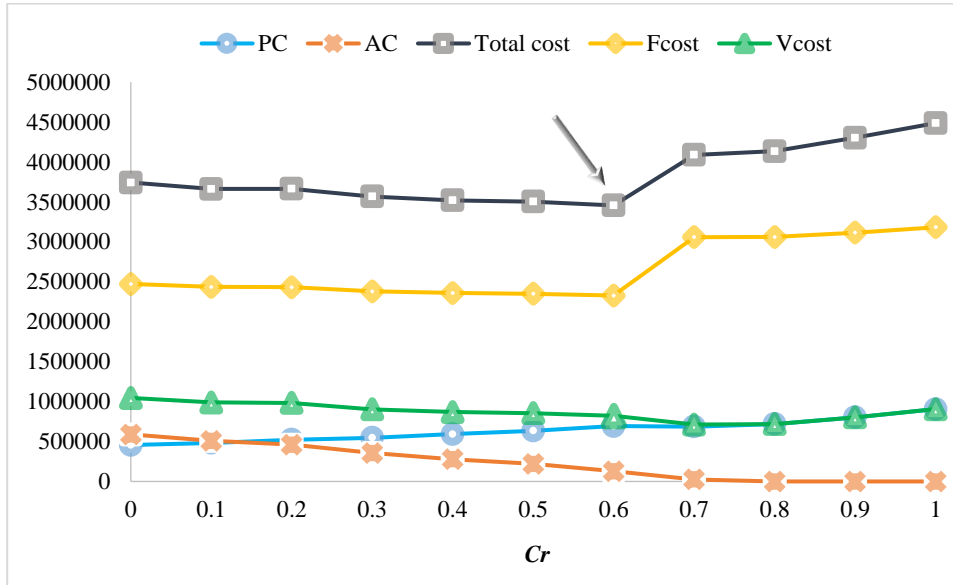
$$PC=PT_1 \times 140000 + PT_2 \times 140000 \quad (5-5)$$

$$AC=AT_1 \times 140000 + AT_2 \times 140000 \quad (5-6)$$

$$VCost=PC+AC. \quad (5-7)$$

بر اساس جدول ۵-۱۰، واضح است که هزینه برنامه ریزی شده با افزایش مقدار سطح اعتبار روندی افزایشی را دنبال می کند. این اتفاق دقیقاً برای هزینه های اضافی بطور عکس

رخ می دهد. دلیل اصلی پیمودن مسافت اضافی به علت شکست در مسیر به ازای مقادیر کمتر برای سطح اعتبار می باشد.



نمودار ۷-۵. نوسانات مرتبط با هزینه های ارزیابی شده در مقابل سطوح مختلف اعتبار فازی در مسأله مطالعه موردی.

بر اساس نمودار ۷-۵، مقدار سطح بهینه اعتبار فازی بر اساس ترجیح ارسال کننده برابر با ۰.۶ بدست می آید. در این سطح اعتبار هزینه کل معادل با ۳,۴۵۶,۱۰۰ تومان بدست آمده است که شامل استفاده از ۱ وسیله نقلیه ۷ تنی و ۱ وسیله نقلیه ۵ تنی بوده است. حال مسیریابی حاصل وسایل نقلیه در جدول ۵-۱۰ ارائه می گردد.

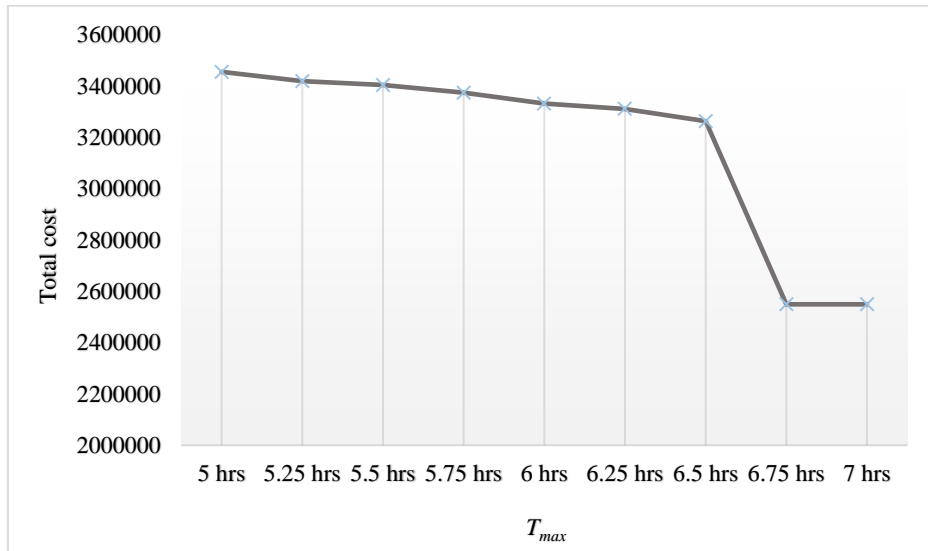
جدول ۵-۱۰. نتایج مسیریابی وسایل نقلیه مسأله مطالعه موردی.

وسایل نقلیه	شماره سفر	توالی سفر
۷ تن	1	0 - 4 - 12 - 11 - 10 - 9 - 8 - 7 - 6 - 5 - 13 - 14 - 6 - 14 - 15 - 7 - 15 - 16 - 8 - 16 - 17 - 9 - 17 - 18 - 10 - 18 - 19 - 11 - 19 - 20 - 28 - 27 - 19 -

وسایل نقلیه	شماره سفر	توالی سفر
		27 - 26 - 25 - 17 - 16 - 24 - 25 - 24 - 23 - 22 - 14 - 13 - 21 - 22 - 23 - 31 - 30 - 29 - 38 - 39 - 40 - 41 - 40 - 50 - 49 - 63 - 94 - 100
	2	100 - 49 - 50 - 40 - 41 - 42 - 43 - 32 - 31 - 30 - 41 - 42 - 42 - 43 - 44 - 33 - 32 - 33 - 34 - 35 - 46 - 35 - 36 - 47 - 46 - 45 - 44 - 45 - 46 - 47 - 48 - 53 - 62 - 61 - 69 - 68 - 60 - 61 - 62 - 97 - 100
۵ تن	1	0 - 63 - 64 - 70 - 71 - 55 - 54 - 65 - 64 - 65 - 54 - 55 - 56 - 57 - 66 - 73 - 72 - 71 - 72 - 80 - 79 - 78 - 86 - 87 - 79 - 80 - 88 - 95 - 100
	2	100 - 96 - 91 - 92 - 93 - 85 - 84 - 92 - 91 - 83 - 82 - 90 - 91 - 90 - 89 - 88 - 89 - 81 - 82 - 83 - 84 - 83 - 75 - 74 - 73 - 66 - 67 - 58 - 57 - 58 - 59 - 60 - 68 - 76 - 75 - 76 - 77 - 69 - 61 - 62 - 97 - 100

### ۱-۵-۵- آنالیز حساسیت مسأله مطالعه موردی

در این بخش، با استفاده از آنالیز حساسیت به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت، به ارزیابی سیاست های مدیریتی تحت مقادیر مختلف بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه ( $T_{max}$ ) پرداخته می شود. در واقع، به ازای مقادیر مختلف این پارامتر به ارزیابی مقادیر هزینه کل و کیفیت جواب می پردازیم. به همین منظور، بازه تغییرات از ۵-۷ ساعت را با در نظر گرفتن بازه های افزایش ۱۵ دقیقه ای مورد آنالیز قرار می دهیم. نتایج خروجی برای سطح اعتبار بهینه ۰.۶ در نمودار ۵-۸ ارائه شده است.



نمودار ۸-۵. آنالیز حساسیت پارامتر بیشینه زمان در دسترس وسایل نقلیه در مسأله مطالعه موردی.

همانطور که از نتایج مشخص است، بیشترین کاهش در بازه زمانی ۶.۵ ساعت و ۶.۷۵ ساعت رخ داده است که معادل با بیشینه زمان در دسترس در بازه ۶ ساعت و ۳۰ دقیقه الی ۶ ساعت و ۷۵ دقیقه می باشد که معادل با ۷۱۴,۶۰۰ تومان بوده است. علت این امر نیز حذف وسیله نقلیه ۵ تنی و جمع آوری با استفاده از وسیله نقلیه ۷ تنی می باشد. در واقع با افزایش زمان در دسترس تعداد سفرهای مورد نیاز نیز افزایش یافته و منطقه مورد نظر تنها با وسیله نقلیه مورد نظر و با انجام ۳ سفر سرویس دهی کامل را انجام می دهد. از سوی دیگر، کاهش مقدار پارامتر  $T_{max}$  تاثیر مستقیم بر روی افزایش هزینه های اضافی دارد که در نهایت منجر به برگشت به سکوی تخلیه و متحمل شدن هزینه مرتبط با آن می باشد. بنابراین، مدیریت بخش سپاهان شهر، با ارزیابی نتایج بدست آمده بهترین زمان در دسترس وسایل نقلیه را با توجه به سطح تقاضای غیر قطعی مشخص نماید.

#### ۵-۶- جمع بندی و نتیجه گیری فصل

در این فصل ابتدا به جهت صحنه گذاری مدل های پیشنهادی پژوهش، به تولید نمونه های تصادفی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ پرداخته شد، سپس با در نظر گرفتن حل کننده CPLEX نرم افزار GAMS به ارزیابی الگوریتم های SA و GWO در مسأله

MTVRPTW و الگوریتم های IMMAS و SA در مسأله MTCARPTW تحت حالت قطعی پرداختیم. نتایج بدست آمده حاصل از حل مسائل در ابعاد کوچک و متوسط نشان از کارایی بالای الگوریتم های پیشنهادی در هر مسأله داشته است و هم چنین مشخص گردید که مسأله MTCARPTW دارای دقت بیشتری در مدل کردن مسأله جمع آوری زباله شهری می باشد. در ادامه، به تعیین سطح بهینه اعتبار فازی برای هر یک از مسأله پرداخته شد و در نهایت نیز الگوریتم های پیشنهادی هر مسأله به ازای سطح اعتبار فازی متناظر در شرایط عدم قطعیت با یکدیگر مقایسه گردیدند. در نهایت نیز جهت ارزیابی کاربردی بودن متدولوژی پیشنهادی پژوهش، مطالعه موردی منطقه سپاهان شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت نیز در فصل بعد نتیجه گیری های بدست آمده از این پژوهش و پیشنهادات آتی مورد بحث قرار می گیرد.

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

### ۶-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به مرور متدولوژی و دستاوردهای اصلی پژوهش پرداخته می شود و به طور خلاصه و موردی مهم ترین آن ها ارائه می گردد. سپس با مدنظر قرار دادن محدودیت های اصلی به بحث در مورد مسیرهای آتی پژوهش می پردازیم.

### ۶-۲- نتیجه گیری پژوهش

امروزه تولید انواع زباله های جامد و بروز انواع ناسازگاری های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی مربوط به آن ها، مدیریت خدمات شهری را با مشکلات عدیده ای در زمینه جمع آوری، حمل و نقل، پردازش و دفع این گونه زائدات مواجه ساخته است. حوزه جمع آوری و دفع یکی از سخت ترین و پر هزینه ترین عملیات در این چرخه است که حدوداً ۷۰ الی ۸۰ درصد از هزینه های مدیریت MSW را به خود اختصاص می دهد. بنابراین، سازمان هایی همچون شهرداری ها و واحدهای محلی همواره بدنبال طراحی سیستم بهینه

جمع آوری MSW از منظر اقتصادی می باشند. به همین دلیل، در این پژوهش سعی شده است تا با مطالعه دقیق مبانی نظری و ادبیات موضوعی به طراحی یک متدولوژی کارا جهت مدل کردن مسأله جمع آوری MSW و حل آن پرداخته شود.

در این قسمت نتایج مهمی که از پژوهش بدست آمده را مطرح خواهیم کرد:

- ۱- پس از بررسی ادبیات موضوع و مفروضات موجود در دنیای واقعی، مسأله در قالب دو فرمولاسیون جامع MTCARPTW و MTVRPTW با هدف کمینه سازی هزینه های کل سازمان شامل هزینه های پیمودن مسافت های مورد نیاز، هزینه های نشر دی اکسید کربن ناشی از حمل و نقل، هزینه های بکارگیری وسایل نقلیه موردنیاز و هزینه ها خروج از پنجره های زمانی مرتبط با مکان تقاضا و ارائه گردید.
- ۲- برای مقابله با عدم قطعیت حاکم در مسأله یعنی عدم قطعیت حجم زباله جمع آوری شده در هر مکان (خیابان/کوچه)، به اعمال برنامه ریزی فازی مبتنی بر نظریه اعتبار پرداخته شد و در هر دو مسأله پیشنهادی مورد بررسی و بحث قرار گرفت.
- ۳- برای حل مسائل، ابتدا با بررسی الگوریتم های پیشنهادی توسط پژوهشگران به توسعه الگوریتم های کارا پرداخته شد. بدین صورت که برای حل مسأله MTVRPTW به توسعه دو الگوریتم SA و GWO و برای حل مسأله MTCARPTW نیز به توسعه دو الگوریتم SA و IMMAS پرداختیم.
- ۴- جهت افزایش کارایی و بهبود عملکرد الگوریتم ها، تنظیم پارامترها با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی انجام گرفت.
- ۵- نتایج بدست آمده حاصل از مقایسه الگوریتم های پیشنهادی در هر مسأله با حل کننده CPLEX نرم افزار GAMS به عنوان روش دقیق، نشانگر آن بوده است که الگوریتم های پیشنهادی توانایی تولید جواب های باکیفیت را داشته بطوریکه

الگوریتم GWO و IMMAS به ترتیب بهترین عملکرد را در مسأله MTCARPTW و MTVRPTW در مقابل الگوریتم SA داشته اند.

۶- با مقایسه نتایج بدست آمده مشخص شد که در تمامی مسائل نمونه و بر اساس تمامی روش های حل، مقادیر تابع هدف مسأله MTCARPTW کمتر از مسأله MTVRPTW بوده است که علت آن هم دقت بیشتر مسائل ARP در تعریف شبکه و مسافت ها در مقایسه با VRP می باشد.

۷- جهت ارزیابی شرایط عدم قطعیت، ابتدا به تعیین سطح بهینه اعتبار ارسال کننده یا تصمیم گیرنده در هر مسأله پرداخته شد و سپس بر اساس سطح بهینه هریک از مسائل به حل نمونه های تصادفی در حالت فازی پرداخته شد که مشخص شد که شرایط عدم قطعیت به طور متوسط توابع هدف را افزایش داده ولی تغییری در تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز در سطح بهینه اعتبار نسبت به حالت قطعی بوجود نیامده است.

۸- برای ارزیابی کارایی متدولوژی پیشنهادی پژوهش، یک مسأله مطالعه موردی در منطقه سپاهان شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده در شرایط عدم قطعیت مورد تحلیل واقع شد. در نهایت، هزینه کل مورد نیاز برای جمع آوری پسماندهای منطقه به همراه تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز مشخص گردید.

۹- با کمک آنالیز حساسیت پارامتر بیشینه زمان در دسترس هر وسیله نقلیه نیز به مطالعه رفتار تابع هدف در مقابل تغییرات این پارامتر پرداخته شد. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که در یکی از بازه های تغییرات، کاهش چشمگیری در تابع هدف رخ می دهد که می تواند مورد توجه مدیریت جهت اخذ تصمیم و وضع سیاست بهینه قرار بگیرد.

### ۳-۶- پیشنهادات آتی

این بخش با مطالعه محدودیت های اصلی پژوهش به بررسی فرصت ها و مسیرهای بالقوه برای مواردی که در تحقیقات و مطالعات آینده قابل انجام می باشد، مورد بررسی قرار می دهد.

- ۱- در نظر گرفتن امکان استفاده از سکوهای تخلیه بار سیار در مناطق عملیاتی جهت تخلیه وسایل نقلیه بجای استفاده از سکوهای ثابت که به دلایل زیست محیطی فاصله زیادی از مناطق عملیاتی دارند که بر اساس آن می تواند در این جا بحث مکان یابی این سکوهای سیار در مناطق عملیاتی مطرح می گردد،
- ۲- در نظر گرفتن دوره های برنامه ریزی برای مدل سازی مسائل جهت ارائه یک الگوی ثابت جمع آوری هفتگی،
- ۳- توسعه سایر الگوریتم های معرفی شده در ادبیات موضوع از جمله *VNS* و *PSO* جهت ارزیابی و مقایسه با الگوریتم های فعلی و یا تقویت کارایی الگوریتم های فعلی در صورت ترکیب شدن،
- ۴- مطالعه سایر اهداف در کنار اهداف اقتصادی از جمله اهداف زیست محیطی و اجتماعی که در نهایت منجر به مطالعه شاخص های پایداری در مسأله شود،
- ۵- مطالعه سایر رویکردهای مقابله با عدم قطعیت از جمله سیستم های خاکستری، برنامه ریزی احتمالی، بهینه سازی استوار جهت ارزیابی و مقایسه با برنامه ریزی فازی مبتنی بر نظریه اعتبار،
- ۶- مطالعه یکپارچه مباحث طراحی زنجیره جمع آوری، بازیافت، انهدام و دفع *MSW* جهت در نظر گرفتن فرصت های شغلی و سودآوری سازمانی.

## مراجع

- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۷). گزارش سرانه تولید زباله کشور در سال ۱۳۹۴. قابل دسترسی در سایت <http://www.amar.org.ir>.
- Abdulkader, M. M., Gajpal, Y., & ElMekkawy, T. Y. (2015). Hybridized ant colony algorithm for the multi compartment vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 37, 196-203.
- Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H., & Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61, 117-128.
- Alumur, S. and Kara, B. Y. (2007). A New Model for the Hazardous Waste Location-Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 34, 1406-1423.
- Amaya, A., Langevin, A., & Trépanier, M. (2007). The capacitated arc routing problem with refill points. *Operations Research Letters*, 35(1), 45-53.
- Angelelli, E., & Speranza, M. G. (2002). The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. *European journal of Operational research*, 137(2), 233-247.
- Aringhieri, R., Bruglieri, M., Malucelli, F. and Nonato, M. (2004). An Asymmetric Vehicle Routing Problem Arising in the Collection and Disposal of Special Waste. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 17, 41-47.
- Armington, W. R., & Chen, R. B. (2018). Household food waste collection: Building service networks through neighborhood expansion. *Waste Management*, 77, 304-311.
- Arribas, C.A., Blazquez, C.A., & Lamas, A. (2010). Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research*, 28(4), 355-363.
- Asefi, H., Shahparvari, S., Chettri, P., & Lim, S. (2019). Variable fleet size and mix VRP with fleet heterogeneity in Integrated Solid Waste Management. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1376-1395.
- Bautista, J., Fernández, E. and Pereira, J. (2008). Solving an Urban Waste Collection Problem Using Ants Heuristics. *Computers & Operations Research*, 35, 3020-3033.
- Belenguer, J. M., Benavent, E., Labadi, N., Prins, C., & Reghioui, M. (2010). Split-delivery capacitated arc-routing problem: Lower bound and metaheuristic.

- Transportation Science, 44(2), 206-220.
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2011). Municipal Solid Waste Collection Problems: A Literature Review. *Economics & Management*, 1-37.
- Beltrami, E. and Bodin, L. D. (1974). Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection. *Networks*, 4, 65-94.
- Brunner, P. H., & Fellner, J. (2007). Setting priorities for waste management strategies in developing countries. *Waste Management & Research*, 25(3), 234-240.
- Budhiarta, I., Siwar, C., & Basri, H. (2012). Current status of municipal solid waste generation in Malaysia. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2(2), 129-134.
- Buhrkal, K., Larsen, A., & Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
- Cárdenas-Barrón, L. E., González-Velarde, J. L., Treviño-Garza, G., & Garza-Núñez, D. (2019). Heuristic algorithm based on reduce and optimize approach for a selective and periodic inventory routing problem in a waste vegetable oil collection environment. *International Journal of Production Economics*, 211, 44-59.
- Chang, N. B., Lu, H. Y., & Wei, Y. L. (1997). GIS technology for vehicle routing and scheduling in solid waste collection systems. *Journal of environmental engineering*, 123(9), 901-910.
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568-581.
- Coffey, M., & Coad, A. (2010). Collection of municipal solid waste in developing countries. UN-Habitat, United Nations Human Settlements Programme, Malta, 1-196.
- Cohen, A., and Tagg, B. (2011). Solid waste management services-operating budget analyst notes. Available online: [http://www.toronto.ca/budget2011/pdf/op11\\_an\\_swm.pdf](http://www.toronto.ca/budget2011/pdf/op11_an_swm.pdf), January 2011.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- Dorigo, M. (1992). Ottimizzazione, apprendimento automatico, ed algoritmi basati su metafora naturale. Unpublished doctoral dissertation, Politecnico di Milano,

## Italy

- Dotoli, M., & Epicoco, N. (2017). A Vehicle Routing Technique for Hazardous Waste Collection. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 9694-9699.
- Dror, M., & Langevin, A. (2000). Transformations and exact node routing solutions by column generation. In *Arc Routing* (pp. 277-326). Springer, Boston, MA.
- EEA, E. (2008). Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions. Support document to EEA Briefing, 1.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M., & Laporte, G. (1995). Arc routing problems, part II: The rural postman problem. *Operations research*, 43(3), 399-414.
- Erfani, S. M. H., Danesh, S., Karrabi, S. M., & Shad, R. (2017). A novel approach to find and optimize bin locations and collection routes using a geographic information system. *Waste Management & Research*, 35(7), 776-785.
- Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M. A., & Mirjalili, S. (2018). Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications. *Neural computing and applications*, 30(2), 413-435.
- Ferretti, I., Zanoni, S., Zavarella, L., & Diana, A. (2007). Greening the aluminium supply chain. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 236-245.
- Fischetti, M., Salazar González, J. J., & Toth, P. (1997). A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem. *Operations Research*, 45(3), 378-394.
- Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2), 109-124.
- Gapminder. (2017). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects. <https://www.gapminder.org/data/documentation/gd003/>.
- Ghiani, G., Improta, G., & Laporte, G. (2001). The capacitated arc routing problem with intermediate facilities. *Networks: An International Journal*, 37(3), 134-143.
- Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (Eds.). (2006). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 57). Springer Science & Business Media.
- Golden, B. L., & Wong, R. T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11(3), 305-315.
- Golden, B. L., Assad, A. A., & Wasil, E. A. (2002). Routing vehicles in the real world: applications in the solid waste, beverage, food, dairy, and newspaper industries. In *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied

Mathematics, 245-286.

- Gupta, P., Kumar, V., Rana, K. P. S., & Mishra, P. (2015, September). Comparative study of some optimization techniques applied to Jacketed CSTR control. In 2015 4th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (pp. 1-6). IEEE
- Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management*, 71, 31-41.
- Henke, T., Speranza, M. G., & Wäscher, G. (2015). The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *European Journal of Operational Research*, 246(3), 730-743.
- Huang, S. H., & Lin, P. C. (2015). Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy. *Omega*, 55, 24-37.
- Hübner, A., & Ostermeier, M. (2018). A multi-compartment vehicle routing problem with loading and unloading costs. *Transportation Science*, 53(1), 282-300.
- Inghels, D., Dullaert, W., & Vigo, D. (2016). A service network design model for multimodal municipal solid waste transport. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 68-79.
- Karadimas, N.V., Papatzelou, K., & Loumos, V.G. (2007). Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm. *Waste Management & Research*, 25(2), 139-147.
- Kaufmann, A. (1975). *Introduction to the theory of fuzzy subsets*. Academic Press, 2.
- Kenny, T., & Gray, N. F. (2009). Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland. *Environmental impact assessment review*, 29(1), 1-6.
- Kim, B-Y., Kim, S. and Sahoo, S. (2006). Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Computers & Operations Research*, 33, 3624-3642.
- Kinobe, J. R., Bosona, T., Gebresenbet, G., Niwagaba, C. B., & Vinnerås, B. (2015). Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. *Habitat International*, 49, 126-137.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kubotani, H., & Yoshimura, K. (2003). Performance evaluation of acceptance probability functions for multi-objective SA. *Computers & Operations Research*, 30(3), 427-442
- Kuo, R. J., Zulvia, F. E., & Suryadi, K. (2012). Hybrid particle swarm optimization with genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with fuzzy demand—A case study on garbage collection system. *Applied Mathematics and Computation*, 219(5), 2574-2588.
- Kytöjoki, J., Nuortio, T., Bräysy, O., & Gendreau, M. (2007). An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34(9), 2743-2757.
- Lacomme, P., Prins, C., & Ramdane-Chérif, W. (2002). Evolutionary algorithms for multiperiod arc routing problems. In *Proc. of the 9th Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based systems*, 845-852.
- Lacomme, P., Prins, C., & Ramdane-Cherif, W. (2004). Competitive memetic algorithms for arc routing problems. *Annals of Operations Research*, 131(1-4), 159-185.
- Li, J. Q., Borenstein, D., & Mirchandani, P. B. (2008). Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil. *Omega*, 36(6), 1133-1149.
- Liu, B. (2004). *Uncertain Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations*, Springer, Berlin.
- López-Sánchez, A. D., Hernández-Díaz, A. G., Gortázar, F., & Hinojosa, M. A. (2018). A multiobjective GRASP-VND algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(2), 545-567.
- Maniezzo, V. (2004). Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support. UBLCS Techni-cal Report Series, Bolonha, Italy: University of Bolonha, 27.
- Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. *Transportation research part B: methodological*, 84, 256-273.
- Medjahed, S. A., Saadi, T. A., Benyettou, A., & Ouali, M. (2016). Gray wolf

- optimizer for hyperspectral band selection. *Applied Soft Computing*, 40, 178-186.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61
- Mirmohammadi, S. H., Babae Tirkolae, E., Goli, A., & Dehnavi-Arani, S. (2017). The periodic green vehicle routing problem with considering of time-dependent urban traffic and time windows. *International of Optimization in Civil Engineering*, 7(1), 143-156.
- Mourão, M. C., Nunes, A. C., & Prins, C. (2009). Heuristic methods for the sectoring arc routing problem. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 856-868.
- Nahmias, S. (1978). Fuzzy variables. *Fuzzy sets and systems*, 1(2), 97-110.
- Nowakowski, P., Szwarc, K., & Boryczka, U. (2018). Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 1-22.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., & Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30(2), 223-232.
- Poot, A., Kant, G., & Wagelmans, A. P. M. (2002). A savings based method for real-life vehicle routing problems. *Journal of the Operational Research Society*, 53(1), 57-68.
- Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types. *Journal of Cleaner Production*, 170, 227-241.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, 33(8), 1691-1703.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 34-54.
- Ramos, T. R. P., de Morais, C. S., & Barbosa-Povo, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches.

- Expert Systems with Applications, 103, 146-158.
- Reghioui, M., Prins, C., & Labadi, N. (2007). GRASP with path relinking for the capacitated arc routing problem with time windows. In *Workshops on Applications of Evolutionary Computation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 722-731.
- Russell, R., & Igo, W. (1979). An assignment routing problem. *Networks*, 9(1), 1-17.
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, J. R. (2009). An improved heuristic for the capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(9), 2632-2637.
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, J. R. (2010). An improved ant colony optimization based algorithm for the capacitated arc routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(2), 246-266.
- Shih, L. H., & Chang, H. C. (2001). A routing and scheduling system for infectious waste collection. *Environmental Modeling & Assessment*, 6(4), 261-269.
- Simonetto, E. d. O. and Borenstein, D. (2007). A Decision Support System for the Operational planning of Solid Waste Collection. *Waste Management*, 27, 1286-1297.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- Song, X., Tang, L., Zhao, S., Zhang, X., Li, L., Huang, J., & Cai, W. (2015). Grey Wolf Optimizer for parameter estimation in surface waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75, 147-157
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. (2018). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*, 89, 168-182.
- Stützle, T., & Hoos, H. H. (1996). Improving the Ant System: A detailed report on the MAX-MIN Ant System. FG Intellektik, FB Informatik, TU Darmstadt, Germany, Tech. Rep. AIDA-96-12.
- Stützle, T., and Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN ant system. *Future generation computer systems*, 16(8), 889-914.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., and Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook* (Vol. 1736). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons
- Thorneloe, S. A., Weitz, K. and Jambeck, J. (2007). Application of the US

- DecisionSupport Tool for Materials and Waste Management. *Waste Management*, 27, 1206-1220.
- Tirkolaee, E. B., Alinaghian, M., Bakhshi Sasi, M., & Seyyed Esfahani, M. M. (2016). Solving a robust capacitated arc routing problem using a hybrid simulated annealing algorithm: a waste collection application. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 3(1), 61-76.
- Tirkolaee, E. B., Goli, A., Bakhshi, M., & Mahdavi, I. (2017). A robust multi-trip vehicle routing problem of perishable products with intermediate depots and time windows. *Numerical Algebra, Control & Optimization*, 7(4), 417-433.
- Tirkolaee, E. B., Mahdavi, I., & Esfahani, M. M. S. (2018). A robust periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection considering drivers and crew's working time. *Waste Management*, 76, 138-146.
- Toronto City Council. (2018). City Budget. Report, City Government Toronto. Available at: <https://www.toronto.ca/city-government/budgetfinances/city-budget/previous-budgets/2018-city-budget/>
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tung, D. V. and Pinnoi, A. (2000). Vehicle Routing-scheduling for Waste Collection in Hanoi. *European Journal of Operational Research*, 125, 449-468.
- Úbeda, S., Faulin, J., Serrano, A., & Arcelus, F. J. (2014). Solving the green capacitated vehicle routing problem using a tabu search algorithm. *Lecture Notes in Management Science*, 6, 141-149.
- USEPA. (2008). Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States: Facts and figures for 2012. <https://www.epa.gov/>.
- Vansteenwegen, P., Souffriau, W., & Sörensen, K. (2010). Solving the mobile mapping van problem: A hybrid metaheuristic for capacitated arc routing with soft time windows. *Computers & operations research*, 37(11), 1870-1876.
- Wahab, W. B. (2012). *Solid Waste: Issues and Challenges in Urban Context*. PowerPoint format retrieved from the internet, 5.
- Wei, Q., Guo, Z., Lau, H. C., & He, Z. (2019). An artificial bee colony-based hybrid approach for waste collection problem with midway disposal pattern. *Applied Soft Computing*, 76, 629-637.
- Willemse, E. J., and Jounbert, J. W. (2019). Efficient local search strategies for the Mixed Capacitated Arc Routing Problems under Time Restrictions with

- Intermediate Facilities. *Computers & Operations Research*, 105, 203-225.
- Wøhlk, S., & Laporte, G. (2019). A districting-based heuristic for the coordinated capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 111, 271-284.
- Wy, J., Kim, B. I., & Kim, S. (2013). The rollon-rolloff waste collection vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 224(3), 466-476.
- Xu, Y., & Jiang, W. (2014). An improved variable neighborhood search algorithm for multi depot heterogeneous vehicle routing problem based on hybrid operators. *International Journal of Control and Automation*, 7(3), 299-316.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249.

## **Abstract**

**Research Aim:** The main aim is to reduce the total cost of collecting and transporting Municipal Solid Waste (MSW) considering its various components, which includes the traversing costs of vehicles, the costs of CO<sub>2</sub> emissions, the usage costs of vehicles and penalty cost for time windows violation.

**Research Method:** First, we formulate the MSW collection problem based on the development of two well-known problems including Vehicle Routing Problem (VRP) and Arch Routing Problem (ARP), and then the fuzzy programming approach based on credibility theory is employed to deal with the uncertainty of the issue. To solve each of these problems, meta-heuristic algorithms are developed including Simulated Annealing (SA) and Gray Wolf Optimization (GWO) algorithms to solve Multi-Trip VRP with Time Windows (MTVRPTW) as well as SA and Improved Max-Min Ant System (IMMAS) algorithms to solve Multi-Trip CARP with Time Windows (MTCARPTW). Moreover, to improve the efficiency of the proposed algorithms, the Taguchi design method is used.

**Findings:** The results of the deterministic problems demonstrated that GWO and IMMAS algorithms are the best to solve MTVRPTW and MTCARPT, respectively. Furthermore, after determining the optimal credibility level in each problem, the efficiency of the algorithms was also evaluated under uncertain conditions, which again yielded similar results to the deterministic one. On the other hand, the objective functions obtained for the random samples of the MTCARPTW took lower values due to the high accuracy of the ARP network compared to the VRP network. For this reason, the proposed MTCARPTW formulation and IMMAS solving algorithm were regarded to evaluate the applicability of the research methodology.

**Conclusion:** As the main concluding remarks, the superiority of our methodology against the exact solution method and the optimal output of the case study problem are considered. In the case study problem, after determining the optimal credibility level, the sensitivity analysis of the maximum available time for vehicles was performed such that the obtained results can be regarded as one of the main management tools.

**Keywords:** VRP, ARP, Green waste collection, SA, GWO, IMMAS.



Mazandaran University  
of Science and Technology

Mazandaran University of Science and Technology  
Department of Industrial Engineering

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Degree of P.h.D.

# Vehicle routing and scheduling for green municipal solid waste collection

By

**Erfan Babaee Tirkolaee**

Supervisor

**Prof. Iraj Mahdavi**  
**Prof. Mir Mehdi Seyyed Esfahani**

Advisor

**Prof. Gerhard-Wilhelm Weber**

**October 2019**