مسیریابی دوره‌ای وسایل نقلیه در لجستیک معکوس با مشتریان واجد شرایط

علیرضا عیدی[1*]، سیدهادی علوی[2]

دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۳

چکیده

یکی از مباحث مهمی که در سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیکی کاربرد و اهمیت زیادی یافته است، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه می‌باشد و به مسئله‌ای اطلاق می‌شود که در آن هدف، تعیین مسیرهای بهینه برای تعدادی وسیله نقلیه مستقر در قرارگاه است که باید به مجموعه‌ای از مشتریان که هر یک دارای تقاضای معینی هستند، مراجعه نموده و خدمتی ارائه دهند. از طرفی در طول چند دهه اخیر به علت افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی و فشارهای قانونی، توجه خاصی به لجستیک معکوس شده است. لجستیک معکوس تمام فعالیت‌های زنجیره تأمین را شامل می‌شود که به‌صورت معکوس اتفاق می‌افتد. یکی از موضوعات حیاتی در پیشبرد لجستیک معکوس در سطح عملیاتی، مسئله مسیریابی در آن است. در این راستا، مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایل نقلیه با در نظر گرفتن میزان عرضه کالا از مشتریان (مراکز جمع‌آوری) به‌عنوان شرط صلاحیت یافتن آنها برای سرویس‌دهی بررسی می‌شود. برای این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته پیشنهاد گردیده است. همچنین به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، تعدادی مثال نمونه تولید گردیده و با نرم‌افزار GAMS حل شده است.

واژه‌های کلیدی: لجستیک معکوس، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، چند دوره‌ای، مراکز جمع‌آوری

۱-مقدمه

یکی از مباحث مهمی که در چند دهه اخیر در سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیک کاربرد و اهمیت بسیاری پیدا کرده، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه[3] است. علت اصلی توجه به این مسئله، کاربردی بودن آن و تعیین راهبردهای کارا برای کاهش هزینه‌های عملیاتی است. از سوی دیگر به‌دلیل اینکه مسئله مسیریابی در کلاس مسائل NP-hard قرار دارد [۱] این مسئله از جهت ارائه روش حل نیز مورد توجه مطالعات دانشگاهی قرار گرفته است. این مسئله برای اولین با توسط دانتزینگ و رامسر[4] معرفی گردید[۲] و با گذشت نزدیک به پنجاه سال از انتشار اولین مقاله توسعه‌های زیادی در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه پدید آمده است. اجزای اصلی مسئله مسیریابی را می‌توان شبکه راه‌ها، مشتریان، قرارگاه‌ها[5]، وسایل نقلیه و رانندگان برشمرد. با اعمال شرایط و محدودیت بر هر یک از این اجزا، انواع مسائل مسیریابی وسایل نقلیه به وجود می‌آیند. از شاخص‌ترین آنها می‌توان به مسئله مسیریابی ظرفیت‌دار[6]، مسئله مسیریابی با پنجره‌های زمانی[7]، مسئله مسیریابی با برگشتی‌ها[8]، مسئله مسیریابی دوره‌ای[9]،

۱*- استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه کردستان، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: Alireza.eydi@uok.ac.ir، نشانی: سنندج، بلوار پاسداران، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، پست‌الکترونیکی: hadialavi1989@gmail.com

3- Vehicle Routing Problem (VRP)

4- Dantzig & Ramser

5- Depots

6- Capacitated

7- Time Windows

8- Backhauls

9- Periodic

مسیریابی با تحویل و برداشت[1]، و غیره اشاره کرد. در این‌گونه مسائل، با توجه به عملیات مورد انتظار از وسیله نقلیه، ماهیت مسئله و محدودیت‌های موجود در مسئله، پیچیدگی مدل‌سازی و رویکرد حل مسئله تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در طول چند دهه اخیر به علت افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی و فشارهای قانونی، توجه خاصی به لجستیک معکوس[2]شده است. لجستیک معکوس تمام فعالیت‌های زنجیره تأمین را شامل می‌شود که به‌صورت معکوس اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین اصل در لجستیک معکوس این است که بسیاری از مواد که اصطلاحاً غیرقابل استفاده یا فاقد کاربرد برای مصرف‌کننده هستند، دارای ارزش بوده و با اندکی اصلاح و مرمت می‌توانند دوباره وارد زنجیره تأمین شوند. لجستیک معکوس فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل کارا و جریان مؤثر هزینه مواد، کالاهای در حال ساخت، کالاهای نهائی و اطلاعات مرتبط از نقطه مصرف‌کننده تا مبدأ ساخت برای بازیابی ارزش یا دفن[3]مناسب است[۳]. به عبارتی می‌توان گفت لجستیک معکوس در ارتباط با کالاهای عودتی یا کالاهای برگشتی است. یکی از جنبه‌های اصلی لجستیک معکوس، بحث توزیع معکوس[4] است. توزیع معکوس عبارت از فرآیند جمع‌آوری و حمل‌ونقل کالاهای استفاده‌شده، ضایعات و ... از اولین تا آخرین مصرف‌کننده در زنجیره تأمین به شمار می‌رود. یکی از موضوعات حیاتی در پیشبرد لجستیک معکوس در زمینه توزیع معکوس به‌ویژه در سطح عملیاتی، مسئله مسیریابی در آن است. تابه‌حال تحقیقات بسیاری در زمینه لجستیک معکوس انجام شده است ولی تعداد اندکی از آنها در مورد مسیریابی لجستیک معکوس بوده است[۴]. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه را می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد: برداشت‌های انتخابی با قیمت‌گذاری (برداشت و جمع‌آوری کالاها با توجه به سودآور بودن آنها)، جمع‌آوری ضایعات[5] (برای بازیافت آنها و با هدف محافظت از محیط زیست)، جمع‌آوری کالاهایی که عمر آنها تمام شده (پایان عمر[6]) است (به‌منظور و یا بازیافت آنها) ، توزیع و جمع‌آوری هم‌زمان (برای آن دسته از مسائلی که مسیریابی آمیخته امکان‌پذیر باشد).

پرایو[7] و همکاران [۵] در یک مطالعه موردی در زمینه برداشت‌های انتخابی با قیمت‌گذاری، در هنگ‌کنگ مسئله مسیریابی وسایل نقلیه را در زمینه توزیع نوشیدنی‌ها به فروشگاه‌ها و جمع‌آوری بطری‌های خالی به طور هم‌زمان بررسی کردند. در کار آنها توزیع کالاها به هر مرکز به‌طور اجباری ولی جمع‌آوری کالاها اختیاری بوده و در صورتی انجام می‌گرفت که به اندازه کافی فضا در وسایل نقلیه وجود داشته باشد. آنها مسئله خود را تحت مسئله مسیریابی با تحویل و برداشت با در نظرگرفتن پنجره زمانی برای مشتریان، ناوگان ناهمگن[8]و چند محصولی بودن فرموله کردند. این محققان در مدل خود برای وسایل نقلیه علاوه بر محدودیت ظرفیت، محدودیت حجم را نیز در نظر گرفته و برای حل آن از یک روش ابتکاری استفاده کردند. بعداً گریبکووسکایا[9] و همکاران [۶] مسئله مشابه همین مسئله را بررسی کردند با این تفاوت که مدل آنها با در نظر گرفتن یک وسیله نقلیه بود. آراس[10] و همکاران [۷] یک مسئله مسیریابی با چند قرارگاه را با قیمت‌گذاری بررسی کردند که در مسئله آنها، ملاقات هر یک از مشتریان با توجه به سودآور بودن جمع‌آوری کالاها از هر مشتری و محدودیت ظرفیت حمل وسایل نقلیه، انجام می‌گرفت. در مسئله آنها جمع‌آوری کالا از هر مرکز به‌صورت یک جا و غیر قابل تقسیم بود. آنها برای حل مدل در مقیاس معمولی و بزرگ از روش جستجوی ممنوع[11] استفاده کردند. در سال ۱۹۷۴، برای اولین بار توسط بلترامی و بودین[12]، مسئله مسیریابی جمع‌آوری ضایعات مطرح شد[۸]. سپس اسکولی[13] و همکاران [۹] مسئله مسیریابی وابسته به مقر[14]را برای جمع‌آوری کالاهای برگشتی بررسی کردند. مانسینی و اسپرنزا[15] یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای جمع‌آوری کالاهای برگشتی ارائه دادند که مدل آنها به‌صورت چند محصولی بود[۱۰]. راموس و اولیویرا[16]

1- Pickup and Delivery
2- Reverse Logistics (RL)
3- Disposal
4- Reverse Distribution
5- Wastes
6- End –Of – Life(EOL)

7- Privé
8- Heterogeneous Fleet
9- Gribkovskaia
10- Aras
11- Tabu Search
12- Beltrami & Bodin
13- Sculli
14- Site-Dependent
15- Mansini & Speranza
16- Ramos & Oliveira

مسئله مسیریابی چند قرارگاهی در زمینه جمع‌آوری ضایعات را بررسی کردند[۱۱]. ماراورتز[1] و همکاران [۱۲] در یک مطالعه موردی در اسپانیا مسئله مسیریابی-مکان‌یابی[2] را در زمینه جمع‌آوری ضایعات الکتریکی بررسی کردند. آنها ابتدا یک مدل خطی عدد صحیح مختلط مکان‌یابی تسهیلات به‌منظور مکان‌یابی مراکز ارائه داده و سپس یک مدل عدد صحیح برای مسیریابی وسایل نقلیه مطرح کردند که ناوگان حمل‌ونقل در این مسئله غیرهمگن فرض شده بود. برای حل مدل نیز از روش ابتکاری مبتنی بر صرفه‌جوئی[3]استفاده کردند. تانیا رودریگز پریرا راموس[4] و همکاران یک مسئله دوره‌ای، چند محصولی و چند دپویی را در زمینه جمع‌آوری و بازیافت ضایعات بررسی نمودند و برای حل مدل از یک روش ابتکاری استفاده کردند[۱۳]. در زمینه جمع‌آوری کالاهایی که عمرشان تمام شده (پایان عمر)، در سال ۲۰۰۶، ابتدا شالتمن[5] و همکاران در یک مطالعه موردی در آلمان این مسئله را بررسی کردند[۱۴]. هدف این مسئله کمینه نمودن کل مسافت طی شده بود که برای حل مدل از روش ابتکاری جستجوی ممنوع استفاده کردند. لی‌بلانک[6] و همکاران نیز یک مطالعه موردی در زمینه بازیافت اجزای وسایل نقلیه در هلند انجام دادند. مسئله آنها به‌صورت چند دپوئی و همراه با تحویل و برداشت بود. آنها برای حل مسئله از یک روش ابتکاری که مبتنی بر ایجاد مسیر و جزءبندی مجموعه بود، استفاده کردند[۱۵]. کیم[7] و همکاران نیز در یک مطالعه موردی مسئله جمع‌آوری کالاهای الکترونیکی پایان عمر را در کره‌جنوبی بررسی کردند[۱۶]. در مسئله آنها چهار مرکز بازیافت (قرارگاه) وجود داشت که برای هر مرکز بازیافت به طور جداگانه با توجه به اینکه هر مرکز بازیافت دارای مراکز جمع‌آوری مخصوص به خود می‌باشد، مسئله را با هدف کمینه‌سازی مسافت طی شده بررسی نمودند. در این مسئله فرض شده که هر یک از مراکز بازیافت، تعداد ثابت و کافی وسیله نقلیه همگن دارد که هر یک از وسایل نقلیه علاوه بر محدودیت ظرفیت، دارای محدودیت حداکثر مسافت طی شده بودند. آنها نیز برای حل مدل از روش ابتکاری جستجوی ممنوع استفاده کردند. بعداً این محققان همین مسئله را به مسئله چند قرارگاهی[۱۷] گسترش دادند. آنها در این مسئله از رویه دو مرحله‌ای در امر داشتن چند دپو استفاده کردند. بدین ترتیب که در مسئله آنها ابتدا مراکز جمع‌آوری به یکی از چهار مراکز بازیافت تخصیص می‌یافت و سپس مسئله برای هر یک از مراکز بازیافت حل می‌شد. آنها برای حل این مسئله نیز از روش جستجوی ممنوع استفاده کردند. در زمینه توزیع و جمع‌آوری هم‌زمان، دل‌آمیکو[8] و همکاران مدل صفر- یک ارائه کردند[۱۸] و برای حل مسئله از روش شاخه- قیمت[9] استفاده نمودند. الشمرانی[10] و همکاران، مسئله واقعی در زمینه توزیع و جمع‌آوری خون‌های اهدائی را بررسی کردند[۱۹]. در مدل آنها برای هر مرکز جمع‌آوری که پوشش داده نمی‌شد، جریمه در نظر گرفته شده بود. علاوه بر این در مدل آنها تقاضا به‌صورت احتمالی و مسئله به‌صورت چند دوره‌ای در نظر گرفته شده بود. آنها برای حل مسئله روشی ابتکاری ارائه دادند. دثلوف[11]، مسئله مسیریابی توزیع و جمع‌آوری هم‌زمان در لجستیک معکوس را با هدف کمیته نمودن مسافت طی شده مورد مطالعه قرار داد و برای حل مدل، یک روش ابتکاری پیشنهاد نمود[۲۰]. کاتای[12] یک روش فرا ابتکاری جدید تحت عنوان الگوریتم مبتنی بر صرفه‌جویی مورچگان[13] در همین زمینه ارائه داد[۲۱]. تاسان و گن[14] نیز برای حل مسئله مسیریابی توزیع و جمع‌آوری هم‌زمان یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادند[۲۲]. سالی کاسم و مینقیوان چن[15] مسئله مسیریابی در لجستیک معکوس با تحویل و برداشت هم‌زمان کالاها را با در نظر گرفتن پنجره زمانی برای مشتریان بررسی نموده و برای به دست آوردن جواب اولیه یک روش ابتکاری ارائه داده و برای بهبود جواب از روش جستجوی همسایگی[16]و روش بازپخت شبیه‌سازی شده[17] استفاده کردند[۲۳].

1- Mar-Ortiz
2- Location - Routing
3- Savings-based heuristic algorithm
4- Tania Rodrigues Pereira Ramos
5- Schultmann
6- le Blanc
7- Kim
8- Dell'Amico
9- Branch - Price
10- Alshamrani
11- Dethloff
12- Çatay
13- Saving-based ant algorithm
14- Tasan & Gen
15- Sally Kassem&Mingyuan Chen
16- Neighborhood search
17- Simulated annealing procedure

همان‌طور که از ادبیات موضوع برمی‌آید بخش مهمی از مطالعات در زمینه مسیریابی لجستیک معکوس در قالب مطالعات موردی بوده و کارهای ارزشمند و مدل‌های عمومی که در این زمینه غیر از مطالعات موردی صورت گرفته تحت عنوان مسیریابی با برداشت و تحویل هم‌زمان می‌باشد. بنابراین مطالعه مسئله مسیریابی در لجستیک معکوس به‌طور مستقل با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و شرایطی که در این زمینه و امور جمع‌آوری مواد و کالاها پدیدار می‌شود، ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا با در نظر گرفتن دو موضوع مسئله مسیریابی در لجستیک معکوس بررسی می‌گردد. موضوع اول سرویس‌دهی به مشتریان مشروط به میزان عرضه کالا از آنها می‌باشد. یعنی با تعریف حداقل میزان عرضه قابل قبول برای مشتریان، به مشتریانی سرویس‌دهی صورت می‌گیرد که عرضه کالای آنها این شرط را تأمین کند. این مورد در امر جمع‌آوری کالاها به دلایل اقتصادی در دنیای واقعی نیز اتفاق می‌افتد که در مطالعات انجام شده مورد توجه نبوده است. موضوع دوم در نظر گرفتن مسئله مسیریابی دوره‌ای می‌باشد که در آن مشتریان با توجه به میزان عرضه خود در هر دوره، نیازمند دریافت خدمت در دوره‌های مختلف از افق زمانی بوده و مسیریابی باید برای هر دوره از افق برنامه‌ریزی صورت گیرد. این مسئله در دو حوزه جمع‌آوری ضایعات و کالاهای پایان عمر یا کارکرده به منظور بازیافت و ... دارای کاربرد خواهد بود. علت اصلی مطرح شدن این دو موضوع در این تحقیق این است که در مطالعات انجام شده در حوزه مسیریابی در لجستیک معکوس به میزان عرضه کالا از مشتریان (مراکز جمع‌آوری) توجهی نشده است. با توجه به اینکه در لجستیک معکوس بر خلاف اکثر سیستم‌های توزیعی، سرویس‌دهی به مشتریان دارای اضطرار نیست، لذا می‌توان با تلفیق دو موضوع سرویس‌دهی مشروط به میزان عرضه کالا و مسیریابی دوره‌ای که در جمع‌آوری ضایعات و کالاهای قابل بازیافت در دنیای واقعی دارای کاربرد است، مسئله جدیدی را مطرح نمود که در آن به مشتریانی که در دوره یا دوره‌هایی از افق برنامه‌ریزی میزان عرضه کالای اندکی دارند، سرویس‌دهی انجام نگیرد و در صورتی‌که میزان مجموع عرضه کالا در دوره یا دوره‌های بعدی به حد مطلوب برسد، سرویس‌دهی گردند. این موضوع باعث کاهش مسافت پیموده شده و یا کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیاتی می‌گردد.

در ادامه ساختار مقاله شامل بخش‌های زیر می‌باشد. بخش دوم به ارائه مفروضات مدل اختصاص یافته است. در بخش سوم فرمول‌بندی مدل ارائه می‌گردد. در بخش چهارم نیز آزمایش‌های مدل بیان می‌گردد. در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیق ارائه می‌شود.

۲- مفروضات مدل

مفروضات کلی که در این تحقیق لحاظ می‌گردند عبارتنداز:

- تعداد مشتریان (مراکز جمع‌آوری) معلوم و مشخص است.
- مسئله به‌صورت تک دپوئی و چند دوره‌ای است.
- مکان هر یک از مشتریان و دپو مشخص است.
- میزان عرضه کالا از مشتریان قطعی و مثبت است.
- شبکه راه‌ها متقارن است.
- ناوگان وسایل نقلیه، همگن می‌باشند.
- هزینه‌های حمل‌ونقل وابسته به مسافت پیموده شده است.
- دپو دارای وسایل نقلیه تحت مالکیت خود است، بنابراین هزینه به‌کارگیری آنها کم و شامل هزینه استهلاک وسایل نقلیه، هزینه راه‌اندازی و ... می‌باشد.
- از نظر تعداد وسایل نقلیه محدودیتی وجود ندارد و به اندازه کافی وسیله نقلیه در دپو وجود دارد.
- هر وسیله نقلیه حرکت خود را از دپو شروع کرده و پس از سرویس‌دهی دوباره به دپو باز می‌گردد.
- هر مشتری فقط می‌تواند در یک تور قرار بگیرد.
- وسایل نقلیه دارای محدودیت ظرفیت می‌باشند.
- برای سرویس‌دهی به مشتریان به منظور جمع‌آوری کالاها یک مقدار حداقلی برای واجد شرایط شدن آنها در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب در هر دوره مشتریانی که از آن مقدار تعیین شده، مقدار کالای بیشتری عرضه نکنند سرویس‌دهی نمی‌شوند (مگر دردوره آخر).
- در هر دوره مقدار عرضه کالای مشتریانی که با توجه به واجد شرط بودن سرویس‌دهی نمی‌شوند به دوره بعدی منتقل می‌شود.

۳- فرمول‌بندی مدل

در این بخش فرمول‌بندی مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد. در ادامه به منظور بیان فرم ریاضی مدل، نمادها (شامل مجموعه اندیس‌ها، عوامل و متغیرهای تصمیم) معرفی شده و در فرمول‌بندی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱- مجموعه اندیس‌ها

اندیس‌های مدل عبارتنداز:

i: اندیس مربوط به مشتریان (مراکز جمع‌آوری) در ابتدای یک یال $(i = 0,1,2, \dots, n)$

j: اندیس مربوط به مشتریان (مراکز جمع‌آوری) در انتهای یک یال $(j = 0,1,2, \dots, n)$

اندیس $i = 0$ و $j = 0$ مربوط به دپو می‌باشند $i \neq j$

t: اندیس مربوط به دوره زمانی $(t = 0,1,2, \dots, T)$

اندیس $t = 0$ مربوط به یک دوره مجازی با پارامترهای صفر

k: اندیس مربوط به وسایل نقلیه $(k = 1,2, \dots, K)$

۳-۲-پارامترهای مدل

پارامترهای مدل عبارتنداز:

C_{ij} :هزینه مرتبط با مسافت پیموده شده بین گرهi و j به‌طوری‌که $C_{ij} = C_{ji}$

F_k :هزینه به‌کارگیری وسیله نقلیه k

S_{jt} :میزان عرضه کالا از مرکز j در دوره t

Q_k : حداکثرظرفیت وسیله نقلیه k

S_{min} : آستانه قابل قبول عرضه کالا از سوی مشتریان به منظور سرویس‌دهی به آنها

۳-۳- متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مدل عبارتنداز:

X_{ijkt} : اگر گرهi به گرهj توسط وسیله نقلیهk در دوره t پیموده شود برابر یک و در غیر این‌صورت برابر صفر می‌باشد.

Z_{kt} : اگر وسیله نقلیه k در دوره t استفاده شود برابر یک و در غیر این‌صورت برابر صفر است.

Y_{jt} : اگر مرکز j در دوره t سرویس‌دهی شود برابر یک و در غیر این‌صورت برابر صفر است.

P_{jt} : میزان کالای قابل برداشت از مشتری j در دوره t

۳-۴- مدل ریاضی

فرمول‌بندی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته مسئله به‌شرح زیر می‌باشد:

$$\min Z = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{K} C_{ij}X_{ijkt} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} F_k Z_{kt} \; (i \neq j) \qquad (1)$$

$$\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{K} X_{ijkt} = Y_{it} \qquad \forall i = 1, \dots, n \; ; \; t = 1,2, \dots, T \; ; \; (i \neq j) \qquad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=1}^{K} X_{ijkt} = Y_{jt} \qquad \forall j = 1, \dots, n \; ; \; t = 1,2, \dots, T \; ; \; (i \neq j) \qquad (3)$$

$$P_{jt}.\left(1 - Y_{jt}\right) \leq S_{min} \qquad \forall j = 1,2, \dots, n \; ; \; t = 1,2, \dots, T-1 \qquad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{n} X_{ijkt} - \sum_{i=0}^{n} X_{jikt} = 0 \qquad \forall j = 1,2, \dots, n; k = 1,2, \dots, K \; ; \; t = 1,2, \dots, T \qquad (5)$$

$$X_{ijkt} \leq Z_{kt} \qquad \forall i, j = 0,1,2, \dots, n \; , \forall \; k = 1,2, \dots, K \; ; \; t = 1,2, \dots, T \; ; (i \neq j) \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n} P_{jt} \sum_{i=0}^{n} X_{ijkt} \leq Q_k \qquad \forall \; k = 1,2, \dots, K \; ; \; t = 1,2, \dots, T \qquad (7)$$

$$P_{jt} = S_{jt} + \left(1 - Y_{jt-1}\right).P_{jt-1} \qquad \forall \; j = 1,2, \dots, n \; ; \; t = 1,2, \dots, T \qquad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{0jkt} = Z_{kt} \qquad \forall \; k = 1,2, \dots, K \; ; \; t = 1,2, \dots, T \qquad (9)$$

$$u_{it} - u_{jt} + (n+1).X_{ijkt} \leq n$$
$$\forall\, i,j = 1,2,\dots,n\ ;\ k = 1,2,\dots,K\ ;\ t = 1,2,\dots,T\ ;\ (i \neq j) \quad (10)$$
$$P_{j0} = 0 \qquad \forall\, j = 1,2,\dots,n \quad (11)$$
$$Y_{j0} = 0 \qquad \forall\, j = 1,2,\dots,n \quad (12)$$
$$Y_{jT} = 1 \qquad \forall\, j = 1,2,\dots,n \quad (13)$$
$$X_{ijkt}\ , Y_{jt}\ , Z_{kt} = \{0,1\}\ ;\ P_{jt}\ , u_{it}\ , u_{jt} \geq 0 \quad (14)$$

رابطه (۱) بیانگر کمینه نمودن مجموع هزینه‌های مسیریابی در کل دوره‌ها می‌باشد. این رابطه از دو بخش تشکیل شده است که بخش اول بیانگر هزینه‌های متغیر یا مرتبط با مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه بوده و بخش دوم هزینه‌های به‌کارگیری وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه طبق مفروضات مسئله تحقیق دپو دارای وسایل نقلیه تحت مالکیت بودن خود است، هدف اصلی از آوردن بخش دوم کمینه نمودن تعداد وسایل نقلیه می‌باشد.

محدودیت‌های (۲)، (۳) و (۴) تضمین می‌کنند که در هر دوره هر مشتری یا مرکزی که مقدار مطلوب برای عرضه کالا را داشته باشد توسط یک وسیله نقلیه ملاقات می‌شود، در غیر این‌صورت در آن دوره سرویس‌دهی نخواهد شد.

محدودیت (۵) پیوسته بودن تورها را تضمین می‌کند، به عبارت دیگر وسیله نقلیه پس از ورود به یک گره از همان گره خارج می‌شود.

محدودیت (۶) تضمین‌کننده این است که هیچ مشتری توسط وسیله نقلیه غیرفعال سرویس‌دهی نمی‌شود.

محدودیت (۷) تضمین‌کننده ظرفیت وسایل نقلیه است، به عبارت دیگر در هر دوره مقدار کالاهای جمع‌آوری شده توسط هر وسیله نقلیه در هر تور نباید از حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نماید.

محدودیت (۸) در واقع محدودیت گذر مدل است و با محدودیت (۴) رابطه مکمل دارد. طبق این محدودیت در صورت عدم سرویس‌دهی مشتری، مقدار عرضه کالا از مشتری به دوره یا دوره‌های بعدی منتقل می‌شود تا جایی که مجموع کل کالای عرضه شده از سوی مشتری شرط واجد شرط بودن (محدودیت (۴)) را تأمین می‌کند.

محدودیت (۹) تضمین‌کننده این است که تور به وجود آمده توسط هر وسیله نقلیه فعال از قرارگاه آغاز شده و به آن ختم می‌گردد.

محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که هیچ زیر توری ایجاد نگردد. در این محدودیت دو متغیر u_{it} و u_{jt} نامنفی هستند که به عبارتی متغیرهای ضروری برای منع ایجاد زیرتور می‌باشند.

محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مقدار کالای برداشت شده دوره صفر که یک دوره مجازی است، برابر صفر است.

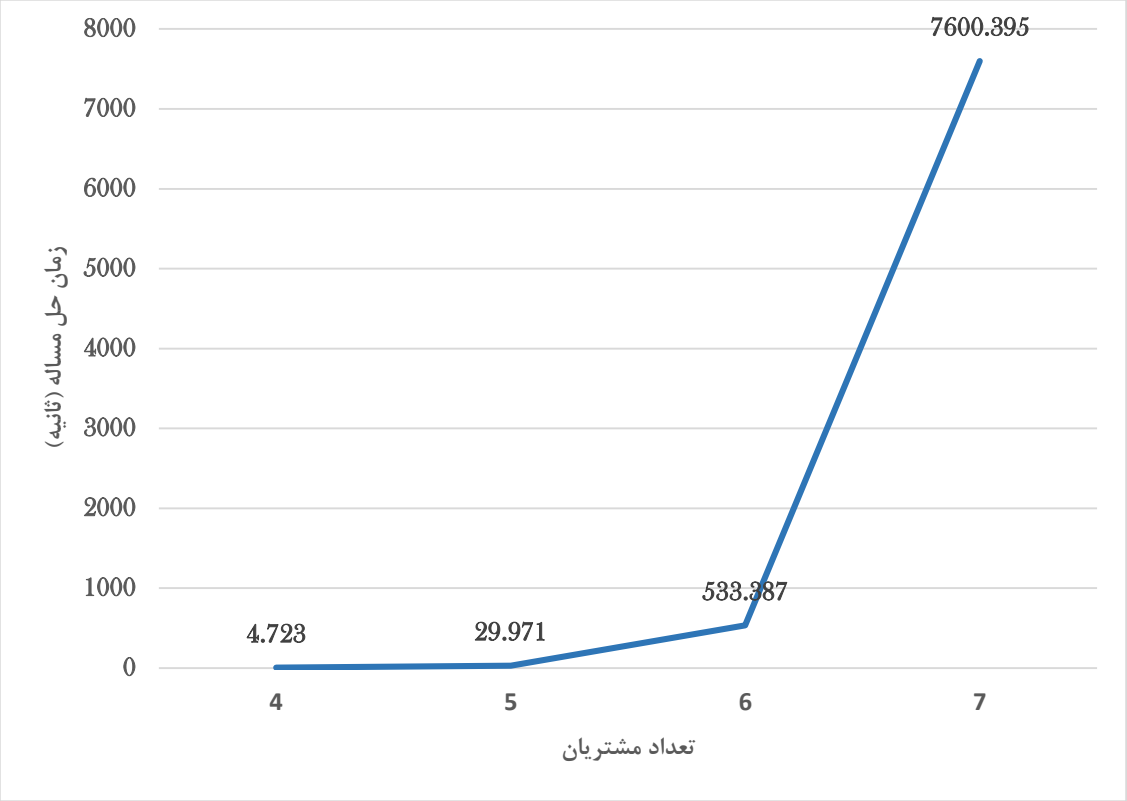
محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که در دوره صفر هیچ یک از مشتریان سرویس‌دهی نمی‌شوند.

محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که همه مشتریان در دوره پایانی افق برنامه‌ریزی سرویس‌دهی می‌شوند (بنابه مفروضات مسئله تحقیق).

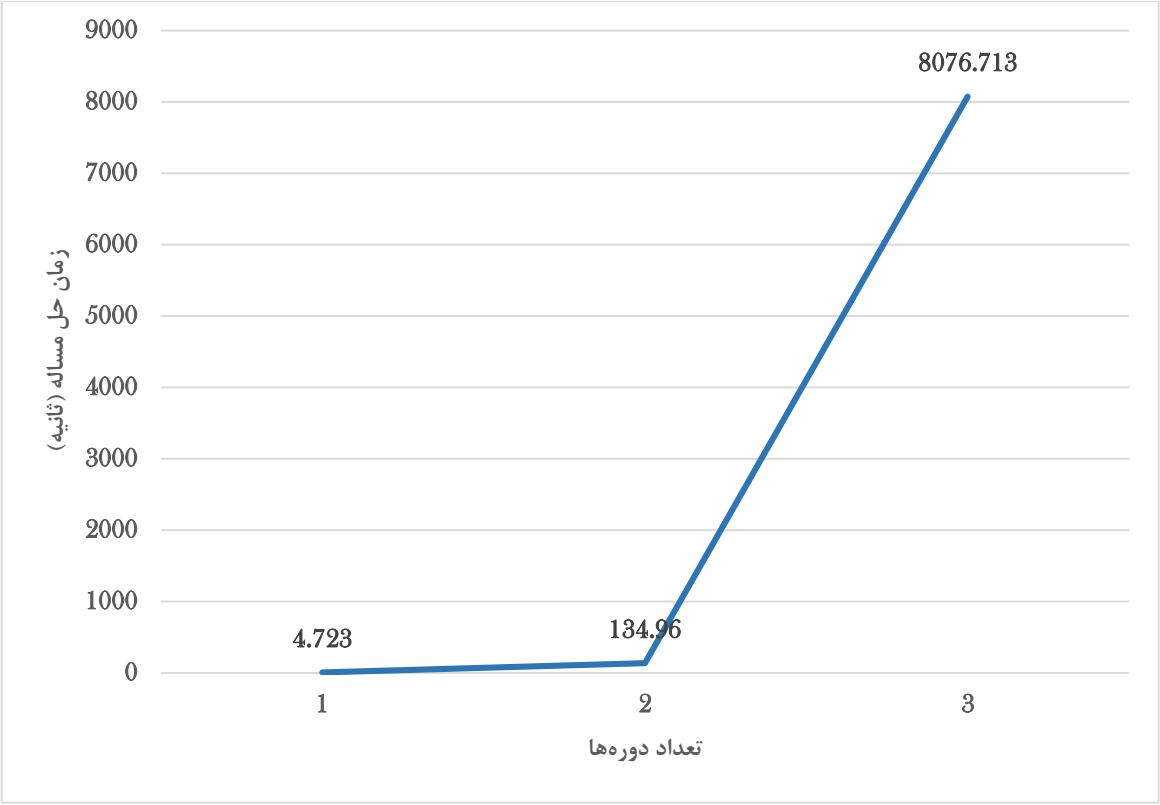
محدودیت (۱۴) نوع متغیرهای تصمیم را از نظر صفر- یک و نامنفی بودن تعیین می‌کند. نکته قابل توجه این است که محدودیت‌های (۴)، (۷)و (۸) غیرخطی می‌باشند.

جدول (۱): نتایج مسائل نمونه

مسائل نمونه تولید شده	تعداد دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی	تعداد وسایل نقلیه در دپو (فعال و غیرفعال)	تعداد مشتریان (مراکز جمع‌آوری)	مقدار جواب بهینه	زمان حل (ثانیه)
مسئله ۱	۲	۳	۴	۴۱۴	۴,۷۲۳
مسئله۲	۲	۳	۵	۵۱۳,۲	۲۹,۹۷۱
مسئله ۳	۳	۳	۴	۵۹۵,۶	۱۳۴,۹۶
مسئله ۴	۲	۳	۶	۴۶۹,۶	۵۳۳,۳۸۷
مسئله ۵	۳	۳	۵	۷۲۴,۴	۲۸۷۲,۷۹۲
مسئله ۶	۲	۳	۷	۵۴۷,۲	۷۶۰۰,۳۹۵
مسئله ۷	۴	۳	۴	۸۰۷,۲	۸۰۷۶,۷۱۳
مسئله ۸	۳	۳	۶	_	۲۸۸۰۰
مسئله ۹	۲	۳	۸	_	۲۸۸۰۰



شکل (۱): نمودار ارتباط بین تعداد مشتریان و زمان‌های حل در مسائل دو دوره‌ای



شکل (۲): نمودار ارتباط بین تعداد دوره‌ها و زمان‌های حل در مسائل با ۴ مشتری

۴-آزمایش‌های مدل

هدف از انجام آزمایش‌های محاسباتی، ارزیابی یا اعتبارسنجی مدل پیشهادی می‌باشد. از آنجایی که در ارتباط با مسئله تحقیق این مقاله، مسائل محک در ادبیات موضوع وجود ندارد، تعدادی مسئله در ابعاد کوچک به طور تصادفی تولید شده است.

مدل پیشنهادی در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS نسخه۲۴,۱,۳ کد گردیده و سپس مسائل نمونه توسط حل‌کننده BARON توسط رایانه‌ای با پردازنده core i5 2.6 GHz و با حافظه داخلی 6GB حل شده و نتایج مطابق جدول (۱) به‌دست آمده است. در همه مسائل حل شده حداکثر زمان مجاز برای حل مسئله در نرم‌افزار روی ۲۸۸۰۰ ثانیه تنظیم شده است. در جدول (۱) نیز در مسائلی که در ستون جواب بهینه، خط تیره ثبت شده، منظور این است که نرم‌افزار در مدت زمان مجاز قادر به حل مسئله نبوده است.

همان‌طور که از جدول (۱) و شکل‌های (۱) و (۲) مشهود است با افزایش تعداد دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی و همچنین افزایش تعداد مشتریان و به‌طور کلی افزایش ابعاد مسئله، زمان حل مسئله به‌طور نمائی افزایش می‌یابد.

۵-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه نقش بسیار مهمی در سیستم‌های لجستیکی و حمل‌ونقل آن ایفا می‌کند. همواره در تحقیقات سعی بر آن است که مدل‌های کلاسیک این مسئله را به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر کرده تا نیازهای حوزه لجستیک پوشش یابند. یکی از شاخه‌های حوزه لجستیک که در چند سال اخیر اهمیت بسیاری یافته است، بخش لجستیک معکوس است. با توجه به اینکه در لجستیک معکوس به خصوص در حوزه جمع‌آوری ضایعات و کالاهای قابل بازیافت، سرویس‌دهی به مشتریان دارای اضطرار نیست مسئله مسیریابی دوره‌ای در لجستیک معکوس را با در نظر گرفتن میزان عرضه کالا از مشتریان (مراکز عرضه) به عنوان شرط صلاحیت داشتن آنها برای سرویس‌دهی مورد بررسی قرار

می‌دهند. در این مسئله مشتریانی که در دوره یا دوره‌هایی از افق برنامه‌ریزی میزان عرضه کالای اندکی دارند مورد سرویس‌دهی قرار نمی‌گیرند و در صورتی‌که میزان مجموع عرضه کالا در دوره یا دوره‌های بعدی به حد مطلوب برسد، سرویس‌دهی می‌شوند که این موضوع باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل خواهد شد. در این راستا با در نظر گرفتن مفروضات و شرایط مسئله تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای مسئله پیشنهاد گردید. در انتها به منظور اعتبارسنجی مدل تعدادی مسائل نمونه در نرم‌افزار GAMS حل گردید. نتایج محاسباتی حاکی از این بود که با افزایش تعداد مشتریان و دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی، زمان حل مسئله به‌طور نمائی افزایش می‌یابد. از این‌رو برای دستیابی به جواب‌های مناسب در مدت زمان قابل قبول برای ابعاد بزرگ‌تر مسئله، لازم است یک روش ابتکاری و یا فراابتکاری طراحی گردد. بنابراین طراحی و توسعه یک روش ابتکاری و یا فراابتکاری برای حل مدل پیشنهادی می‌تواند از جمله تحقیقات آتی باشد.

منابع

[1] Lenstra J.K. and RinnooyKan A.H.G. ***"Complexity of vehicle routing and scheduling problem"***, Networks, vol. 11, pp. 221-227. 1981.

[2] Dantzig G.B. and Ramser J.M. ***"The truck dispatching problem, Management Science"***, vol. 6, pp. 81–91. 1959.

[3] FarzanehDaneshzand. ***"The Vehicle-Routing Problem"***, Logistics Operations and Management, pp. 127-153, 2011.

[4] Lin C, Choy KL, Ho GTS, Chung SH, Lam HY. ***"Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends"***. Expert System Applications.vol 41, pp. 1118-1138. 2014.

[5] Privé, J., Renaud, J., Boctor, F., &Laporte, G. ***"Solving a vehicle-routing problem arising in soft-drink distribution"***. Journal of the Operational Research Society, vol. 57, pp. 1045–1052. 2006.

[6] Gribkovskaia, I., Laporte, G., &Shyshou, A. ***"The single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups"***. Computers & Operations Research, vol. 35, pp. 2908–2924. 2008.

[7] Aras, N., Aksen, D., &Tekin, M. T. ***"Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing"***. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 19, pp. 866–884. 2011.

[8] Beltrami, E. J., &Bodin, L. D. ***"Networks and vehicle routing for municipal waste collection"***. Networks, vol. 4, pp. 65–94. 1974.

[9] Sculli, D., Mok, K. C., & Cheung, S. H. ***"Scheduling vehicles for refuse collection"***. Journal of the Operational Research Society, vol. 38, pp. 233–239. 1987.

[10] Mansini, R., &Speranza, M. G. ***"A linear programming model for the separate refuse collection service"***. Computers & Operations Research, vol. 25, pp. 659–673. 1998.

[11] Ramos, T., & Oliveira, R. ***"Delimitation of service areas in reverse logistics networks with multiple depots"***. Journal of the Operational Research Society, vol. 62, pp.1198–1210. 2011.

[12] Mar-Ortiz, J., Adenso-Diaz, B., & González-Velarde, J. ***"Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia"***, Spain. Journal of the Operational Research Society, vol. 62, pp. 1471–1484. 2011.

[13] Tania Rodrigues Pereira Ramos, Maria Isabel & Ana Paula Barbosa Povoa. ***"A multi- product, multi-depot periodic vehicle routing problem in a reverse logistics system"***. POMS 21st Annual conference. Vancouver, Canada. 2010.

[14] Schultmann, F., Zumkeller, M., &Rentz, O. ***"Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: an example from the automotive industry"***. European Journal of Operational Research, vol. 171, pp. 1033–1050. 2006.

[15] le Blanc, I., van Krieken, M., Krikke, H., &Fleuren, H. ***"Vehicle routing***

concepts in the closed-loop container network of ARN – a case study". OR Spectrum, vol. 28, pp.53–71. 2006.

[16] Kim, H., Yang, J., & Lee, K. ***"Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea"***. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 14, pp. 291–299. 2009.

[17] Kim, H., Yang, J., &Lee, K. ***"Reverse logistics using a multi-depot VRP approach for recycling end-of-life consumer electronic products in South Korea"***. International Journal of Sustainable Transportation, vol. 5, pp. 289–318. 2011.

[18] Dell'Amico, M., Righini, G., &Salani, M. ***"A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection"***. Transportation Science, vol. 40, pp. 235–247. 2006.

[19] Alshamrani, A., Mathur, K., &Ballou, R. H. ***"Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies"***. Computers & Operations Research, vol. 34, pp. 595–619. 2007.

[20] Dethloff, J. ***"Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up"***. OR Spectrum, vol. 23, pp. 79–96. 2001.

[21] Çatay, B. ***"A new saving-based ant algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery"***. Expert Systems with Application, vol. 37, pp. 6809–6817. 2010.

[22] Tasan, A. S., & Gen, M. ***"A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries"***. Computer & Industrial Engineering, vol. 62, pp. 755–761. 2012.

[23] Sally Kassem&Mingyuan Chen. ***"Solving reverse logistics vehicle routing problems with time windows"***. Int J AdvManufTechnol, vol. 68, pp.57–68. 2013.