

# مسیریابی وسایل نقلیه در لجستیک معکوس با تقسیم تقاضای مشتریان و بهینه‌سازی مصرف سوخت

علیرضا عیدی

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران  
alireza.eydi@uok.ac.ir

هادی علوی

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

اعتبارسنجی مدل ارائه شده تعدادی مثال نمونه تولید گردیده و با نرم‌افزار GAMS حل شده است.

مسیریابی وسایل نقلیه / لجستیک سبز / لجستیک معکوس /

جمع‌آوری تقسیم‌پذیر / مصرف سوخت.

## چکیده

## مقدمه

یکی از مباحث مهم در سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیکی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه [۱] به مسأله‌ای اطلاق می‌شود که در آن هدف تعیین مسیرهای بهینه برای تعدادی وسیله نقلیه مستقر در دپو است که بایستی به مجموعه‌ای از مشتریان که هر یک دارای تقاضای معینی هستند، مراجعه نموده و خدمتی ارائه دهند به طوری که هزینه‌های حمل‌ونقل کمینه گردد. این خدمت می‌تواند تحویل کالا، برداشت کالا و یا تلفیقی از هر دو باشد. این مسأله برای اولین بار توسط دانتزینگ و رامسر (۱۹۵۹) معرفی گردید و با گذشت نزدیک به پنجاه سال از انتشار اولین مقاله توسعه‌های زیادی در مسأله مسیریابی وسایل نقلیه به وجود آمده است. یکی از انواع مسائل مسیریابی، مسأله مسیریابی

مسأله مسیریابی وسایل نقلیه می‌باشد. از طرفی در سال‌های اخیر به علت افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسائل اقتصادی و فشارهای قانونی، توجه خاصی به لجستیک سبز و لجستیک معکوس شده است. در این راستا ما در این تحقیق مسأله مسیریابی وسایل نقلیه را با هدف بهینه‌سازی مصرف سوخت در امر جمع‌آوری کالاها در لجستیک معکوس بررسی می‌نماییم به طوری که جمع‌آوری کالاها از مشتریان به طور تقسیم‌پذیر ممکن است. برای این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته پیشنهاد گردیده است. همچنین به منظور

وسایل نقلیه با تحویل تقسیم‌پذیری [۲] (امکان‌پذیر بودن تقسیم تقاضای مشتریان به منظور تحویل کالا) می‌باشد که برای اولین بار توسط درور و ترودتو (۱۹۸۹ و ۱۹۹۰) معرفی و مدل ریاضی آن ارائه شد. این محققین اثبات کردند که این مسأله باعث کاهش تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز و مسافت کلی طی‌شده نسبت به مسأله مسیریابی ظرفیت‌دار [۳] می‌گردد. تفاوت اصلی مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر با مسیریابی ظرفیت‌دار در این است که تقاضای مشتریان می‌تواند از ظرفیت وسایل نقلیه بیشتر باشد که این مورد مسأله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند. علاوه بر این به علت کمینه نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل و تعداد وسایل نقلیه حتی در حالتی که تقاضای مشتریان از ظرفیت وسیله نقلیه کمتر باشد با توجه به ظرفیت وسایل نقلیه و تقاضای مشتریان، هر مشتری می‌تواند توسط بیش از یک وسیله نقلیه ملاقات شود.

یکی از زمینه‌هایی که در سال‌های اخیر در مسأله مسیریابی مورد توجه قرار گرفته است، مسیریابی وسایل نقلیه سبز [۴] می‌باشد که هدف اصلی در این حوزه، مسیریابی وسایل نقلیه با کاهش آثار زیست‌محیطی و میزان مصرف سوخت است. مسائل مسیریابی وسایل نقلیه سبز به سه شاخه کلی مسیریابی با بهینه‌سازی مصرف سوخت، مسیریابی با در نظر گرفتن آلودگی محیط زیست و مسیریابی در لجستیک معکوس [۵] تقسیم می‌شوند که اخیراً توجه خاصی نیز به لجستیک معکوس شده است [۶]. لجستیک معکوس فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل کارا و جریان موثر هزینه مواد، کالاهای در حال ساخت، کالاهای نهایی و اطلاعات مرتبط از نقطه مصرف‌کننده تا مبدأ ساخت برای بازیابی ارزش یا انهدام [۷] مناسب است [۸]. به نوعی می‌توان گفت لجستیک معکوس، فرآیند حرکت و انتقال برای کالاها و تولیداتی است که در زنجیره تأمین قابلیت بازگشت دارند. تا به حال تحقیقات بسیاری در زمینه لجستیک معکوس صورت گرفته است ولی تعداد اندکی از آنها در مورد مسیریابی در لجستیک معکوس بوده است [۶]. تحقیقات انجام شده در زمینه مسیریابی در لجستیک معکوس را می‌توان به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد: برداشت‌های انتخابی با قیمت‌گذاری (برداشت و

جمع‌آوری کالاها با توجه به سودآور بودن)، جمع‌آوری ضایعات [۹] (برای بازیافت آنها و با هدف حفاظت از محیط زیست)، جمع‌آوری کالاهایی که عمر آنها تمام شده است (به منظور بازتولید و یا بازیافت آنها)، توزیع و جمع‌آوری همزمان (برای آن دسته از مسائلی که مسیریابی آمیخته امکان‌پذیر باشد). با توجه به اینکه مسأله تحقیق مورد بررسی ما در دو حوزه جمع‌آوری ضایعات و جمع‌آوری کالاهای پایان عمر دارای کاربرد می‌باشد ما در این قسمت ابتدا به مرور ادبیات این دو حوزه در مسیریابی لجستیک معکوس می‌پردازیم، سپس نگاهی به مسیریابی وسایل نقلیه با بهینه‌سازی مصرف سوخت و مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر می‌کنیم و در انتها به مطالعات داخلی صورت گرفته در حوزه مسأله تحقیق می‌پردازیم.

مسأله مسیریابی برای جمع‌آوری ضایعات برای اولین بار توسط بلترامی و بودین (۱۹۷۴) مطرح شد. این محققین در مقاله خود، مسأله را به صورت چند دوره‌ای مطرح نمودند ولی مدل ریاضی برای مسأله ارائه ندادند و از الگوریتم حل ابتکاری برای حل مسأله استفاده کردند. سپس اسکولی و همکاران (۱۹۸۷) یک مسأله مسیریابی وابسته به مقرر [۱۱] برای جمع‌آوری کالاهای برگشتی را بررسی کردند. مانسینی و اسپرنزا (۱۹۹۸) یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای جمع‌آوری کالاهای برگشتی ارائه دادند که مدل آنها به صورت چند محصولی بود. این محققین از مدل ارائه شده برای انجام یک مطالعه موردی در شهر برشا استفاده نمودند. راموس و اولیویرا (۲۰۱۱) یک مسأله مسیریابی چنددپویی در زمینه جمع‌آوری ضایعات را بررسی نمودند. این تحقیق بر اساس یک مطالعه موردی در کشور پرتغال بود که در آن پنج دپو هفت منطقه را تحت پوشش قرار می‌دادند. دو هدف نیز در مسأله مورد توجه بود. اول کمینه‌سازی هزینه‌های متغیر (هزینه‌های مرتبط با مسافت وسایل نقلیه) و دوم بالانس حجم کاری دپوها در امر جمع‌آوری ضایعات. ماراوترز و همکاران (۲۰۱۱) در یک مطالعه موردی در اسپانیا مسأله مسیریابی-مکان‌یابی [۱۲] را در زمینه جمع‌آوری ضایعات الکتریکی بررسی کردند. آنها ابتدا یک مدل خطی عدد صحیح مختلط مکان‌یابی تسهیلات به منظور مکان‌یابی مراکز ارائه دادند و سپس یک

مدل عدد صحیح برای مسیریابی وسایل نقلیه مطرح کردند که ناوگان حمل و نقل در این مسأله ناهمگن فرض شده بود. در این تحقیق برای حل مسأله از الگوریتم ابتکاری مبتنی بر صرفه‌جویی [۱۳] استفاده شده است. در زمینه جمع‌آوری کالاهای پایان عمر، ابتدا شالتمن و همکاران (۲۰۰۶) در یک مطالعه موردی در آلمان این موضوع را تحت یک مسأله مسیریابی با محدودیت مسافت به صورت تک‌دپویی با ناوگان همگن مورد بررسی قرار دادند. هدف مسأله آنها کمینه نمودن کل مسافت طی شده وسایل نقلیه برای ملاقات ۱۲۰۲ مرکز اوراق وسایل اتومبیل بود که برای حل مسأله از الگوریتم جستجوی ممنوع [۱۴] استفاده نمودند. لی‌بلانک و همکاران (۲۰۰۶) نیز یک مطالعه موردی در زمینه بازیافت اجزای وسایل نقلیه در هلند انجام دادند. مسأله آنها به صورت چنددپویی و همراه با تحویل و برداشت بود که برای حل مسأله از الگوریتم ابتکاری مبتنی بر ایجاد مسیر و جزءبندی مجموعه [۱۵] استفاده کردند. در این تحقیق مدل ریاضی صریحی برای مسأله ارائه نشده است. کیم و همکاران (۲۰۰۹) نیز در یک مطالعه موردی، مسأله مسیریابی جمع‌آوری کالاهای الکترونیکی پایان عمر را در کره جنوبی بررسی کردند. در مسأله آنها چهار مرکز بازیافت (دپو) وجود داشت که هر مرکز بازیافت دارای مراکز جمع‌آوری (مشتریان) مخصوص به خود بود. در این مطالعه به طور جداگانه برای هر مرکز بازیافت مسأله مسیریابی با هدف کمینه‌سازی مسافت طی شده بررسی گردید. هر یک از مراکز بازیافت تعداد کافی وسیله نقلیه همگن یکسان در اختیار داشتند که وسایل نقلیه علاوه بر محدودیت حداکثر ظرفیت دارای محدودیت حداکثر مسافت طی شده بودند. این محققین برای حل مسأله از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده کردند. بعداً کیم و همکاران (۲۰۱۱) همین مسأله را به حالت چنددپویی گسترش دادند. آنها در این مسأله از رویه دو مرحله‌ای در امر چند دپو داشتن استفاده کردند. به این ترتیب که در مسأله آنها ابتدا مراکز جمع‌آوری به یکی از چهار مراکز بازیافت تخصیص می‌یافت و سپس مسأله برای هر یک از مراکز بازیافت حل می‌شد. در این تحقیق نیز برای حل مسأله از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده شد.

در زمینه مسیریابی با بهینه‌سازی مصرف سوخت اولین بار کارا و همکاران (۲۰۰۷) مدلی را تحت عنوان کمینه‌سازی مصرف انرژی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه برای مسأله مسیریابی ظرفیت‌دار ارائه دادند. تابع هدف ارائه شده در این تحقیق از حاصل ضرب مسافت طی شده در میزان وزن کل وسایل نقلیه (وزن وسیله نقلیه در حالت بدون محموله + وزن محموله) تشکیل شده بود. در این تحقیق برای مسأله الگوریتم حلی ارائه نشده است. ژیاو و همکاران (۲۰۱۲) مسأله مسیریابی ظرفیت‌دار را با هدف کمینه‌سازی مصرف سوخت مورد مطالعه قرار دادند به طوری که در مدل ارائه شده توسط این محققین طبق تحلیل رگرسیونی بررسی شده در این تحقیق، میزان مصرف سوخت متناسب با مسافت طی شده، میزان محموله و نرخ مصرف سوخت در حالت پر و خالی بودن ظرفیت وسایل نقلیه در نظر گرفته شد. این محققین برای حل مسأله یک الگوریتم سلسله‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید [۱۶] را ارائه دادند. کو (۲۰۱۰) بدون ارائه مدل ریاضی برای مسأله، فاکتور سرعت وسایل نقلیه را نیز علاوه بر مسافت و میزان محموله در مسأله مسیریابی با بهینه‌سازی مصرف سوخت در نظر گرفت. در این مطالعه فرض شده بود که سرعت وسایل نقلیه وابسته به زمان سفر آنها می‌باشد. برای حل مسأله نیز از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده گردید. اردوان و میلر (۲۰۱۲) مسأله‌ای را مورد بررسی قرار دادند که در این مسأله امکان سوخت‌گیری مجدد وسایل نقلیه با توجه به ظرفیت محدود مخزن سوخت آنها در نظر گرفته شده بود. تابع هدف مدل ارائه شده توسط این محققین کمینه‌سازی مسافت طی شده بود و مدل به دنبال تعیین مسیر وسایل نقلیه با حذف ریسک اتمام سوخت آنها در طی سفر بود و در شبکه حمل و نقل نیز تعداد معین جایگاه سوخت‌گیری در نظر گرفته شده بود. در این مسأله وسایل نقلیه علاوه بر محدودیت مخزن سوخت دارای محدودیت حداکثر ظرفیت حمل کالا و حداکثر زمان سفر بود. در این تحقیق برای مسأله یک الگوریتم حل ابتکاری پیشنهاد شد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) از تابع هدف پیشنهادی ژیاو و همکاران (۲۰۱۲) بهره گرفته و با ضرب تابع هدف در پارامتری تحت عنوان نرخ تصاعد گاز کربن دی‌اکسید تابع هدف کمینه‌سازی آلودگی را ارائه دادند

و برای مسأله یک الگوریتم ترکیبی کلونی زنبورعسل مصنوعی را طراحی کردند. در زمینه کار تلفیقی در زمینه مسیریابی در لجستیک سبز و لجستیک معکوس؛ شیمیزو (۲۰۱۲) مسأله مسیریابی در لجستیک معکوس را با بررسی کمینه‌سازی آلودگی هوا (تصادف گاز کربن دی‌اکسید) با توجه به میزان محموله و مسافت طی شده وسایل نقلیه مورد مطالعه قرار داد. در این مقاله میزان تصاعد گاز کربن دی‌اکسید متناسب با میزان محموله و مسافت طی شده وسایل نقلیه بود که تابع هدف ارائه شده در این تحقیق از حاصل ضرب مسافت طی شده در میزان محموله وسایل نقلیه تشکیل شده بود. برای حل مسأله نیز یک الگوریتم ترکیبی صرفه‌جویی و جستجوی ممنوع اصلاح شده طراحی گردید.

مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر همانطور که پیش‌تر اشاره شد برای اولین بار توسط درور و ترودئو (۱۹۸۹ و ۱۹۹۰) معرفی گردید. این محققین برای این مسأله یک الگوریتم ابتکاری ارائه دادند. هو و هاگلند (۲۰۰۴) مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر با پنجره‌های زمانی را مطرح نموده و برای مسأله یک الگوریتم جستجوی ممنوع طراحی کردند. در این مسأله زمان سرویس‌دهی برای مشتریان توسط وسایل نقلیه در نظر گرفته نشده بود. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۷) مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر با ناوگان ناهمگن را مورد بررسی قرار دادند و برای مسأله یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد کردند. در مدل بررسی شده توسط این محققین هزینه ناوگان وابسته به استفاده از وسایل نقلیه و ظرفیت استفاده نشده از آنها بود. بلفیوره و یوشیزاکی (۲۰۰۹) در یک مطالعه موردی در برزیل که متشکل از یک دیو و ۵۱۹ مشتری در ۱۱ بخش بود، مسأله مسیریابی با تقسیم تقاضا با پنجره‌های زمانی و ناوگان ناهمگن را مطرح نموده و برای مسأله یک الگوریتم جستجوی پراکنده [۱۷] ارائه دادند. گولزینسکی و همکاران (۲۰۱۰) حالت خاصی از مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر را معرفی کردند که در آن باید حداقل کسری از تقاضای مشتری توسط یک وسیله نقلیه هنگام سرویس‌دهی برآورده گردد را مطرح نمودند و برای مسأله یک الگوریتم ابتکاری ارائه کردند. سالانی و واکا (۲۰۱۱) مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر گسسته و

پنجره‌های زمانی را مطرح کردند که در این مسأله تقاضای مشتریان از چندین قلم تشکیل شده که میزان تقسیم تقاضا متأثر از گسسته بودن تقاضای مشتریان است. این محققین برای حل مسأله یک الگوریتم شاخه و قیمت [۱۸] طراحی نمودند. تانگ و همکاران (۲۰۱۳) مسأله مسیریابی با تحویل تقسیم‌پذیر با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه کل بر اساس مسافت و وزن کل وسیله نقلیه (وزن وسیله نقلیه + میزان محموله)، مشابه تابع هدف ارائه شده توسط کارا و همکاران (۲۰۰۷) را مورد مطالعه قرار داده و برای مسأله یک الگوریتم سیستم مورچگان پیشینه - کمینه [۱۹] را پیشنهاد دادند.

در زمینه مطالعات داخلی صورت گرفته نیز باید گفت که فرقانی و جعفری (۱۳۹۱) مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با تحویل تقسیم‌پذیر با ناوگان ناهمگن و امکان عدم دسترسی مشتریان به برخی از وسایل نقلیه را مورد بررسی قرار دادند و برای مسأله یک الگوریتم سیستم کلونی مورچگان دومرحله‌ای پیشنهاد دادند. نوروزی و همکاران (۱۳۹۲) مسأله مسیریابی با کاهش مصرف سوخت را مورد مطالعه دادند به طوری که مدل ارائه شده در این تحقیق به صورت دوهدفه بوده که تابع هدف اول کمینه‌سازی مصرف سوخت و تابع هدف دوم کمینه‌سازی تعداد وسایل نقلیه است. این محققین در تابع هدف بهینه‌سازی مصرف سوخت از عوامل مسافت و میزان محموله استفاده کردند و برای حل مسأله از الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات [۲۰] استفاده کردند. مسأله مسیریابی نقش بسیار مهمی را در سیستم‌های لجستیکی در سطح عملیاتی ایفا می‌کند و بررسی این مسأله به منظور تعیین استراتژی‌های بهینه برای کاهش هزینه‌های عملیاتی امری ضروری است. همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد تحقیقات بسیاری در زمینه لجستیک معکوس صورت گرفته است ولی تعداد معدودی از آنها در مورد مسیریابی در لجستیک معکوس بوده است. از سوی دیگر بخش مهمی از مطالعات در زمینه مسیریابی در لجستیک معکوس در قالب مطالعات موردی بوده است. بنابراین با توجه به ادبیات موضوع ما به بررسی مسأله مسیریابی جمع‌آوری کالاها با در نظر گرفتن اینکه تقاضای مشتریان تقسیم‌پذیر بوده و بهینه‌سازی مصرف سوخت مورد

بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به اینکه تقاضای مشتریان در لجستیک معکوس می‌تواند از ظرفیت وسایل نقلیه بیشتر باشد و به طور کلی تقاضای مشتریان با توجه به کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل قابلیت تقسیم می‌تواند داشته باشد، ما این موضوع را در این مقاله مورد بررسی قرار می‌دهیم. مطرح نمودن بهینه‌سازی مصرف سوخت نیز به این دلیل است که هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل بخصوص هزینه‌های مصرف سوخت فقط تابعی از مسافت نمی‌باشند و مسیریابی بر اساس کمینه نمودن مسافت لزوماً هزینه‌های مصرف سوخت را کمینه نمی‌کند. با توجه به اینکه موضوع بهینه‌سازی مصرف سوخت و جمع‌آوری کالا از مشتریان با مجاز بودن تقسیم تقاضای مشتریان به‌طور تلفیقی مورد مطالعه قرار نگرفته است و از طرفی به دلیل اینکه در لجستیک معکوس تأکید بیشتری بر کاهش هزینه‌های عملیاتی وجود دارد ما مدلی را در این مقاله ارائه می‌دهیم که در امر کاهش تعداد وسایل نقلیه و به تبع آن هزینه‌های ثابت به کارگیری آنها و نیز در زمینه بهینه‌سازی مصرف سوخت و هزینه‌های مرتبط با آن کارا است.

در ادامه؛ بخش دوم به ارائه مدل اختصاص یافته است. در بخش سوم نیز تعدادی مثال نمونه حل شده ارائه می‌گردد. در نهایت در بخش چهارم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیق ارائه می‌شود.

## ۱. مدل مسأله تحقیق

در این بخش به ارائه مفروضات مدل و فرمول‌بندی مدل می‌پردازیم.

### ۱-۱. مفروضات مدل

- مفروضات کلی که در این تحقیق لحاظ می‌گردد عبارتند از:
- مکان و تعداد مشتریان (مراکزی که از آنها کالا جمع‌آوری می‌شود) معلوم و مشخص است.
  - مساله به صورت تک‌دپویی است.
  - میزان عرضه کالا از مشتریان قطعی است.
  - شبکه راه‌ها متقارن است و مسافت بین گره‌های شبکه

- (دیو و مشتریان) از نامساوی مثلثی تبعیت می‌کند.
- ناوگان وسایل نقلیه، همگن می‌باشند و مسیریابی با حداقل تعداد وسایل نقلیه صورت می‌گیرد.
- هر وسیله نقلیه حرکت خود را از دیو شروع کرده و پس از سرویس‌دهی به مشتریان دوباره به دیو باز می‌گردد.
- وسایل نقلیه دارای محدودیت حداکثر ظرفیت حمل کالا می‌باشند.
- مصرف سوخت وسایل نقلیه متناسب با مسافت طی‌شده، میزان محموله و نرخ مصرف سوخت در حالت پر و خالی بودن ظرفیت وسایل نقلیه است.
- جمع‌آوری کالاها از مشتریان می‌تواند توسط بیش از یک وسیله نقلیه انجام شود.

## ۲-۱. فرمول‌بندی مدل

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

### ۱-۲-۱. مجموعه اندیس‌ها

اندیس‌های مدل عبارتند از:

- i: اندیس مربوط به دیو و مشتریان در ابتدای یک یال  
 $(i = 0, 1, 2, \dots, n)$   
 j: اندیس مربوط به دیو و مشتریان در انتهای یک یال  
 $(j = 0, 1, 2, \dots, n)$   
 k: اندیس مربوط به وسایل نقلیه  $(k = 1, 2, \dots, K)$

### ۱-۲-۲. پارامترهای مدل

پارامترهای مدل عبارتند از:

- $d_{ij}$ : مسافت بین گره i و j به طوری که:  $d_{ij} = d_{ji}$   
 $P_i$ : میزان تقاضا برای جمع‌آوری کالا از مشتری i  
 Q: حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه  
 M: یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ  
 $P_0$ : نرخ مصرف سوخت وسایل نقلیه در حالت خالی بودن ظرفیت (لیتر بر کیلومتر)

$$\sum_{j=0}^n L_{ij}^k - \sum_{j=0}^n L_{ji}^k = P_i \cdot Y_i^k \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j) \\ L_{ij}^k \leq Q \cdot X_{ij}^k \quad i, j = 0, 1, \dots, n; \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j) \\ L_{0j}^k = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

$$X_{ij}^k = 0 \text{ or } 1; L_{ij}^k \geq 0; Y_i^k \geq 0 \quad (11)$$

رابطه (۱) بیانگر تابع هدف مسأله است که کمینه‌سازی هزینه کل مصرف سوخت وسایل نقلیه می‌باشد که توسط ژئائو و همکاران (۲۰۱۲) به صورت تابعی از مسافت طی شده، میزان محموله وسایل نقلیه و نرخ مصرف سوخت در حالت پر و خالی بودن ظرفیت وسایل نقلیه ارائه شده است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه هر مشتری را حداکثر یکبار ملاقات می‌کند. محدودیت‌های (۳) و (۴) بیانگر این می‌باشند که هر وسیله نقلیه حرکت خود را از دپو شروع کرده و دوباره به دپو باز می‌گردد و در ضمن هر وسیله نقلیه از گره‌ای خارج می‌شود که قبلاً به آن وارد شده است. محدودیت (۵) بیانگر این می‌باشد که کل تقاضای مشتریان برای جمع‌آوری کالا از آنها باید برآورده شود. محدودیت‌های (۶) و (۷) تضمین می‌کنند که تقاضای مشتریان برای جمع‌آوری کالا در صورتی تکمیل می‌گردد که حداقل یک وسیله نقلیه از آن عبور نماید. محدودیت (۸) نشانگر جریان افزایشی محموله وسایل نقلیه از شروع حرکت از دپو و بازگشت دوباره به دپو است. محدودیت (۹) بیانگر این مورد می‌باشد که میزان محموله وسایل نقلیه در هر مسیر یا کمان از ظرفیت آن وسیله نباید تجاوز کند و در ضمن محدودیت‌های (۸) و (۹) مانع ایجاد زیرتور نیز می‌گردد. محدودیت (۱۰) بیانگر این می‌باشد که میزان محموله وسایل نقلیه در لحظه شروع حرکت از دپو برابر صفر می‌باشد و محدودیت (۱۱) بیانگر نوع متغیرهای تصمیم است.

در مدل مسأله تعداد وسایل نقلیه را از رابطه  $K = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{Q} \right\rceil$  به دست می‌آوریم و در رابطه (۷) می‌توان به جای M از  $P_i$  استفاده کرد.

$\rho^*$ : نرخ مصرف سوخت وسایل نقلیه در حالت پر بودن ظرفیت (لیتر بر کیلومتر)

$C_f$ : هزینه واحد سوخت مورد مصرف وسایل نقلیه

### ۳-۲-۱. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مدل عبارتند از:

$X_{ij}^k$ : اگر گره  $i$  به گره  $j$  توسط وسیله نقلیه  $k$  پیموده شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

$Y_i^k$ : کسری از عرضه کالای مشتری  $i$  که توسط وسیله نقلیه  $k$  جمع‌آوری می‌شود.

$L_{ij}^k$ : میزان محموله وسیله نقلیه  $k$  در مسیر حرکت از  $i$  به  $j$ .

### ۴-۲-۱. مدل ریاضی

فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته مسأله به شرح زیر می‌باشد:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, (i \neq j)}^n \sum_{k=1}^K C_f \cdot d_{ij} \quad (1)$$

$$\left( \rho_0 \cdot X_{ij}^k + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} L_{ij}^k \right)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ij}^k \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0j}^k = 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ij}^k - \sum_{j=0}^n X_{ji}^k = 0 \quad i = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_i^k = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ji}^k \geq Y_i^k \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ji}^k \leq M \cdot Y_i^k \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, K; (i \neq j)$$

## ۲. مسائل نمونه حل شده

هزینه‌های مرتبط با سوخت شده است. (میزان کاهش مصرف سوخت از رابطه  $\frac{C1-C2}{C1} \times 100$  و میزان افزایش مسافت از رابطه  $\frac{D2-D1}{D1} \times 100$  به دست آمده است). از سوی دیگر چون مسیریابی در لجستیک معکوس بر خلاف مسیریابی در سایر حوزه‌ها نظیر مسیریابی کالاهای فاسدشدنی [۲۱] دارای اضطراب نیست بنابراین افزایش مسافت و به تبع آن افزایش ناچیز زمان سفر در برابر کاهش هزینه‌های مصرف سوخت دارای اهمیت چندانی نبوده و مسیرها باید بر اساس کمینه نمودن مصرف سوخت تعیین گردند و به طور کلی می‌توان گفت مسیریابی بر اساس کمینه نمودن مسافت که در ادبیات موضوع متداول است، در واقع زیربهمین [۲۲] است زیرا در بحث کمینه‌سازی مصرف سوخت فقط عامل مسافت را به عنوان عامل اصلی در نظر می‌گیرد.

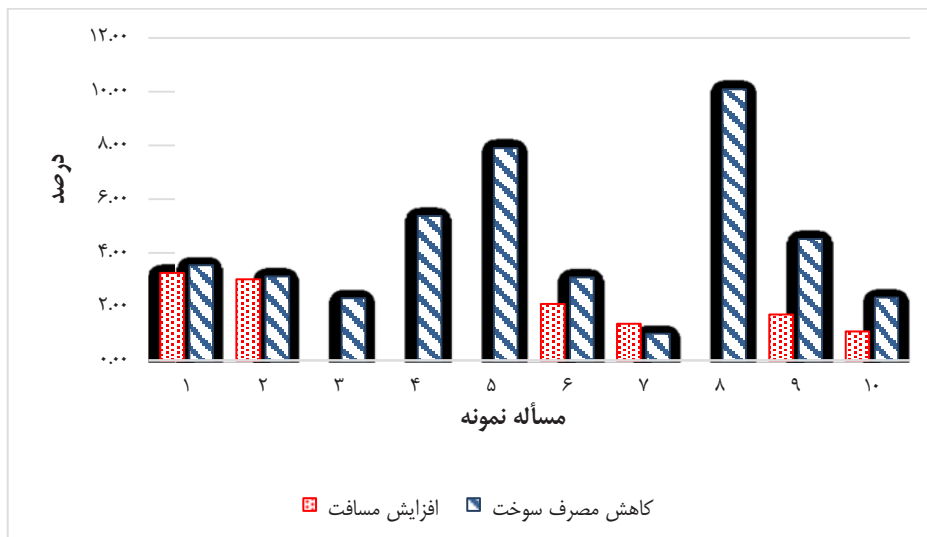
در این قسمت تعدادی مسأله در ابعاد کوچک به طور تصادفی تولید شده است. مدل پیشنهادی در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS نسخه ۲۴،۱،۳ کد گردیده و سپس مسائل نمونه توسط حل‌کننده CPLEX توسط رایانه‌ای با پردازنده core i5 2.6 GHz و حافظه داخلی 6GB حل شده و نتایج مطابق جدول (۱) به دست آمده است. در همه مثال‌های تولید شده  $Q = 100$ ،  $\rho_0 = 1$ ،  $\rho^* = 2$  و  $C_f = 1$  در نظر گرفته شده‌اند. (منظور از مدل پایه در جدول (۱) مدل مسأله تحقیق با تابع هدف کمینه‌سازی مسافت می‌باشد).

همانطور که از جدول و شکل (۱) معلوم است به‌طور کلی مدل بهینه‌سازی مصرف سوخت بدون تأثیر نامطلوب چشم‌گیری به روی افزایش مسافت، موجب بهبود مصرف سوخت و

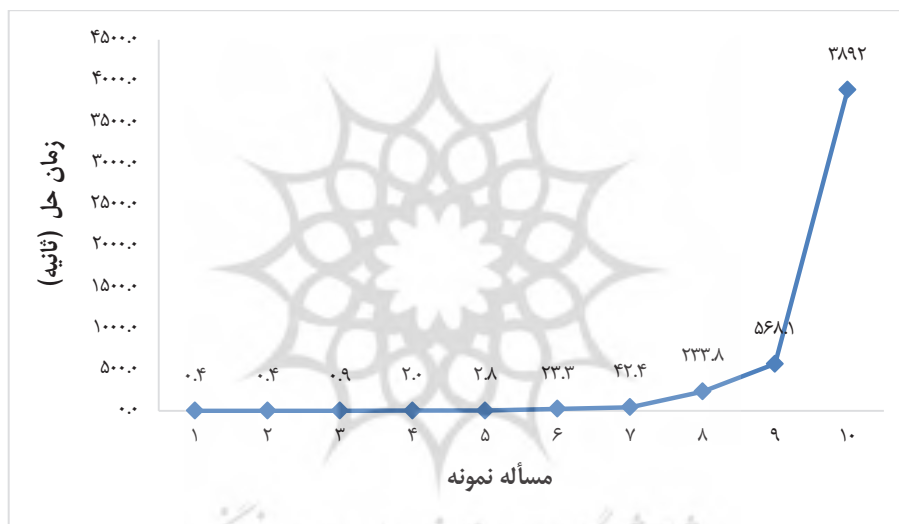
جدول ۱- نتایج محاسباتی مسائل نمونه

مسأله نمونه	تعداد مشتریان	تعداد وسایل نقلیه	مسافت طی شده در مدل پایه (D1)	مصرف سوخت در مدل پایه (C1)	مسافت طی شده در مدل مصرف سوخت (D2)	مصرف سوخت در مدل مصرف سوخت (C2)	کاهش مصرف سوخت (درصد)	افزایش مسافت (درصد)	زمان حل (ثانیه)
۱	۵	۲	۱۸۴	۲۷۰/۶	۱۹۰	۲۶۱	۳/۵۵	۳/۲۶	۰/۴
۲	۶	۲	۱۹۸	۲۹۴/۳۷	۲۰۴	۲۸۵/۱۵	۳/۱۳	۰/۰۳	۰/۴
۳	۷	۲	۲۲۴	۳۲۶/۸۰	۲۲۴	۳۱۹/۲۰	۲/۳۳	۰/۰۰	۰/۹
۴	۸	۳	۲۵۴	۳۷۱/۸۰	۲۵۴	۳۵۱/۸۰	۵/۳۸	۰/۰۰	۲/۰
۵	۹	۳	۲۷۲	۴۱۴/۷۵	۲۷۲	۳۸۱/۹۵	۷/۹۱	۰/۰۰	۲/۸
۶	۱۰	۳	۲۸۴	۴۲۵/۵	۲۹۰	۴۱۲/۳۰	۳/۱۰	۲/۱۱	۲۳/۳
۷	۱۱	۳	۲۹۲	۴۳۵/۷۰	۲۹۶	۴۳۱/۳۰	۱/۰۱	۱/۲۷	۴۲/۴
۸	۱۲	۴	۳۳۲	۵۲۴/۴۷	۳۳۲	۴۷۱/۵۳	۱۰/۰۹	۰/۰۰	۲۳۳/۸
۹	۱۳	۴	۳۵۰	۵۲۸/۸۵	۳۵۶	۵۰۴/۸۹	۴/۵۳	۱/۷۱	۵۶۸/۱
۱۰	۱۴	۴	۳۶۶	۵۲۹/۵۱	۳۷۰	۵۱۷/۰۷	۲/۳۵	۱/۰۹	۳۸۹۲/۰
میانگین	-	-	۲۷۵/۶۰	۴۱۲/۲۴	۲۷۸/۸۰	۳۹۳/۶۲	۴/۳۴	۱/۲۶	-

نکته دیگر اینکه همانطور که از ستون آخر جدول (۱) و شکل (۲) مشهود است با افزایش ابعاد مسأله، زمان حل مسأله به‌طور نمایی افزایش پیدا می‌کند که این موضوع با توجه به NP-hard بودن مسأله مسیریابی وسایل نقلیه امری بدیهی است. (منظور از زمان حل مسأله در جدول، زمان حل مسأله با تابع هدف بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌باشد).



شکل ۱- تأثیر تابع هدف مصرف سوخت بر مدل پایه



شکل ۲- افزایش زمان حل مسئله با افزایش ابعاد مسئله

فقط عامل مسافت را در میزان مصرف سوخت وسایل نقلیه در نظر می‌گیرد لزوماً میزان مصرف سوخت مصرفی وسایل نقلیه را کمینه نمی‌کند و به نوعی از این جهت زیربهبین است. بنابراین میزان محموله وسایل نقلیه و نرخ مصرف سوخت وسایل نقلیه که عوامل بسیار مهم دیگری در امر بهینه‌سازی مصرف سوخت هستند در مدل مسئله در نظر گرفته شد که طبق نتایج ارائه‌شده عملکرد مدل بهینه‌سازی مصرف سوخت قابل قبول بوده به طوری که متوسط کاهش مصرف سوخت بیشتر از متوسط افزایش مسافت طی شده وسایل نقلیه است. از سوی دیگر

## جمع‌بندی و ملاحظات

ما در این مقاله مسئله مسیریابی در لجستیک معکوس را با فرض مجاز بودن تقسیم تقاضای مشتریان و بهینه‌سازی مصرف سوخت به عنوان هدف مسئله مورد مطالعه قرار دادیم. در این راستا با در نظر گرفتن مفروضات و شرایط مسئله تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی 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 می‌باشد که مسیریابی با کمینه‌سازی مسافت با توجه به اینکه



نوروزی، نرگس، رزمی، جعفر و صادق عمل نیک، محسن. «مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با هدف کاهش سوخت مصرفی و تعداد وسائط نقلیه توسط الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی انبوه ذرات». نشریه تخصصی مهندسی صنایع، شماره ۱، صص ۱۱۲-۱۰۵، ۱۳۹۲.

Belfiore, P. and Yoshizaki, H.T.Y. "Scatter Search for a Real-Life Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem With Time Windows and Split Deliveries in Brazil," *European Journal of Operational Research*, vol. 199, pp. 750-758, 2009.

Beltrami, E. J. and Bodin, L. D. "Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection," *Networks*, vol. 4, pp. 65-94, 1974.

Dantzig G.B. and Ramser J.M. "The Truck Dispatching Problem," *Management Science*, vol. 6, pp. 81-91, 1959.

Dror, M. and Trudeau, P. "Savings by Split Delivery Routing," *Transportation Science*, vol. 23, pp. 141-145, 1989.

Dror, M. and Trudeau, P. "Split Delivery Routing," *Naval Research Logistics*, vol. 37, pp. 383-402, 1990.

Erdogan, S. and Miller-Hooks, E. "A Green Vehicle Routing Problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, pp. 100-114, 2012.

Farahani, R.Z., Rezapour, S. and Kardar, L. *Logistics Operations and Management*, 1st ed. Elsevier, pp. 247-266, 2011.

Gulczynski, D., Golden, B. and Wasil, E. "The Split Delivery Vehicle Routing Problem with Minimum Delivery Amounts," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, pp. 612-626, 2010.

Ho, S. C. and Haugland, D. "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem With Time Windows and Split Deliveries," *Computer & Operations Research*, vol. 31, pp. 1947-1964, 2004.

Kara, I., Kara, B. and Yetis, M. "Energy Minimizing Vehicle Routing Problem," *Lecture notes in Computer Science*. Vol. 4616, pp. 62-71, 2007.

مشاهده شد که با افزایش ابعاد مسأله زمان حل مسأله به‌طور نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین مطالعات آتی در حوزه مسأله مورد تحقیق این مقاله شامل دو حوزه می‌تواند باشد. اول بررسی عوامل دیگر تأثیرگذار در مصرف سوخت و اضافه نمودن آنها به مدل مسأله و دوم طراحی و توسعه یک الگوریتم ابتکاری یا فرا ابتکاری برای حل مسأله در زمان قابل قبول.

## پی‌نوشت

1. Vehicle Routing Problem (VRP).
2. Split-Delivery Vehicle Routing Problem (SDVRP).
3. Capacitated.
4. Green Vehicle Routing Problem (GVRP).
5. Reverse Logistics (RL).
۶. لین و همکاران، ۲۰۱۴.
7. Disposal.
۸. فراهانی و همکاران، ۲۰۱۱.
9. Wastes.
10. End - Of - Life (EOL).
11. Site - Dependent.
12. Location - Routing.
13. Savings - based Heuristic Algorithm.
14. Tabu Search.
15. Set Partitioning.
16. String - Model - Based Simulated Annealing.
17. Scatter Search.
18. Branch and Price.
19. Max - Min Ant System.
20. Improved Particle Swarm Optimization.
21. Perishable.
22. Suboptimal.

## منابع

فرقانی، محسن و جعفری، عزیزاله. «یک الگوریتم فراابتکاری جدید برای مسیریابی با ناوگان وسایل حمل‌ونقل همراه با تقسیم تقاضا و محدودیت دسترسی به وسایل نقلیه». فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۶۶، صص ۴۸-۲۱، ۱۳۹۱.

- Salani, M. and Vacca, I., "Branch and Price for the Vehicle Routing Problem with Discrete Split Deliveries and Time Windows," *European Journal of Operational Research*, vol. 213, pp. 470-477, 2011.
- Schultmann, F., Zumkeller, M. and 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.
- Sculli, D., Mok, K. C. and Cheung, S. H. "Scheduling Vehicles for Refuse Collection," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 38, pp. 233-239, 1987.
- Shimizu, Y. "Generalized Vehicle Routing Problem for Reverse Logistics Aiming at Low Carbon Transportation," *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, 2012.
- Tang J., Ma. Y, Guan J. and Yan Ch. "A Max-Min ant System for the Split Delivery Weighted Vehicle Routing Problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, pp. 7468-7477, 2013.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., Kah, M. and Rabbani, M. "A New Capacitated Vehicle Routing Problem with Split Service for Minimizing Fleet Cost by Simulated Annealing," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 344, pp. 406-425, 2007.
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y. "Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem," *Computers & Operations Research*, vol. 39, pp.1419-1431, 2012.
- Zhang, S.Z., Lee, C.K.M., Choy, K.L., Ho, W. and Ip, W.H. "Design and Development of a Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for the Environmental Vehicle Routing Problem," *Transportation Research Part D*. vol. 31, pp. 85-99, 2014.
- Kim, H., Yang, J. and 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.
- Kim, H., Yang, J. and 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.
- Kuo, Y. "Using Simulated Annealing to Minimize Fuel Consumption for the Time-dependent Vehicle Routing Problem," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, pp. 157-165, 2010.
- Le Blanc, I., van Krieken, M., Krikke, H. and Fleuren, H. "Vehicle Routing Concepts in the Closed-loop Container Network of ARN – A Case Study," *OR Spectrum*, vol. 28, pp.53-71, 2006.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H. and Lam, H. Y. "Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and Future Trends," *Expert System Applications*.vol 41, pp. 1118-1138, 2014.
- Mansini, R. and Speranza, M. G., "A Linear Programming Model for the Separate Refuse Collection Service," *Computers & Operations Research*, vol. 25, pp. 659-673, 1998.
- Mar-Ortiz, J., Adenso-Diaz, B. and 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.
- Ramos, T. and 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.