ارائه یک مدل یکپارچه و روش حل برای زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسائل نقلیه در یک زنجیره‌تأمین دوسطحی با هدف کاهش مصرف سوخت

سیده بتول فتحی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

فرزاد دهقانیان (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

Email: f.dehghanian@um.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و به دنبال آن افزایش مصرف سوخت در صنایع تولیدی و سیستم‌های حمل‌ونقل، جهان امروز با دو چالش کمبود سوخت و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت مواجه است. از این‌رو اتخاذ راهکارهایی که می‌تواند مصرف سوخت را در این سازمان‌ها کاهش دهد؛ غیر قابل اجتناب است در این مقاله یک مدل ریاضی جدید برای ترکیب دو مسئله زمان‌بندی و مسیریابی در یک زنجیره تأمین دو سطحی ارائه شده است. وسائل نقلیه در سیستم توزیع این زنجیره تأمین به صورت چند سفری مدل‌سازی شده‌اند؛ به عبارتی دیگر هر وسیله نقلیه در یک دوره برنامه‌ریزی می‌تواند چندین بار مورد استفاده قرار بگیرد، مدل ارائه شده اثر سرعت و بار و مشخصات فنی وسیله نقلیه بر میزان مصرف سوخت را نیز در نظر می‌گیرد. هدف مسئله، تعیین توالی بهینه تولید، مسیریابی و تعیین سرعت انتقال در هر مسیر توزیع توسط وسائل نقلیه به منظور کمینه کردن هزینه‌های مصرف سوخت و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد می‌باشد. در پایان با توجه به نمونه مسائل طراحی شده برای این مدل، با مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل دقیق و ابتکاری مدل به ارزیابی کارایی این الگوریتم ابتکاری پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد توالی تولید، نحوه توزیع سفارش مشتریان و سرعت وسیله نقلیه می‌تواند تاثیر زیادی در میزان مصرف سوخت داشته باشد. در انتها نتایج حاصل از تحلیل مثالهای عددی و بینش‌های مدیریتی آمده است.

واژه های کلیدی: مسیریابی چند سفری، انتشار آلاینده ، مصرف سوخت، هزینه‌های دیرکرد و زودکرد؛

۱. مقدمه

با ظهور پدیده‌هایی همچون JIT[1] و و یکپارچه‌سازی در زنجیره تأمین، زمان‌بندی زنجیره‌تأمین طی دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران و مدیران بخش تولید بوده است. تحقیقات انجام شده به‌خوبی نشان می‌دهد که گرفتن تصمیمات یکپارچه در یک زنجیره‌تأمین و مدیریت صحیح آن می‌تواند منافع همه اعضای یک زنجیره‌تأمین (تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان) را فراهم نماید[Zegordi and Beheshtinia, 2009]. از طرفی با توجه به افزایش جمعیت جهانی، سطح تولید و افزایش انتشار گازهای سمی، تمامی مشتریان در سراسر جهان علاوه بر کیفیت کالا و تحویل به موقع سفارش خود، به محصولاتی که آلودگی کمتری را به محیط‌زیست اضافه کنند؛ علاقه بیشتری نشان می‌دهند. در واقع با افزایش روزافزون آلودگی در سطح شهرها، این ویژگی برای یک محصول به‌عنوان یک عامل رقابتی در تولید تبدیل خواهد شد. کم کردن هزینه‌های سوخت مصرفی در یک سازمان، علاوه بر کاهش هزینه‌های آن سازمان، به کاهش انتشار آلاینده‌ها و گازهای سمی کمک خواهد کرد.

این پژوهش به بررسی زمان‌بندی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به انتشار آلاینده‌ها می‌پردازد. هدف مسئله، تعیین توالی بهینه در تولید و توزیع سفارش مشتریان به منظور کمینه کردن هزینه‌های زنجیره‌تأمین، شامل هزینه‌های حمل‌ونقل ناشی از مصرف سوخت و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد است. در نظر گرفتن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد موجب می‌شود مدل علاوه بر کاهش هزینه‌های مصرف سوخت، به طور همزمان رضایت مشتریان را نیز افزایش دهد.

۲. پیشینه تحقیق

برای انجام این پژوهش ادبیات مرتبط با زنجیره‌تأمین از سه منظر ۱) سطوح مورد بررسی زنجیره‌تأمین، ۲) سیستم توزیع و ۳) سازگاری با محیط زیست مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مطالعات حاضر را از نظر سطح زنجیره‌تأمین می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول مقاله‌هایی که به بررسی دو سطح تولید و توزیع در زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند که اکثریت تحقیقات موجود در این دسته جای می‌گیرد. [Tavakoli moghadam, yazdani and Molaalizade, 2012], [Marufuzzaman, Eksioglu and Hernandez, 2014]

دسته دوم که هر سه سطح تأمین، تولید و توزیع را بررسی نموده‌اند. برای مثال می‌توان پژوهشی را که توسط جمیلی ورنجبر انجام شده ذکر کرد. آنها در این پژوهش به بررسی مسئله زمان‌بندی تأمین، تولید و توزیع در یک زنجیره‌تأمین پرداخته و مسئله را به صورت دو هدفه مدل‌سازی کردند و سپس با ارائه دو روش ابتکاری برای حل مسئله چند هدفه به حل آن پرداختند [Jamili and Ranjbar 2016].

بهشتی‌نیا، فیض و سدادی در مقاله خود یک زنجیره‌تأمین با یک سازنده و تعدادی تأمین‌کننده را فرض نموده‌اند که یا یک ناوگان حمل‌ونقل مشترک سفارش‌های سازنده را برای تولید، تأمین می‌کنند. آنها برای مدل فرضی خود یک مدل ریاضی نوشته و به کمک الگوریتم کلونی زنبور عسل نتایج خود را تحلیل نموده‌اند [Beheshtinia, Faiz and Sadadi, 2018].

از نقطه‌نظر توزیع نیز می‌توان تحقیقات موجود را به دو دسته تقسیم نمود؛ دسته اول شامل مقالاتی است که سیستم توزیع در آن‌ها ساده فرض شده است. به‌عبارت‌دیگر در این مدل‌ها یک مرکز توزیع یا انبار مرکزی در نظر گرفته شده است و کالای نهایی با وسیله نقلیه به این مراکز ارسال می‌شود و از این مراکز به دست مصرف‌کننده می‌رسد [Cheng and Kahlbacher, 1993], [Cakici, et al. 2012].

در دسته دوم این تقسیم‌بندی، سیستم توزیع معادل یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه[2] است و یک وسیله نقلیه با ظرفیت معلوم به خدمت‌دهی به مشتریان می‌پردازد.اولریچ در مقاله خود

تولیدکننده‌ای با سیستم تولید ماشین‌های موازی[3] فرض کرده است که با تعداد محدودی وسیله نقلیه موجود محصولات تولیدی را به مشتریان تحویل می‌دهند. در این مقاله ابتدا یک مدل عدد صحیح مختلط برای مسئله زمان‌بندی تولید با هدف حداقل کردن مجموع تأخیرها بیان‌شده است و سپس یک مدل برای سیستم توزیع با عنوان مدل مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی[4] بیان‌شده است. تابع هدف این مدل نیز کم کردن مجموع تأخیرها است. سپس دو مدل را ادغام کرده و با یک روش ابتکاری به حل آن می‌پردازد. در این مسئله تعداد وسائل نقلیه مورد استفاده با توجه به ظرفیت حمل آن به اندازه‌ای است که بتواند تمام تقاضای مشتریان را تحویل دهد[Ullrich, 2013].

وراک‌تارکیز و چن به بررسی یک مسئله دو مرحله‌ای زنجیره‌تأمین با تولیدکننده‌ای دارای چندین مشتری و تعداد محدودی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار پرداخته‌اند. هدف کم کردن مجموع وزن‌دار زمان‌های تحویل[5] و هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع است. برای حل از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان برای حداقل سازی مجموع وزن‌دار زمان‌های تحویل سفارش‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع استفاده شده است . [Vairaktarakis and Chen, 2014]

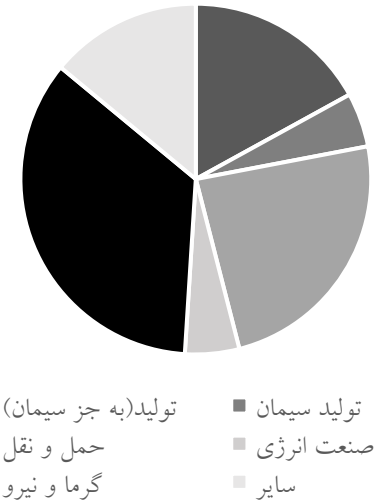
اهمیت مسئله محیط زیست باعث می‌شود پژهشگران و مدیران بخش‌های تولیدی به دنبال راه حل‌هایی برای کم کردن انتشار آلاینده‌ها در محیط باشند. در این میان، پژوهشگران در عرصه طراحی سیستم‌های زنجیره‌تأمین نیز دست به تحقیقاتی در این زمینه زده‌اند. در سیستم‌های زنجیره‌تأمین وجود سیستم‌های تولید و توزیع از عوامل مهم برای ایجاد آلودگی محیط زیست به شمار می‌آیند. شکل (۱) سهم تولید دی‌اکسیدکربن جهانی را در سال ۲۰۱۱ نشان می‌دهد [With and Labatt, 2011] . باتوجه به این شکل، ایجاد راه‌کارهایی در سیستم حمل‌ونقل سازمان‌های گوناگون، برای کم کردن مصرف سوخت و به تبع آن کاهش انتشار آلاینده‌ها، می‌تواند اثر بسزایی در کاهش آلودگی محیط زیست داشته باشد.

پالمر به ارائه مدلی یکپارچه در مسیریابی و انتشار آلاینده‌ها برای وسائل نقلیه پرداخته است. وی به نقش سرعت در انتشار کربن با سناریوهای متفاوتی مانند ترافیک و پنجره زمانی پرداخته و موفق به صرفه‌جویی ۵ درصد در انتشار کربن شده است [Palmer, 2007].

نوروزی، رزمی و نیک‌عمل به ارائه مدل جدیدی از مسئله مسیریابی وسائط نقلیه به منظور کاهش سوخت مصرفی و اندازه ناوگان می‌پردازند. آنها عنوان کردند که مدیران شرکت‌های توزیع و صاحبان وسائط نقلیه، به دو دلیل مهم علاقه‌مند هستند سوخت مصرفی در توزیع کالاها را به حداقل برسانند. اول، کاهش در سوخت مصرفی به کاهش هزینه‌های سرویس‌دهی و در نتیجه رضایت مشتریان می‌انجامد و دوم، کاهش در مصرف سوخت به کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای وکاهش آلودگی هوا منجر می‌شود. همچنین استفاده از حداقل ناوگان برای سرویس‌دهی به مشتریان به منظور کاهش هزینه‌های ثابت و دیگر هزینه‌های مرتبط با وسائط نقلیه در این مقاله مدنظر قرار گرفته است. سپس برای حل مسائل در ابعاد بزرگ از روش فرا ابتکاری بهبودیافته‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است [Norouzi, Razmi and Amalnik, 2012].

دمیر،بکتاش و لاپرته با الهام گرفتن از تعریف مدلی که توسط بارس و همکارانش معرفی شده [Barth, Younglove and Scora, 2005]و برای در نظر گرفتن انتشار و مصرف سوخت در یک مسئله مسیریابی آلودگی (*PRP*) [6] استفاده کرده بودند؛ به ارائه رابطه‌ای برای مصرف سوخت با سرعت و ظرفیت وسیله نقلیه، حین حرکت بر روی یک یال از مسیر پرداخته و مدل ریاضی مربوطه را با هدف کم کردن هزینه‌های حمل‌ونقل ارائه دادند. برای حل مدل از روش ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر

استفاده شده است[Demir, Bectas and Laporte, 2012].
پژوهش حاضر سعی دارد علاوه بر کاهش هزینه‌های دیرکرد و زودکرد، با در نظر گرفتن سرعت و بار وسیله نقلیه در سیستم توزیع میزان مصرف سوخت را نیز کاهش دهد.



شکل ۱. نمودار تولید جهانی دی‌اکسیدکربن

تارکن‌استین در پژوهش خود از مدل جامع انتشار برای محاسبه مصرف سوخت استفاده کرده است. او در پژوهش خود اثر سرعت و بار وسیله نقلیه بر روی میزان مصرف سوخت را اندازه‌گیری کرده است. نتایج محاسبات عددی این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از سرعت متغیر در این مدل کارایی بیشتری نسبت به سرعت ثابت دارد و توصیه می‌کند در محاسبات مصرف سوخت، سرعت ثابت نمی‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد[Turkensteen, 2017].

در پژوهش حاضر مدل جامع انتشار برای محاسبه میزان سوخت مصرفی در شرایطی که وسیله نقلیه می‌تواند سطوح سرعت متفاوتی را اختیار نماید توسعه داده شده است.

علینقیان و نادری‌پور در مقاله خود به طور جامع به بررسی عوامل موثر بر مصرف سوخت در مسائل مسیریابی همچون همچون بارو سرعت وسیله نقلیه، مسافت طی شده، شیب جاده و ترافیک شهری پرداخته است. آنها برای بهینه سازی مصرف سوخت مدل ریاضی طراحی نموده و به کمک الگوریتم ابتکاری کرم شب‌تاب موفق به صرفه جویی ۱۵ درصدی در مصرف سوخت در نمونه موردی شهر اصفهان شده اند. آنها در مدل خود از مسئله مسیریابی کلاسیک استفاده نموده اند [Alinaghian, Naderipour, (2016)].

در تمامی مقاله های موجود در زمینه‌ی زمان‌بندی زنجیره‌تأمین تعداد وسائل نقلیه طوری در نظر گرفته شده است که می‌تواند تمام تقاضای مشتریان را تحویل دهد. در حالی که در دنیای واقعی هر سازمان به تعداد محدودی وسیله نقلیه در اختیار دارد. در نتیجه برای تأمین تقاضای مشتریان هر وسیله ناچار است چندین بار مورد استفاده قرار بگیرد. در مسائل کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه، هر وسیله فقط یک بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. دراین پژوهش، برای اینکه مدل به مسائل دنیای واقعی نزدیک تر باشد، مسیریابی چندی سفری مورد بررسی قرار گرفته است.

در مسئله مسیریابی چند سفری، به دلیل محدود بودن تعداد وسائل نقلیه با توجه به ظرفیت‌شان نسبت به میزان تقاضای مشتریان؛ هر وسیله نقلیه ناچار است در یک دوره زمان چند بار مورد استفاده قرارگیرد. به عبارت دیگر هر وسیله نقلیه چند مسیر ایجاد می‌کند. این نوع مسئله علی‌رغم اینکه در عمل خیلی کاربرد دارد، در ادبیات موضوع کمتر مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. در مدل‌هایی از توزیع، که وسیله نقلیه سفرهای کوتاهی ایجاد می‌کند؛ برای نمونه می‌توان سیستم‌های توزیع غذا در کترینگ‌ها و رستوران‌ها را مثال زد؛ استفاده از مدل مسیریابی چند سفری کارا به نظر می‌رسد. امروزه با توجه به افزایش خریدهای اینترنتی و تجارت الکترونیک[۸] اهمیت استفاده از مدل‌های مسیریابی چند سفری در مدل‌سازی مورد توجه قرار خواهد گرفت. این مسئله اولین بار توسط فلیچمن مطرح گردید[Fleischmann,1990] .

وانـگ ، لیـانـگ و هو به ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مدل مسـیریابی چند سـفری در حالت در نظر گرفتن پنجره زمانی پرداختند[Wang, Liang and Hu, 2014].

چیک و همکاران یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله مسیریابی چنـد سـفری ارائـه دادنـد. آنها برای حل مسـئله یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را برای مسئله توسعه دادند. آنها چهار همسـایگی را برای بدسـت آوردن مسـیر در این مسـئله تعریف کردنـد و الگوریتم خود را بر روی نمونـه مسـئلـه‌هـای موجود آزمایش نموده‌اند.[Cheikh et al. 2015]

فرانکویز و همکاران بر روی یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه به صـوت چنـد سـفری مطالعه نموده و بیان می‌کنند در دوحالت اسـتفاده از مسـیریابی چند سـفری ضـروری می‌شـود. حالت اول زمانی‌که اندازه سـفارش خیلی بزرگ باشـد و حالت دوم زمانی‌که مشـتریان در مکان‌های بسـته‌ای نسبت به یگدیگر قرار دارند. آنها برای حل مسـئله از الگوریتم ابتکاری همسـایگی بزرگ اسـتفاده می‌کنند[Francois et al. 2016].

واسـان و همکاران در پژوهش خود یک مسـئله مسـیریابی چند سـفری را مورد مطالعه قرار دادند. دراین پژوهش یک مدل‌سـازی جدید با در نظر گرفتن این فرضـیه که دو دسته مشتری وجود که دسته اول خدمت برداشتن و دسته دوم خدمت گذاشتن را دربافت می‌کنند، توسـعه داده شـده است . برای حل مدل برای مسئله‌های کوچک و متوسـط از سـیپلکس اسـتفاده شـده اسـت. برای حل مسئله‌های بزرگ یک الگوریتم فرابتکاری VNS توسعه داده شده است [Wassan et al. 2016] .

در این پژوهش سـیسـتم توزیع به صـورت چند سـفری در یک زنجیره تأمین دوسـطحی ترکیب شـده اسـت، به عبارت دیگر سفارش مشتریان بعد از تولید، برای توزیع در اختیار سیستم توزیع چند سـفری قرار می‌گیرد. در این سـیسـتم به دلیل محدود بودن تعداد وسـیله نقلیه، هر وسـیله نقلیه می‌تواند چندین بار در یک روزکاری مورد استفاده قرار بگیرد. هدف از اضافه شدن این فرض شبیه شدن مدل به مسائل دنیای واقعی است.

جدول (۱) دسـته بندی مقاله‌های مرتبط با ادبیات موضـوع را به صورت مختصر نشان می‌دهد

این پژوهش از ترکیب سـه ادبیات زنجیره تأمین، محاسـبه مصرف سوخت و مسائل مسیریابی چند سفری به دست آمده است.

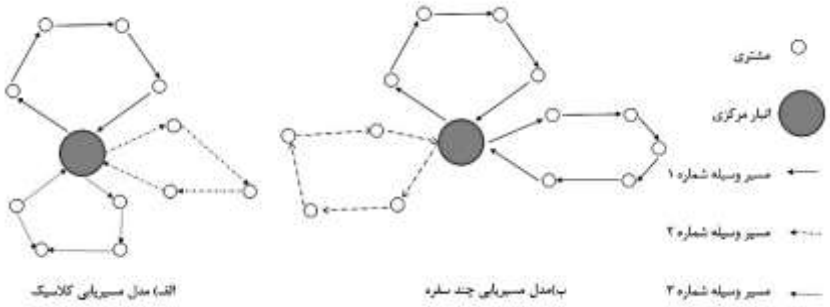
با توجه به سـهم انتشـار آلاینده‌ها در آلودگی محیط زیست، لزوم بررسـی این مسئله در سیستم توزیع زنجیره‌تأمین ضروری به نظر می رسـد. درنهایت نوآوری اصلی پژوهش در نظر گرفتن همزمان اثر بار و سرعت در مصرف سوخت و هزینه‌های آن در یک مسئله زنجیره تأمین دوسـطحی و ترکیب مسـئله مسـیریابی به صـورت چندسفری با این مسئله و همچنین ارائه یک راه حل ابتکاری برای آن است.

۳. تعریف مسئله

در این مسـئله یک زنجیره‌تأمین دوسطحی مورد بررسی قرارگرفته که در آن یک تولیدکننده و مجموعه‌ای از مشـتریان با تقاضـا و مـدت تحویل معلوم وجود دارند. کارگاه تولیدی به‌عنوان یک تک ماشـین در نظر گرفته شـده که به تولید سـفارش‌ها می‌پردازد. تعدادی وسـیله نقلیه با ظرفیت معلوم و سـطوح سـرعت متفاوت برای توزیع سـفـارش‌هـا وجود دارد. زمـانی که حداقل ظرفیت باقی‌مانده وسـیله نقلیه به جایی برسـد که سـفارش بعدی در آن جای نگیرد، وسـیله توزیع را آغاز می‌کند. هر وسـیله نقلیه این امکان را دارد که چندین بار مورد استفاده قرار بگیرد. این مسئله از دو زیرمسـئله تشکیل شده است که حل همزمان این دو زیرمسئله برای رسیدن به هدف مسئله مورد توجه بوده است. زیرمسئله اول سطح تولید زنجیره‌تأمین را شامل می‌شود که یک مسئله زمان‌بندی تک ماشـین اسـت. زیرمسـئله دوم که سـطح توزیع زنجیره‌تأمین می‌باشـد، خود یک مسـئله مسـیریابی وسیله نقلیه به صورت چند سفری است. در این مسئله K وسیله نقلیه با ظرفیت Q واحد

جدول ۱. دسته بندی مطالعات مرتبط با ادبیات موضوع به صورت مختصر

نویسندگان	سال انتشار	سطح زنجیره تأمین		سیستم توزیع		سازگاری با محیط زیست		نوع مسئله مسیریابی	
		دوسطحی	سه سطحی	مسئله مسیریابی	مرکزی	مصرف سوخت	سرعت	کلاسیک	چند سفری
کابیکر و چنگ	۱۹۹۳	●			●				
پالمر	۲۰۰۷			●		●	●	●	
ذگردی و بهشتی‌نیا	۲۰۰۹			●					
وایت و لابات	۲۰۱۱					●			
کیک و همکاران	۲۰۱۲	●			●				
نوروزی و رزمی	۲۰۱۲			●		●		●	
دمر، بکتاش و لاپرته	۲۰۱۲			●		●	●	●	
تارکین‌استین	۲۰۱۷			●		●	●	●	
اولیریچ	۲۰۱۳	●		●				●	
وراک‌تارکیز و چن	۲۰۱٤	●		●				●	
چیک و همکاران	۲۰۱۵			●					●
جمیلی و رنجبر	۲۰۱٦		●		●				
واسان و همکاران	۲۰۱٦			●					●
این پژوهش	---	●		●		●	●		●



شکل ۲. تفاوت مدل مسیریابی چند سفره و مدل مسیریابی کلاسیک

وجود دارد کـه می تواننـد حداکثر R مسـیر را در یک روزکاری برای ارسال تقاضای مشتریان ایجاد نمایند. مسئله‌ی توزیع، شامل گراف $G(V.A)$ اسـت که در آن $V=\{0.1.\ldots.n\}$ نشـان دهنده گره‌های شبکه است که گره صفر نشان دهنده انبارمرکزی یا کارگاه تولیدی و سـایر گره‌ها، متناظر با مجموعه مشـتریان است. $A=\{(i,j):i.j\in V\}$ نشـان‌دهنده کمان‌های شـبکه اسـت.

$V^+ = \{0.1. \ldots . n. n+1\}$ نشان‌دهنده گره‌های مجموعه V است که گرهی کاملا مشابه با گره صفر به آن اضافه شده است و تمامی مسیرهای موجود به این گره ختم می‌شوند.

مفروضات مسئله

فرضیات موجود درمدل ریاضی به شرح زیر است:

- کارگاه تولیدی به‌عنوان تک ماشین در نظر گرفته‌شده است.
- اندازه و زمان تحویل و زمان پردازش هر سفارش معلوم است.
- چند وسیله نقلیه با یک ظرفیت مشخص وجود دارند که هر وسیله می‌تواند با یکی از سطوح سرعت عملیات توزیع را انجام دهد. (وقتی وسیله نقلیه یک سطح سرعتی را در یک مسیرمشخص انتخاب نماید تمام کمان‌های موجود در آن مسیر را با همان سطح سرعت طی می‌نماید)
- هر وسیله نقلیه می تواند چندین بار مورد استفاده قرار بگیرد.(شکل (۲) به صورت شماتیک تفاوت مسیریابی چند سفری و نوع کلاسیک آن را نشان می دهد)
- هر مشتری با یک بار ملاقات شدن تمام سفارش خود را دریافت می‌کند.
- هر وسیله نقلیه مجاز است فقط در طول یک دوره کاری که معادل یه روزکاری است ارائه خدمت داشته باشد.

٤. مدل‌سازی

در این بخش مدلی برای محاسبه مصرف سوخت به اختصار توضیح داده می‌شود. در مقاله دمیر،بکتاش و لاپرته انواع مدل‌های محاسبه مصرف سوخت معرفی شده‌اند [Demir, Bectas and Laporte, 2011]. در میان این مدل‌ها مدل جامع انتشار[۹] از کارایی بیشتری برخوردار بوده است. آنها در مقاله دیگری از مدل جامع انتشار برای محاسبه مصرف سوخت در یک مسئله PRP استفاده می نماید و از آنجایی‌که ناوگان حمل‌ونقل این پژوهش مشابه مسئلهPRP است به همین دلیل در این پژوهش مدل جامع انتشار برای محاسبه سوخت مصرفی مورد استفاده قرار گرفته است[Demir, Bectas and Laporte, 2012] .

٤-١ مدل جامع انتشار

مدل جامع انتشار شامل سه ماژول قدرت موتور، سرعت موتور و نرخ سوخت است.در ادامه به نحوه محاسبه مصرف سوخت توسط این مدل و توسعه آن برای استفاده در مدل‌سازی مسئله ارائه می‌شود.

٤-١-١ ماژول قدرت موتور[۱۰]

تابع تقاضای قدرت برای وسیله نقلیه از قدرت کشش موردنیاز $P_{tract}(KW)$که درچرخ‌های وسیله نقلیه قرار دارد از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{tract} = (Ma + MgSin\theta + 0.5C_d\rho Av^2 + MgC_rCos\theta)v/1000 \quad (۱)$$

که در این رابطه P_{tract} کل قدرت کشش مورد نیاز است و v سرعت،a شتاب وسیله نقلیه ، M وزن وسیله ،ρ چگالی هوا، A سطح پیشانی ،g ثابت گرانشی و θ شیب جاده است. C_d و C_r به ترتیب ضریب کشش

آئرودینامیکی و ضریب مقاومت در برابر نورد است.

[Demir, Bectas and Laporte, 2011] با تفصیل بیشتری به معرفی پارامترهای موجود در مدل جامعه انتشار پرداخته اند.

برای اینکه قدرت کشش موردنیاز را به قدرت موتور تبدیل کنیم از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$P = \frac{P_{tract}}{\eta_{tf}} + P_{acc} \quad (۲)$$

در این رابطه η_{tf} ضریب بهره وری پیشرانه خودرو بوده و P_{acc} میزان استفاده از قدرت موتور توسط لوازم جانبی مانند تهویه‌ی هوا و ... می‌باشد که در اینجا صفر منظور گردیده است.

۲.۱.٤ ماژول سرعت موتور[11]

سرعت موتور از سرعت وسیله نقلیه تخمین زده می‌شود:

$$N = S\left(\frac{R(L)}{R(L_g)}\right)v \quad (۳)$$

که در این رابطه N سرعت موتور(در rpm) است و S نسبت سرعت موتور به‌سرعت وسیله نقلیه است. مقادیر $R(L)$ و $R(L_g)$ نسبت‌هایی ثابت در رابطه است.

٤-۱-۳ ماژول نرخ سوخت[12]

نرخ سوخت برحسب (g/s) محاسبه می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$FR = \frac{\phi(KNV + \frac{P}{\eta})}{44 * \psi} \quad (٤)$$

بدین ترتیب با توجه به سرعت حرکت وسیله نقلیه، سوخت مصرفی بر روی هر کمان(i,j) و در نهایت هر مسیر از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$F_v = (\lambda KNV + \gamma\lambda P_{tract})\frac{d}{v} \quad (۵)$$

به صورتی که در این رابطه

$$\lambda = \frac{\phi}{44 * \psi}$$
$$\gamma = \frac{1}{1000 * \eta_{tf} * \eta}$$
$$\alpha = a + g\sin\theta + gC_r\cos\theta$$
$$\beta = 0.5 * C_d\rho A$$

است.

با توجه به اینکه وزن وسیله نقلیه شامل وزن خالص (بدون بار)وسیله نقلیه و بار وسیله نقلیه است. با جایگذاری وزن به صورت $M = w + l_{ij}$ کهw وزن خالص وسیله نقلیه و l میزان بار حمل شده روی یال (i,j) می‌باشد، قرار دادن رابطه (۱) در رابطه (۵)، F_v را که مصرف سوخت روی هر یال طی شده را محاسبه می‌کند، دوباره بازنویسی می‌کنیم:

$$F_v = \frac{KNV\gamma d_{ij}}{v_s} + w\gamma\alpha d_{ij} + \beta\gamma d_{ij} * v_s^2 + \gamma\alpha d_{ij} * l_{ijr} \quad (٦)$$

فرض شده است تمام پارامترهای استفاده شده درمدل جامع انتشار، در مدت طی شدن یک کمان به طول d توسط وسیله نقلیه ثابت هستند. F_v مصرف سوخت (در واحد لیتر) را محاسبه می‌کند.

در مقاله دمیر،بکتاش ولاپرته از مدل جامع انتشار را برای یک مسئله PRP استفاده شده و مدل برای طی کردن هر یال با سرعت ثابت و اندازه گیری میزان انتشار در واحد لیتر، توسعه داده شده است. درحالی‌که در این پژوهش سرعت سطوح مختلفی دارد و وسیله نقلیه می‌تواند هر یال را با انتخاب یکی از سطوح سرعت طی نماید[Demir, Bectas and Laporte, 2012].

٤-۲ مدل‌سازی مسئله

مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش توسعه یافته مدل ریاضی ارائه شده در مقاله [Demir, Bectas and Laporte, 2011] است که به آن مدل تولید اضافه شده است و سیستم توزیع به صورت چند سفری برنامه ریزی شده است. این بخش، مطابق پارامترهای معرفی شده در جدول (۲) و پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله، به ارائه مدل ریاضی مسئله می‌پردازد. از آنجایی‌که مدل ارائه شده خطی نمی‌باشد، در ادامه با استفاده از روش‌های خطی‌سازی مدل خطی شده ارائه می‌گردد.

پارامترها:

P_j : زمان پردازش سفارش مشتری i ام روی ماشین تولیدی

d_i : موعد تحویل کار مشتری i ام

q_i : مقدار سفارش مشتری i ام

d_{ij} : فاصله مشتری i از مشتری j

v_s : سطح سرعت s برای وسیله نقلیه

Q_k : ظرفیت وسیله k ام

f_c: هزینه هر لیتر مصرف سوخت

Ce_j : هزینه هر واحد زمانی زودکرد کار j

Ct_j : هزینه هر واحد زمانی دیرکرد کار j

n : تعداد مشتریان یا تعداد سفارش‌های مسئله

K : تعداد وسیله نقلیه موجود

R: حداکثر تعداد مسیرهای موجود

S: تعداد سطوح سرعتی که وسیله نقلیه می‌تواند اختیار کند

متغیرهای تصمیم :

x_{ijk}^r: اگر کمان $(i.j)$ در r امین سفر وسیله نقلیه k طی شود برابر یک و در غیر این صورت صفر

z_{ijs} : اگر کمان $(i.j)$ با سطح سرعت s طی شود برابر یک در غیر این صورت صفر

b_{kj}^r : اگر کار j ام در وسیله k ام و مسیر r ام قرار گیرد برابر یک در غیر این صورت صفر

u_{ip}: اگر کار i ام در موقعیت p روی ماشین تولیدی قرار گیرد برابر یک در غیر این صورت صفر

C_i : زمان تکمیل کار i ام روی ماشین تولیدی

D_{ik}^r: زمان ملاقات گره i در r امین سفر وسیله نقلیه k

l_{ijk}^r : جریان حمل شده از گره i به گره j در مسیر r ام وسیله k

lt_j : میزان دیرکرد کار j

le_j : میزان زودکرد کار j

در ادامه مدل ریاضی و توضیحات آن شرح داده می‌شود. مدل ریاضی در ادامه خطی‌سازی شده و ارائه می‌شود.

با توجه به اینکه رابطه(٦) برای محاسبه مصرف سوخت در یک یال است در مدل این رابطه برای کل مسیر توسعه داده شده است:

$$\begin{aligned} &min \sum_{k=1}^{n} max\{0. D_{jk}^r - d_j\} * Ct_j + \\ &\sum_{j=1}^{n} max\{0. d_j - D_{jk}^r\} * Ce_j + \\ &f_c\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} KNV\lambda d_{ij} \sum_{s=1}^{S} z_{ijs}}{v_s} + \right. \\ &\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w\alpha\lambda d_{ij} x_{ijr} + \\ &\left. \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \beta\gamma d_{ij} \sum_{s=1}^{S} z_{ijs} * (v_s)^2 + \right. \\ &\left. \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \gamma\alpha d_{ij} l_{ijr}\right) \end{aligned} \quad (٧)$$

St:

$$\sum_{i=1}^{n} u_{ip} = 1 \quad \forall p = 1. \ldots . N \quad (٨)$$

$$\sum_{p=1}^{n} u_{ip} = 1 \quad \forall i = 1. \ldots . n \quad (٩)$$

$$C_i = \sum_{p=1}^{n} \left(u_{ip}\left(p_i * q_i + \sum_{k}^{p-1}\sum_{j}^{n} u_{jk} * p_j * q_j\right)\right) \quad \forall i = 1. \ldots . n \quad (١٠)$$

$$D_{ik}^r + \frac{d_{ij}}{v_s} * \sum_{s=1}^{S} z_{ijs} - D_{jk}^r \le M * \left(1 - x_{ijk}^r\right); \forall \in \frac{V^+}{\{n+1\}}; \forall j \in \frac{V^+}{\{0\}}; \forall k = 1. \ldots . K; \forall r = 1. \ldots . R \quad (١١)$$

$$D_{0k}^r \ge C_j * b_{kj}^r \quad \forall j \in V; \forall r = 1 \ldots . R; \forall k = 1. \ldots . K \quad (١٢)$$

$$D_{0k}^r \ge D_{(n+1)k}^{r-1} \quad \forall r = 1. \ldots . R; \forall k = 1. \ldots . K \quad (١٣)$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{r=1}^{R}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}^r = 1 \quad \forall j \in V \quad (١٤)$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{r=1}^{R}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}^r = 1 \quad \forall i \in V \quad (١٥)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0jk}^r - \sum_{j=1}^{n} x_{j(n+1)k}^r = 0 \quad \forall k = 1. \ldots . K; \forall r = 1. \ldots . R \quad (١٦)$$

$$\sum_{s=1}^{S} z_{ijs} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R} x_{ijk}^r \quad \forall i. j \in V \quad (١٧)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R} l_{i0k}^r = 0 \quad (١٨)$$

$$\sum_{j=1}^{n} l_{0jk}^r = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n+1} x_{ijk}^r q_j \quad \forall r = 1. \ldots . R; \forall k = 1. \ldots . K \quad (١٩)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} l_{jik}^r - \sum_{j=1}^{n+1} l_{ijk}^r = q_i * \sum_{j=1}^{n+1} x_{ijk}^r \quad \forall i \in V; \forall k = 1. \ldots . K; \quad \forall r = 1. \ldots . R \quad (٢٠)$$

$$q_j * x_{ijk}^r \le l_{ijk}^r \le (Q_k - q_i) * x_{ijk}^r \quad \forall i. j \in V; \quad \forall r = 1. \ldots . R; \quad \forall k = 1. \ldots . K \quad (٢١)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{0jk}^{r} \le 1 \qquad \forall r = 1. \dots . R;\ \forall k = 1. \dots . K \tag{۲۲}$$

$$b_{kj}^{r} = \sum_{i=0}^{n} x_{ijk}^{r} \qquad \forall j \in V; \forall r = 1. \dots . R; \forall k = 1. \dots . K \tag{۲۳}$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{0jk}^{r} \ge \sum_{j=1}^{n} x_{0jk}^{r+1} \quad \forall r = 1. \dots . R;\ \forall k = 1. \dots . K \tag{۲۴}$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} \sum_{r=1}^{R} x_{0jk}^{r} \ge \sum_{j=1}^{n} x_{0jk+1}^{r} \qquad \forall r = 1. \dots . R;\quad \forall k = 1. \dots . K \tag{۲۵}$$

$$D_{(n+1)k}^{r} - D_{0k}^{r} \le T_{max} \quad \forall r = 1. \dots . R;\ \forall k = 1. \dots . K \tag{۲۶}$$

$$x_{ijk}^{r}. u_{ip}. z_{ijs}. b_{kj}^{r} \in \{0.1\} \tag{۲۷}$$

$$D_{ik}^{r}. C_i . l_{ijk}^{r} \ge 0 \tag{۲۸}$$

عبارت (۷) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. قسمت اول و دوم تابع هدف هزینه‌های دیرکرد و زودکرد را به ترتیب محاسبه می‌کند. قسمت بعدی تابع هدف هزینه‌های مصرف سوخت را با توجه به سرعت و میزان بار وسیله نقلیه براساس رابطه (٦) ، که در پژوهش[Demir, Bectas and Laporte, 2011] به دست آمده است، محاسبه می‌کند. محدودیت (۸) و (۹) این امکان را ایجاد می‌کند که هر کار به یک موقعیت روی ماشین تولیدی و هر موقعیت به یک کار تخصیص یابد. محدودیت (۱۰) زمان تکمیل شدن کار i ام روی ماشین تولیدی را محاسبه می‌کند؛ محدودیت (۱۱) بیان می‌کند زمان ملاقات هر کار برابر است با زمان ملاقات کار قبلی به اضافه نسبت مسافت طی شده تا رسیدن به کار بر سرعتی که وسیله نقلیه برای رسیدن به آن کار اختیار می‌کند. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که زمان ملاقات کار j با وسیله k در مسیر r باید بزرگ‌تر از زمان اتمام تولید کارهای تخصیص یافته به آن وسیله نقلیه باشد و همین‌طور این زمان باید از زمان ملاقات کار قبلی در آن مسیر وسیله نقلیه نیز بزرگتر باشد که در محدودیت (۱۳) بیان شده است. محدودیت (١٤) و (١٥) تضمین می‌کند هرکمان در مسیر فقط یک بار مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت (١٦) بیان می‌کند که تعداد کمان‌های ورودی یک گره باید با تعداد کمان‌های خروجی برابر باشد. محدودیت شماره (۱۷) وابستگی متغیر z_{ijs} به متغیر x_{ijk}^{r} را تضمین می‌کند. محدودیت‌های (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) محدودیت‌های $M.T.Z$ هستند که برای حذف زیرتور به کار می‌روند.حذف زیرتور[۱۳] به این شکل اولین بار توسطمیلرو همکارانش برای مسئله فروشنده دوره گرد صورت گرفت.[Miller et al., 1960] . لاپرته وکارا این محدودیت‌ها را برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار مورد بازبینی قرار داده و اصلاح کردند [Laporte and Kara, 2004] . بدین ترتیب محدودیت‌های (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) با اقتباس از مراجع ذکر شده و پس از مطابقت با تعریف مسئله آورده شده است. نامعادله (۲۲) بیان می‌کند هر کار حداکثر باید به یک مسیر و یک وسیله نقلیه تخصیص یابد. محدودیت (۲۳) تضمین می‌کند یک کار در صورتی می‌تواند در یک مسیر حمل شود که حتما قبلا به یک وسیله نقلیه تخصیص یافته باشد. محدودیت (٢٤) و (٢٥) توالی ایجاد مسیر و استفاده از وسیله نقلیه را تضمین می‌کند. نامعادله (٢٦) تضمین می‌کند زمان توزیع

$$min \sum_{k=1}^{n} lt_j * Ct_j + \sum_{j=1}^{n} le_j * Ce_j + f_c\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} KNV\lambda dij \sum_{s=1}^{S} z_{ijs}}{v_s} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w\lambda\gamma\alpha d_{ij} x_{ijr} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \beta\gamma\lambda d_{ij} \sum_{s=1}^{S} z_{ijs} * (v_s)^2 + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \gamma\lambda\alpha d_{ij} l_{ijr}\right) \tag{۲۹}$$

$$lt_j \ge D_{jk}^{r} - d_j \tag{۳۰}$$

$$le_j \ge d_j - D_{jk}^{r} \tag{۳۱}$$

$$lt_j , le_j \ge 0 \tag{۳۲}$$

یک وسیله نقلیه در تمامی مسیرها نباید از شیفت‌کاری آن وسیله نقلیه بیشتر باشد. نامعادله‌های (۲۷) و (۲۸) محدودیت‌های علامتی مدل است.

٤-۲-۱ خطی‌سازی مدل ریاضی

در این مدل ریاضی تابع هدف و محدودیت شماره (۱۰) و (۱۲) غیرخطی هستند.

با توجه به خطی‌سازی توابع $Minimax$، برای خطی‌سازی تابع هدف این مدل، دو متغیر le_j و lt_j به مدل اضافه می‌شود. تابع هدف با دو محدودیتی که به مدل اضافه می‌شود، دوباره بازنویسی می‌شود.

محدودیت شماره (۱۰) نیز غیرخطی است. این محدودیت به دلیل ضرب دو متغیر صفر و یک u_{ip}وu_{jk} در یکدیگر غیرخطی است که با توجه به نحوه خطی‌سازی در این گونه از توابع غیرخطی ، متغیر y_{ijkp} که یک متغیر صفر و یکی است به مدل اضافه می‌شود و محدودیت مجددا بازنویسی می‌شود.

فرض کنید در مدلی محدودیت $z = x \times y$ وجود دارد که $y.z$ وx متغیرهای صفر و یک هستند. برای خطی‌سازی این محدودیت کافی است نامساوی‌های زیر به مدل اضافه شوند:

$$z \le x \quad (۳۳)$$

$$z \le y \quad (۳۴)$$

$$z \le x + y - 1 \quad (۳۵)$$

دو محدودیت اول این اطمینان را می‌دهند که z صفر می‌شود اگر مقادیر $x.y$صفر شوند. و محدودیت سوم نیز می‌گوید z زمانی یک خواهد شد که هر دو مقدار$x.y$ یک باشند. با توجه به این روش محدودیت (۱۰) با تعریف متغیر $y_{ijkp} = u_{ip} \times u_{jk}$ به صورت زیر خطی خواهد شد.

$$C_i = \sum_{k=1}^{n} u_{ik} * p_i + \sum_{k=1}^{n}\sum_{p=1}^{k-1}\sum_{j=1}^{n} y_{ijkp} * p_i \; ; \; \forall i = 1. \dots . n \quad (۳۶)$$

$$y_{ijkp} \le u_{ik}; \forall i \in V; \; \forall j \in V; \; \forall k \in V^+; \forall p = 1. \dots . k-1 \quad (۳۷)$$

$$y_{ijkp} \le u_{jp}; \forall i \in V; \; \forall j \in V; \; \forall k = 0. \dots . p-1; \forall p \in V \quad (۳۸)$$

$$y_{ijkp} \ge u_{jp} + u_{ik} - 1 \; ; \forall i \in V; \; \forall j \in V; \; \forall k \in V^+; \forall p = 1. \dots . k-1 \quad (۳۹)$$

محدودیت (۱۲) به دلیل ضرب یک متغیر پیوسته در متغیر صفر و یک غیرخطی می باشد که نحوه خطی‌سازی آن در مرجع [Chang, 2000] معرفی شده است.

با جای‌گذاری عبارت (۲۹) به جای عبارت (۷) و اضافه شدن نامعادلات (۳۰)، (۳۱) و (۳۲) و جایگزین کردن نامعادله شماره (۳۶) به جای نامعادله (۱۰) و اضافه شدن نامساوی‌های (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) به مدل ارائه شده، مسئله خطی‌سازی می‌شود.

۵. الگوریتم ابتکاری[۱۴] بهبود دهنده

در این بخش الگوریتم ابتکاری توسعه داده شده برای حل مدل ارائه می‌شود. در این الگوریتم ابتدا یک جواب اولیه ارائه شده است و سپس با توسعه روش‌های بهبود دهنده که در ادامه معرفی می‌شوند جواب اولیه ارائه شده بهبود می‌یابد. شبه کد الگوریتم بهبود دهنده‌ی جواب اولیه در شکل (۳) آمده است.

۵-۱ نمایش جواب

با در نظر گرفتن مسئله‌ای با n مشتری، مجموعه $S_{v.r}\{j_1.j_2.\dots.j_v\}$ مجموعه کارهای(سفارش مشتریان) اختصاص داده شده به وسیله v و مسیر r ام آن وسیله است که j، کار مشتری و i، ترتیب ملاقات مشتریان در سیستم توزیع وسیله نقلیه را نشان می‌دهند. تعداد کارهای این مجموعه با توجه به اندازه سفارش هر مشتری و ظرفیت وسیله نقلیه می‌تواند متفاوت باشد.

procedure *FDA algorithm*

Initialize $S_{v.r}$
WHILE(*No Improve observe*)
  $S_{v.r}^{best} = swap_Batch(S_{v.r})$
  IF$(Costs_{S_{v.r}^{best}} < Costs_{S_{v.r}})$
  $S_{v.r} = S_{v.r}^{best}$
 End IF
  $S_{v.r}^{best} = swap_in\ Batch(S_{v.r})$
  IF$(Costs_{S_{v.r}^{best}} < Costs_{S_{v.r}})$

$S_{v.r} = S_{v.r}^{best}$
End IF
$S_{v.r}^{best} = Remove_Insertion(S_{v.r})$
$\boldsymbol{IF}(Costs_{S_{v.r}^{best}} < Costs_{S_{v.r}})$
$S_{v.r} = S_{v.r}^{best}$
End IF
End WHILE
$S_{v.r}^{best} = S_{v.r} + Buffer\ time$
$Out\ put\ \boldsymbol{S_{v.r}^{best}}$

شکل۳. چارچوب کلی الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده

۵-۲ رویه تولید جواب اولیه

ابتدا کارها را براساس نزدیک‌ترین فاصله در بسته‌هایی[۱۵] قرار می‌دهیم. از آنجایی که هدف مسئله کم کردن مصرف سوخت و هزینه‌های زودکرد و دیرکرد می‌باشد، تولید به موقع و تحویل به موقع سفارش مشتریان و پیدا کردن کوتاهترین مسیر(با توجه به رابطه مستقیم فاصله و مصرف سوخت در رابطه (۵) برای توزیع می تواند جواب خوبی ارائه دهد. علاوه بر مسافت، جریان ورودی به هر کمان نیز بر میزان مصرف سوخت تاثیر می‌گذارد. با توجه به این موضوع α به عنوان ضریب تعدیل جریان در وسیله نقلیه تعریف شده است. در واقع این ضریب به این دلیل استفاده شده است که از تمام ظرفیت وسیله نقلیه برای تولید جواب اولیه استفاده نشود. این موضوع باعث می‌شود جریان ورودی هر کمان حداکثر به اندازه $(1-\alpha)$ درصد کاهش یابد. α تمام مقادیر بین صفر و یک را می‌تواند اختیار کند. لازم به ذکر است که این ضریب تعدیل فقط در جواب اولیه استفاده شده است. رویه تولید جواب اولیه ارائه شده برای مسئله در ادامه آمده است.

گام اول: ابتدا کارها را بر اساس نزدیک‌ترین فاصله بسته‌بندی نموده و زمان تکمیل هر بسته $(Cmax[b])$ را محاسبه نمایید. برای این کار، ابتدا نزدیک‌ترین مشتری به انبار توزیع را انتخاب و در بسته قرار دهید و سپس نزدیک‌ترین مشتری به مشتری انتخاب شده را برای قرار دادن در بسته کاندید نمایید. این کار را تا تمام شدن α درصد ظرفیت بسته که همان ظرفیت وسیله نقلیه است ادامه دهید. هر گاه ظرفیت بسته به جایی رسید که سفارش مشتری دیگری در آن جای نگیرد به سراغ بسته بعدی رفته و این گام را از ابتدا انجام دهید تا زمانی این کار را تکرار کنید که سفارش تمام مشتریان به بسته ای تخصیص یافته باشد. براساس توالی قرار گرفتن کارها در هر بسته زمان تکمیل آن بسته را محاسبه کنید.

گام دوم: برای هر بسته میزان زودکرد $(E[b])$ و دیرکرد$(T[b])$ را براساس توالی موجود در آن بسته محاسبه نمایید. اگر برای هر مشتری تفاضل زمان ملاقات آن مشتری و موعد تحویل مثبت بود مقدار این تفاضل را با $(T[b])$ جمع کنید و اگر منفی بود با $(E[b])$ جمع کنید.

گام سوم: برای ایجاد توالی برای تولید بسته‌ها از بسته‌ی اول شروع کرده و برای تمام بسته‌هایی که رابطه $(T[b] > 0, E[b] = 0)$ برقرار است، به گام چهارم بروید. برای بسته‌هایی که $(T[b] = 0, E[b] > 0)$ هم به گام پنجم بروید و برای بسته‌هایی که $(T[b] > 0, E[b] > 0)$ نیز به گام ششم بروید واگر بسته‌ای برای بررسی وجود ندارد به گام هفتم بروید.

گام چهارم: بسته‌ای که بیشترین مقدار $(T[b]/n[b])$ دارد را پیدا کرده و به توالی تولید تخصیص دهید. $n[b]$ تعداد کارهای موجود در هر بسته را نشان می‌دهد.

گام پنجم: بسته‌ای که کمترین مقدار $(E[b]/n[b])$ دارد را پیدا کرده و به توالی تولید تخصیص دهید.

گام ششم: بسته‌ای که بیشترین مقدار $(T[b]/E[b])$ دارد را پیدا کنید و به توالی تولید تخصیص دهید.

گام هفتم: از اولین بسته تولید شده شروع کرده و آن را به اولین وسیله بیکار موجود تخصیص دهید. هرگاه وسائل نقلیه تمام می‌شود، بسته را به مسیر بعدی وسیله‌ای که زودتر به انبار برمی‌گردد، اختصاص دهید. برای هر بار اضافه کردن مسیر به

مسیرهای یک وسیله نقلیه شرط روزکاری وسیله باید بررسی شود.

گام هشتم: بعد از تخصیص کارهای درون بسته‌ها به وسائل نقلیه، برای هر وسیله یک مسئله فروشنده دوره‌گرد حل نموده و سپس مسیرهای ایجاد شده را با جابه‌جایی جفتی کارهای موجود در هر مسیر بهبود دهید.

٦. الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده

با الگوریتم ارائه شده در قسمت قبل یک جواب شدنی برای مسئله پیدا می‌شود. در این بخش الگوریتم بهبود دهنده جواب اولیه ارائه می‌شود. این الگوریتم از سه بهبود دهنده تشکیل شده که در ادامه توضیح داده می‌شوند. شبه کد مربوط به الگوریتم بهبود دهنده‌ی جواب اولیه در ادامه آمده است.

٦-١ بهبود دهنده اول (جابجایی بسته‌ها[١٦])

این بهبود دهنده تمام بسته‌های تولید شده را به صورت دو بدو با هم جابه‌جا نموده هر گاه این جابه‌جایی مقدار تابع هدف را بهتر نماید، در توالی تولید جای آن دو بسته عوض می‌شود. جابه‌جایی دو بسته در زمان کامل شدن تولید$(Cmax)$ تغییری ایجاد نمی‌کند، اما زمان کامل شدن هر بسته و در نتیجه زمان شروع توزیع را تغییر می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود مقدار زودکرد و دیرکرد برای رسیدن به هر مشتری تغییر نماید. این بهبود دهنده به این روش عمل می‌کند که دو بسته برای جابه‌جایی انتخاب می‌شوند. تمام زمان‌های ملاقات مشتریان و اختلافشان با موعد تحویل محاسبه می‌شود. اگر جابه‌جایی این دو بسته باعث کاهش در مقدار هزینه‌های زمان‌بندی گردد، این جابه‌جایی اتفاق می‌افتد و در غیر این صورت الگوریتم به سراغ دو بسته دیگر می‌رود. با جابه‌جایی دو بسته با یکدیگر در واقع در سیستم توزیع جای دو مسیر با یکدیگر تعویض شده است.

٦-٢ بهبود دهنده دوم (جابجایی درون بسته‌ها[١٧])

به کمک این بهبود دهنده کارهای درون هر بسته به صورت دوبه‌دو باهم جابه‌جا می‌شوند، هر گاه این جابه‌جایی باعث بهتر شدن مقدار تابع هدف شود، جای آن دو کار در بسته عوض می‌شود. ترتیب کارها درون هر بسته علاوه براینکه مشخص کننده توالی تولید می‌باشد، ترتیب توزیع کارهای آن بسته را نیز مشخص می‌کند. از آنجایی‌که هزینه‌های مصرف سوخت با مسافتی که وسیله نقلیه طی می‌کند رابطه مستقیم دارد، برای جابه‌جایی کارهای درون بسته پیدا کردن کوتاهترین مسیر بین مشتریان و ترتیبی مناسب برای توزیع به منظور کاهش هزینه‌های زمان‌بندی، باید مورد توجه قرار بگیرند. از این‌رو الگوریتم برای اینکه دو کار را با هم تعویض نماید تأثیر این جابه‌جایی را هم بر هزینه‌های مصرف سوخت و هم هزینه‌های زمان‌بندی محاسبه نموده، اگر نتیجه این تأثیر موجب بهتر شدن جواب باشد این جابه‌جایی انجام می‌پذیرد.

هر کار موجود در بسته نماینده یک گره در مسیر است که با جابه‌جایی کارها در بسته، در واقع جای دو گره در مسیر نیز تعویض می‌شود.

٦-٣ بهبود دهنده سوم (حذف و اضافه مشتریان در بسته‌ها[١٨])

به کمک این بهبود دهنده هر کاری که در بسته بیشترین هزینه را برای تابع هدف ایجاد نموده را از جواب حذف می‌نماییم و آن کار را به بهترین مکان ممکن در مسیر دیگری از همان وسیله نقلیه یا وسیله نقلیه دیگر تخصیص می‌دهیم. در این بهبود دهنده حذف یک کار از یک مسیر و اضافه کردن آن به مسیر دیگر ممکن است باعث نشدنی شدن جواب گردد؛ زیرا هر وسیله نقلیه ظرفیت معینی دارد، که ظرفیت خالی باقی مانده یک وسیله ممکن است، به اندازه کار جدیدی که اضافه می‌شود؛ نباشد. در نتیجه این بهبود

دهنده برای هر جابه‌جایی می‌بایست شرط ظرفیت وسیله نقلیه را نیز بررسی نماید. در الگوریتم بهبود دهنده از تمام ظرفیت وسیله نقلیه استفاده می‌شود. با اضافه شدن کار به مسیری دیگر، تمام زمان‌های ملاقات و جریان هر کمان در هر دو مسیر(مسیری که کار از آن حذف گردیده و مسیری که کار به آن اضافه گردیده) بروزرسانی می‌شود.

جدول ۲. پارامترهای مدل تعیین مقدار زمان انتظار

پارامتر	تعریف
N	تعداد کل مشتریان
R	تعداد مسیرهایی که برای وسیله نقلیه ایجاد شده
n_r	تعداد کارهای موجود در مسیر r
d_j	موعد تحویل کارهای موجود در مسیر r
D_{rj}	زمان ملاقات کار کار j در مسیر r
T_{max}	دوره‌کاری وسیله نقلیه

٤-٦ محاسبه زمان انتظار برای شروع توزیع

در الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده، توزیع بلافاصله بعد از مرحله تولید انجام می‌گیرد؛ درحالی که با توجه به نتایج سیپلکس در حالت بهینه بین تولید و توزیع می‌تواند فاصله زمانی وجود داشته باشد. در واقع این فاصله زمانی که در این پژوهش به اختصار BT نامیده می‌شود[19]، می‌تواند مدت زمان انتظار وسیله نقلیه در انبار مرکزی(کارگاه تولیدی) باشد که با شروع توزیع بعد از این زمان انتظار، سفارش‌ها با زودکرد کمتری به مشتری تحویل داده می‌شوند. برای بدست آوردن مقدار مناسب BT یک مدل خطی نوشته شده است. این مدل برای هر وسیله نقلیه به صورت مجزا تصمیم‌گیری می‌کند. اطلاعات ورودی به این مدل از جواب نهایی الگوریتم استخراج می‌شود. متغیر تصمیم در این مدل، فاصله زمانی انتظار مابین تولید و توزیع برای هر یک از مسیرهای وسیله نقلیه می‌باشد. برای بدست آوردن زمان انتظار مناسب برای شروع توزیع، لازم است هزینه‌های مربوط به زودکرد و دیرکرد را کمینه کرد. در ادامه مدل ریاضی برای بدست آوردن این زمان انتظار آورده می‌شود. متغیرهای تصمیم و پارامترهای ورودی مدل تعیین مقدار BT درجدول (۳) تعریف شده‌اند.

تنها متغیر تصمیم این مدل M_r می‌باشد؛ که BT یا فاصله زمانی بین تولید و توزیع در مسیر r تعریف می‌شود. درنهایت مدل ریاضی برای تعیین مقادیر زمان انتظار برای هر مسیر در ادامه تعریف می‌شود. اضافه شدن این مقدار باعث می‌شود زمان‌بندی برای هر مسیر به اندازه M_r به جلو حرکت داده می‌شود.

$$\min \max\{0.\ vis_{rj} + \sum_{r=1}^{R} M_r - d_j\} * \quad (۴۰)$$
$$Ct_j + \max\{0.\ d_j - (vis_{rj} + \sum_{r=1}^{R} M_r\}$$

$$\sum_{r=1}^{R} M_r < T_{max} \quad (۴۱)$$

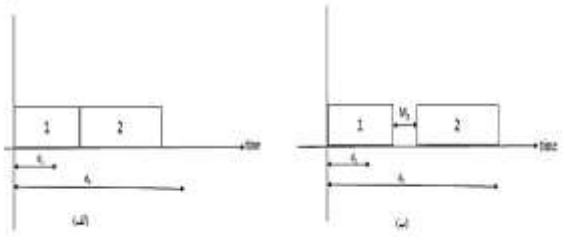
$$M_r \geq 0 \quad (۴۲)$$

رابطه (٤٠) که تابع هدف مدل است سعی دارد هزینه‌های دیرکرد و زودکرد سیستم توزیع را کمینه کند. نامعادله (٤١) تضمین می‌کند مقادیر بدست آمده محدودیت روزکاری وسیله نقلیه را نقض نکند. محدودیت آخر هم تضمین می‌کند متغیر تصمیم مقدار مثبتی اتخاذ نماید.

برای حل این مدل از نرم‌افزار بهینه سازی IBMILOG CPLEX12.3 استفاده شده است. زمان حل این مدل به خاطر سادگی مدل بسیار کوتاه است. لازم به ذکر است که نحوه خطی‌سازی این مدل مانند آنچه در مدل‌سازی مسئله بیان شد، می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (٤) دیده می‌شود بعد از حل مدل و محاسبه M_r، هر بسته موجود در جواب مسئله را که معادل یک مسیر در سیستم توزیع است به اندازه M_r مربوط به آن بسته یا مسیر، در برنامه زمان‌بندی رو به جلو حرکت داده می‌شود. همان طور که در شکل (۲-الف) دیده می‌شود، مسیر شماره ی(۱) در یک وسیله نقلیه با دیرکرد و مسیر شماره (۲) از همان وسیله نقلیه با زودکرد مواجه شده‌اند. بعد از محاسبه M_r برای این وسیله نقلیه $M_2 > 0$ و $M_1 = 0$ بدست می‌آید که با حرکت دادن رو به جلو

مسیر شماره (۲) به اندازه M_2 هزینه زودکرد برای این وسیله نقلیه کاهش می‌یابد.



شکل ٤ . نحوه اعمال کردن زمان انتظار بین تولید و توزیع(الف) قبل از اعمال BT،(ب) بعد از اعمال BT

۷. نتایج محاسباتی

در این بخش با اجرای الگوریتم ابتکاری ارائه شده بر روی نمونه مسائل مختلف، به ارزیابی عملکرد و کارایی آن پرداخته شده است. کلیه محاسبات ارائه شده در این مقاله، نتیجه اجرای الگوریتم ابتکاری در محیط Microsoft visual C++2012 بر روی رایانه‌ای با سیستم عامل ۳۲ بیتی و پردازنده intel core i7 2.20GHz و با حافظه داخلی قابل استفاده 5.86 GB، که مجهز به سیستم عامل Windows 7 می‌باشد. برای سنجش کارایی الگوریتم مدل خطی به کمک نرم افزار بهینه سازی IBM ILOG CPELEX v12.3 حل گردیده و نتایج حاصل با خروجی الگوریتم مقایسه شده است. به منظور انجام آزمایش‌های محاسباتی برای حل قطعی مدل از یک ماشین مجازی نصب شده بر روی سروری از واحد محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است. پردازنده سرور مذکور Intel Xeon X5675 (3.07 GHz) می‌باشد که دارنده ۲۱ هسته است و ۸ هسته آن به ماشین مجازی استفاده شده، تخصیص یافته بود . همچنین میزان RAM اختصاص یافته به ماشین مجازی استفاده شده، 16.00 GB است

۷-۱ طراحی نمونه مسائل

مجموعه نمونه داده‌های مورد استفاده در این مقاله بر مبنای نمونه مسائلی است که توسط [Demir et al. 2011] برای مسئله PRP ارائه شده، طراحی شده وتسعه یافته است. نمونه‌های ده‌تایی از مسائل متفاوت با مشخصاتی مانند تعداد مشتریان در اندازه‌های {۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰}، تعداد وسائل نقلیه مورد استفاده در اندازه‌های {۱، ۲، ۳، ٤، ۵، ۷،۱۰} طراحی شده است. سه سطح سرعت متفاوت در اندازه {۴۰،۷۰،۹۰} کیلومتر بر ساعت برای مدل انتخاب شده است. به دلیل اینکه نمونه مثال کاربردی برای مدل مسئله، کترینگ‌ها و رستوران‌های بزرگ توزیع کننده غذا در سطح شهر است، سطوح سرعت مورد استفاده در این بازه انتخاب شده است. حداکثر تعداد دورهایی که یک وسیله نقلیه می‌تواند اختیار کندبرای تمامی مسائل یک عدد بزرگ فرض شده است. یک شیفت‌کاری معادل یک روزکاری برابر ۸ ساعت (۲۸۸۰۰ثانیه) در نظر گرفته شده است.فاصله بین مشتریان با یکدیگر و واحد تولید کننده از رابطه نامساوی مثلثی پیروی می‌کند. هزینه مصرف هر لیتر سوخت، ۱,٤ یورو می‌باشد که براساس قیمت هر لیتر سوخت در سال ۲۰۱۲ در نظر گرفته شده است. هزینه‌های زودکرد و دیرکرد برای هر مشتری به ترتیب ۰,۰۰۲و ۰,۰۰٤ یورو در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) مقادیری که پارامترهای استفاده شده در مدل می وانند اختیار نمایند نشان می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در مدل جامع انتشار

پارامتر	تعریف	مقادیر
K	ضریب اصطکاک موتور	۰,۲
N	سرعت موتور(دور برثانیه)	[۱۶-۴۸]
V	حجم موتور(لیتر)	[۲-۸]
w	وزن وسیله نقلیه	[۵۰۰۰-۷۰۰۰]
ρ	چگالی هوا(کیلوگرم بر مترمکعب)	۱,۲۰۴۱
ξ	نسبت سوخت به توده هوا	۱
A	مساحت پیشانی(جلو) وسیله نقلیه(مترمربع)	[۲,۱-۵,۶]
C_r	ضریب مقاومت در برابر نورد	۰,۰۱
C_d	ضریب کشش آیرودینامیکی	۰,۷
g	ثابت گرانشی(متر بر مجذور ثانیه)	۹,۸
τ	شتاب وسیله نقلیه(متر بر مجذور ثانیه)	۰
θ	زاویه شیب جاده	۰
ψ	فاکتور تبدیل	۷۳۷
η_{tf}	پارامتر بهره وری برای موتور	[۰,۴-۰,۹]
η_{tf}	ضریب بهره‌وری پیشرانه خودرو	۰,۴

۷-۲ ارزیابی عملکرد الگوریتم ابتکاری روی حل مدل

در این بخش به بررسی عملکرد حل مدل به کمک نرم‌افزار بهینه سازی IBM ILOG CPLEX 12.3 و بدست آوردن جواب‌های خوب به کمک الگوریتم ابتکاری می‌پردازیم.

نتایج حل مدل از اجرای چند ساعتی نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX 12.3 بدست آمده است. در ادامه نتایج بدست آمده از اجرای نرم‌افزار را در برابر نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم ابتکاری در محیط Microsoft visual C++2012 آمده است.

نام هر نمونه مسئله به صورت UKi_j است که i نشان دهنده تعداد مشتریان و jشمارنده مسئله می‌باشد. UKi_avg بیانگر متوسط تمام نمونه مسئله‌های با i مشتری می‌باشد. دو ستون اول

در جداول نتایج حل مدل با استفاده از CPLEX می‌باشد. برای نمونه مسائلی که در مدت زمان اجرا به جواب بهینه رسیده‌اند از علامت (*) استفاده شده است. برای الگوریتم ابتکاری ستون Total costsنتایج حاصل، قبل از اعمال زمان انتظار وسیله نقلیه برای شروع توزیع (BT) و بعد از آن در ستون BT+ نشان داده شده است.در واقع این مقادیر نشان‌دهنده‌ی جواب‌های حل مدل بعد از اعمال مقادیر M_r در الگوریتم ابتکاری است. برای هر دسته مسئله، جواب اولیه به ازای تمام مقادیر α، محاسبه شده و بهترین جواب اولیه حاصل برای بهبود انتخاب شده است. مقدار α استفاده شده در جواب اولیه نیز گزارش شده است. زمان حل برای حل مسائل به کمک الگوریتم و نرم‌افزار بهینه‌سازی نیز در ستون Time برحسب ثانیه آمده است. ستون آخر جدول درصد انحراف جواب حاصل از الگوریتم ابتکاری، نسبت به جواب بهینه را گزارش می‌کند. نحوه محاسبه درصد انحراف به صورت $\frac{(TC_{cplex}-TC_{algo})*100}{TC_{cplex}}$ محاسبه شده است. ردیف آخر در جدول متوسط نتایج بدست آمده برای هر مسئله را گزارش می‌کند. از آنجایی‌که حل مدل مسئله با اجرای دو ساعتی نرم‌افزار بهینه سازی CPLEX برای مسائل با ۲۰ مشتری و بیشتر جوابی ارائه نکرده است، برای این دسته از مسائل فقط نتایج حاصل از الگوریتم آورده شده است.

۷-۳ تنظیم پارامتر α

برای جواب اولیه در الگوریتم ابتکاری از پارامتر α استفاده شده است که تعیین مقدار مناسب برای آن از طریق آزمون سعی و خطا انجام شده است. مقادیر ممکن برای α از صفر شروع شده و با

توجـه به این رابطه ($\alpha_i = \alpha_{i-1} + 0.025$) افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان بار روی هر کمان در محاسبه مصرف سوخت سهم دارد، مقادیر مختلف ضریب α به منظور استفاده از α درصد ظرفیت وسـیله نقلیه در این پایان نامه مورد اسـتفاده قرار گرفته است.

با توجه به جدول (٤) که به مقایسـه نمونه مسـائل با ٥ مشتری به کمک الگوریتم ابتکاری در مقایسه با CPLEX می پردازد، روشن اسـت الگوریتم در ٦ مسئله جوابی برابر و در ٤ مسئله با اختلاف بسـیار ناچیز، جوابی کمتر از CPLEX بدسـت آورده اسـت. جواب‌های خوب به صـورت پررنگ در جداول آمده است. زمان حل بسـیار کوتاه برای این دسـته از مسـائل، کارایی الگوریتم ابتکاری در مقایسه با استفاده از CPLEX را نشان می‌دهد.

جدول (٥) مانند جدول قبل برای نمونه مسـائلی با ١٠ مشـتری می‌باشـد. البته در این دسـته از مسـائل CPLEX در مدت اجرای ٧٢٠٠ ثانیه نتوانسته به بهینگی برسد. الگوریتم ابتکاری در ٩ مسئله جوابی بهتر از CPLEX و تنها در یک مسئله جوابی بزرگتر تولید کرده اسـت. برای این نمونه مسـائل اجرای سـه سـاعتی نرم‌افزار توانسـته جواب‌های بهتری تولید کند، که نتایج آن در جدول (٦) آمده اسـت، این جواب‌ها در مقایسـه با الگوریتم تفاوت چندانی ندارند.

برای نمونه مسـائل با بیشـتر از ٢٠ مشـتری، متوسط نتایج بدست آمده از حل الگوریتم آورده شـده اسـت. نتایج آن در جدول (٧) آمده اسـت زمان حل بسـیار کوتاهی که الگوریتم برای حل این مسـائل صـرف می‌کند نشـان می‌دهد این الگوریتم از نظر زمانی، کارایی مناسـب برای استفاده شدن در زمان‌بندی تولید و توزیع در کترینگ و رستوران‌های بزرگ توزیع‌کننده غذا را دارد.

جدول ٤. مقایسه جواب‌های بدست آمده برای مدل به روش دقیق و الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده برای نمونه مسائل با ٥ مشتری

نمونه مسائل	سیپلکس		الگوریتم ابتکاری				انحراف
	هزینه کل	زمان(ثانیه)	هزینه کل	α	+BT	زمان(ثانیه)	
UK05_01	١١٢,٤١١	٧٢٠٠	٤٦٢,٩٩٩	١	**١١٢,٤١١**	٠,٠٨	٠,٠٠٠
UK05_02	٢١٤,٩٠٦	٧٢٠٠	٣٥٧,٢٨٨	١	٢١٥,٤٤٠	٠,١١	٠,٢٠٠
UK05_03	١٨٦,٤٤٩	٧٢٠٠	٤٩٩,٦٣٥	١	١٨٨,٥٤٠	٠,١٩	٠,٠٠٠
UK05_04	٢١٣,٦٧٠	٧٢٠٠	٤٩٢,٩٧٨	١	٢١٥,٥١٣	٠,٢١	٠,٩٠٠
UK05_05	٤٣,٤٨١	٧٢٠٠	٣٦٢,٤٣١	١	**٤٣,٤٨١**	٠,٢٣	٠,٠٠٠
UK05_06	١٨٦,٥١٣	٧٢٠٠	٣٠٩,٠١٦	١	١٨٨,٢٣١	٠,٢٥	٠,٨٠٠
UK05_07	١٢٧,٥٢٧	٧٢٠٠	٤٣٩,٠٦٩	١	**١٢٧,٥٢٧**	٠,٢٧	٠,٠٠٠
UK05_08	١٣٨,٩١٢	٧٢٠٠	٣٧٧,٢٣٣	١	١٤٣,٥٥١	٠,٢٩	٠,٠٠٠
UK05_09	٥١,٤٩٠	٧٢٠٠	٣٧٨,٩٦١	١	**٥١,٤٩٠**	٠,٣١	٠,٤٠٠
UK05_10	٩٨,٩٦٦	٧٢٠٠	٢٧٨,٤٨١	١	**٩٨,٩٦٦**	٠,٣٣	٠,١٠٠
میانگین	١٢١,٧١٩	٧٢٠٠	٣٧٩,١٢٩	١	**١٢١,٨٤٤**	٠,٣٣٥	٠,٠٠١

جدول ٥. مقایسه جواب‌های بدست آمده برای مدل به روش دقیق و الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده برای نمونه مسائل با ١٠ مشتری(٢ساعت اجرا)

نمونه مسائل	سیپلکس		الگوریتم ابتکاری				انحراف
	هزینه کل	زمان(ثانیه)	هزینه کل	α	+BT	زمان(ثانیه)	
UK10_01	۲۵۱,۲۱٤	۷۲۰۰	٤٦۹,۵۲٤	۰,۸۲۵	**۲۳۷,٤۵۸**	۰,۰٤۲	۰,٦۷۰
UK10_02	۳٦۵,۵٤۰	۷۲۰۰	۷٦٤,۷٦۹	۰,۸	**۳۵۲,۳۳۸**	۰,۰۷	۰,۳٦۰
UK10_03	۳۳۰,۳۷۵	۷۲۰۰	۷۹۷,۲۷۵	۱	۳۳۲,٦۷۵	۰,۱۵۹	-۰,۷۰۰
UK10_04	۲٦۲,٤۲۷	۷۲۰۰	۸۱۰,۵۹۰	۱	**۲۵۵,۷٤۵**	۰,۲٤۹	۰,۲۵۰
UK10_05	۲۹۵,۵۷۸	۷۲۰۰	٦٤۳,۷۷۰	۱	**۱۸۲,٤۲۳**	۰,۲۷۸	۳,۸۳۰
UK10_06	٤۷۹,۱۹۲	۷۲۰۰	۷۷۳,۳۷٤	۰,۸۲۵	**٤٦٤,۷۹۱**	۰,۳۳٤	۰,۳۹۰
UK10_07	۲٦٦,۷۵۲	۷۲۰۰	۸۹۲,۸۷۱	۱	**۲٦۷,۳۳۸**	۰,٤٦٤	۰,۹۰۰
UK10_08	۱۹۲,۸۹۰	۷۲۰۰	۷۰۵,۱۷٦	۰,۹۲۵	**۱٦۱,۳۵۳**	۰,۵۱۲	۱,٦۳۰
UK10_09	۱۸۹,۱۸۷	۷۲۰۰	۵٤۹,۲۰۷	۱	**۱۷۸,۹۸۰**	۰,۵۳۷	۰,۵٤۰
UK10_10	۳۵۰,۱۱۳	۷۲۰۰	۵۹۱,٤۸۱	۱	**۲۸۱,٤۱۵**	۰,٦۲	۱,۹٦۰
میانگین	۲۹۸,۳۲۷	۷۲۰۰	٦۹۹,۸۰٤	۰,۹۳	۲۷۰,۸۵۲	۰,۳۲۷	۰,۰۹٦

جدول ٦. مقایسه جواب‌های بدست آمده برای مدل به روش دقیق و الگوریتم ابتکاری بهبود دهنده برای نمونه مسائل با ۱۰ مشتری (۳ساعت اجرا)

نمونه مسائل	سیپلکس		الگوریتم ابتکاری				انحراف
	هزینه کل	زمان(ثانیه)	هزینه کل	α	+BT	زمان(ثانیه)	
UK10_01	۱۸۱,۲٦۰	۱۰۸۰۰	٤٦۹,۵۲٤	۰,۸۲۵	**۲۳۷,٤۵۸**	۰,۰٤۲	-۲,۹۳۰
UK10_02	۳۵٦,۵٤۰	۱۰۸۰۰	۷٦٤,۷٦۹	۰,۸	**۳۵۲,۳۳۸**	۰,۰۷	۰,۳٦۰
UK10_03	۳۲۸,۲۹۳	۱۰۸۰۰	۷۹۷,۲۷۵	۱	۳۳۲,٦۷۵	۰,۱۵۹	-۰,۱۳۰
UK10_04	۲٦۲,٤۲۷	۱۰۸۰۰	۸۱۰,۵۹۰	۱	**۲۵۵,۷٤۵**	۰,۲٤۹	۰,۲۵۰
UK10_05	۲۹۵,۵۷۸	۱۰۸۰۰	٦۳۱,۷۷۰	۱	**۱۸۲,٤۲۳**	۰,۲۷۸	۳,۸۳۰
UK10_06	٤۵۹,۱۹۲	۱۰۸۰۰	۷۷۳,۳۷٤	۰,۸۲۵	**٤٦٤,۷۹۱**	۰,۳۳٤	-۰,۱۲۰
UK10_07	۲٦۳,۷۸۸	۱۰۸۰۰	۸۹۲,۸۷۱	۱	**۲٦۷,۳۳۸**	۰,٤٦٤	-۰,۰۲۰
UK10_08	۱۷۸,۲۷۱	۱۰۸۰۰	۷۰۵,۱۷٦	۰,۹۲۵	**۱٦۱,۳۵۳**	۰,۵۱۲	۰,۹۵۰
UK10_09	۱٦۸,۱٤۵	۱۰۸۰۰	۵٤۹,۲۰۷	۱	**۱۷۸,۹۸۰**	۰,۵۳۷	-۰,٦٤۰
UK10_10	۲۸۱,٤۱۵	۱۰۸۰۰	۵۹۱,٤۸۱	۱	**۲۸۱,٤۱۵**	۰,٦۲	۰,۰۰۰
میانگین	۲۷۸,۳۹۱	۱۰۸۰۰	٦۹۹,۸۰٤	۰,۹۳	۲۷۰,۸۵۲	۰,۳۲۷	۰,۱۵۰

جدول ۷. متوسط جواب‌های بدست آمده برای الگوریتم ابتکاری برای همه نمونه مسائل

نمونه مسائل	هزینه کل	+BT	زمان(ثانیه)
UK005_avg	۳۷۹,۱۲۹	۱۲۱,۸٤٤	۰,۳۳٥
UK010_avg	٦۹۹,۸۰٤	۲۷۰,۸٥۲	۰,۳۲۷
UK020_avg	۱۳٤۳,۳٦۷	٥۲۱,۷۹۳	۰,۷٥٦
UK025_avg	۷٤۹,٤٥۰	٦۰۸,۳۱٥	۰,۷۱٦
UK050_avg	۲۱٥۸,٥۳۸	۱۰۳٥,٦۲۳	۰,۸۲٥
UK075_avg	۲٤۸۹,٥۷٦	۲۰۹٦,٤۰٤	۰,۹٤۰
UK100_avg	۳۳٥۲,۱۱۸	۲٦۲۸,۰٦٦	۱,۲٥۰
UK200_avg	٤۳٦۲,۱۳۸	۳٥۲۷,۰۲٦	۳,۲٥۰

۸. حل مثال عددی و تحلیل نتایج آن

۸-۱ بررسی اثر سرعت و بار در میزان مصرف سوخت

برای بررسی اثر سرعت و بار وسیله نقلیه بر مصرف سوخت درکنار برآورده کردن هدف ثانویه که کاهش دیرکرد و زودکرد در تحویل تقاضای مشتریان است، در این قسمت مسائل متفاوت در سایز کوچک طراحی و حل و نتایج آن تحلیل شده است. این نتایج در جدول (۸) نشان داده شده است. ستون اول شماره مسئله را نشان می‌دهد و ستون دوم و سوم به ترتیب تعداد مشتریان و تعداد وسائل نقلیه را نشان می‌دهد. ستون‌های بعدی به ترتیب کل هزینه‌های مدل هزینه مصرف سوخت و هزینه‌های دیرکرد و زودکرد را نشان می‌دهد

جدول ۸. نتایج محاسباتی

	تعداد		هزینه ها		
نمونه	مشتری	وسیله نقلیه	کل تابع هدف	مصرف سوخت	دیرکرد زودکرد
۱	٥	۲	۱۱,۰٦۷	٦,۹۳۰	٤,۱۳۷
۲	٥	۳	۱۱,۰٦۷	٦,۹۳۰	٤,۱۳۷
۳	٦	۲	۱۳,٤٤۸	۸,۲۱۳	٥,۲۳٥
٤	٦	۳	۱۱,۱۰۷	۷,٦۱۷	۳,٤۹۰
٥	٦	٤	۱۲,۰۰۷	۷,٦۱۷	۳,٤۹۰
٦	۷	۲	۱۸,۷۲	۱۰,۷۹٤	۷,۹۲٦
۷	۷	۳	۱٥,٦۲٦	۹,۹۲۳	٥,۷۰۳
۸	۷	٤	۱٦,٥۲٦	۹,۹۲۳	٥,۷۰۳

نتایج حاصل نشان می‌دهد اضافه شدن تعداد وسائل حمل‌ونقل باعث بهبود عملکرد مدل می‌شود. از آنجاییکه مصرف سوخت با بار وسیله نقلیه ارتباط مستقیم دارد، این ارتباط تاثیر خود را بر روی میزان مصرف سوخت نشان می‌دهد و هر چه تعداد وسائل حمل‌ونقل زیاد می‌شود جریان بار بر روی این وسائل کم می‌شود که منجر به کاهش مصرف سوخت در هر وسیله می‌شود. از طرفی استفاده از وسائل نقلیه بیشتر میزان هزینه‌های دیرکرد را کاهش می‌دهد. اما این افزایش تعداد وسیله تا تعدادی معین، اثرات مثبتی بر عملکرد تابع هدف مربوط به مصرف سوخت دارد؛ به طور مثال اگر نمونه مسئله شماره (٤) با تعداد بیشتری وسیله حل شود مقدار هزینه‌های مصرف سوخت ثابت می‌ماند اما کل هزینه‌ها به دلیل افزایش هزینه‌های ثابت استفاده از وسیله نقلیه، افزایش می‌یابد.

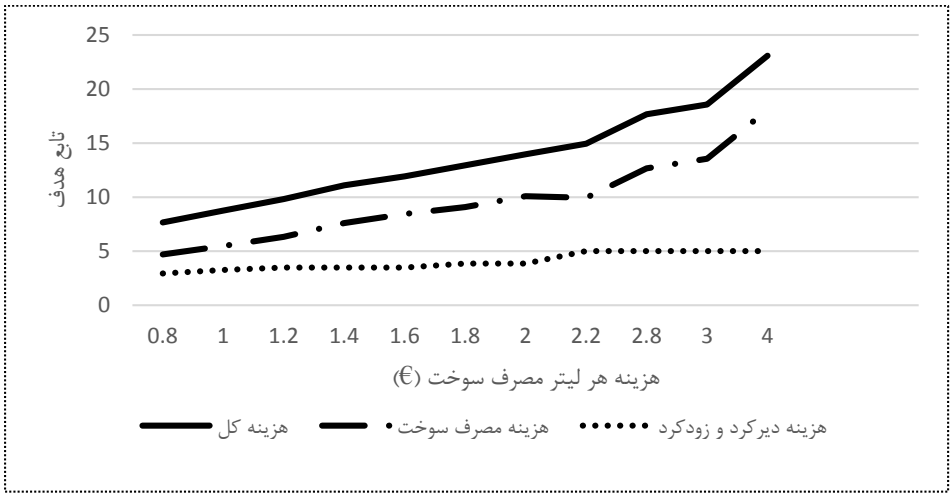
۸-۲ بررسی اثر قیمت سوخت بر هزینه‌های دیرکرد و زودکرد

شکل (٥) نمودار تغییرات تابع هدف در برابر تغییرات قیمت سوخت برای نمونه مسئله شماره ٤ است. این شکل نشان می دهد که تابع هزینه‌های مربوط به دیرکرد و زودکرد نسبت به تغییرات قیمت سوخت حساس نبوده و با شیب خیلی کمی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر نوسان در قیمت سوخت، تابع مربوط به حداکثرسازی رضایت مشتری را تحت تاثیر خود قرار نمی‌دهد. با استفاده از این نحوه مدل‌سازی در سازمان‌های تولیدکننده و توزیع‌کننده، برای مقابله با افزایش هزینه‌ها در شرایط بالارفتن قیمت سوخت نیاز است تا تصمیم‌ها بیشتر متوجه کم کردن مصرف سوخت باشد. یکی از سیاست‌هایی که برای کم کردن مصرف سوخت، در وسیله نقلیه مورد استفاده در سیستم توزیع، شناسایی عوامل موثر در تابع مصرف سوخت می‌باشد.

۸-۳ بررسی پارامترهای موثر در مدل محاسبه مصرف سوخت

در تابع مصرف سوخت پارامترهای متفاوتی وجود دارد که تعیین مقادیر آنها بر عملکرد این تابع تاثیر می‌گذارد. میزان مصرف سوخت در انتخاب سطوح سرعت برای وسیله نقلیه مهم است. سطح سرعت انتخاب شده نیز بر روی تابع زمان‌بندی وسیله نقلیه اثر می‌گذارد. در ادامه تحلیلی بر روی مقادیر این پارامترها انجام می‌شود. از میان این پارامترها تعداد دور موتور(N)، حجم موتور(V)، وزن وسیله نقلیه (w، دو نوع وسیله با وزن ٥٦٤٠ و ٦٣٥٠ کیلوگرم انتخاب شده است)، مساحت جلویی وسیله نقلیه(A) و بازدهی موتور وسیله نقلیه (η) برای تحلیل انتخاب شده است. جدول (٩) نتایج عددی این تحلیل را نشان می‌دهد. این تحلیل بر روی مسئله شماره (٤) در قسمت (٨.٣) انجام شده است.

از مقایسه نتایج حاصل از حل دو مسئله ٤,١ و ٤,٩ نتیجه می‌شود که افزایش وزن وسیله نقلیه میزان مصرف سوخت را ٨,٥ درصد افزایش می‌دهد. در حالی که این افزایش وزن تاثیری روی سطوح سرعت انتخاب شده ندارد، این نتیجه از ثابت ماندن هزینه زمان‌بندی مدل حاصل می‌شود. از مقایسه مسئله ٤,١و ٤,٦ نتیجه می‌شود که افزایش مساحت جلویی وسیله نقلیه باعث افزایش حدود ٢درصد در تابع هدف می‌شود که سهم تابع زمان‌بندی در این افزایش بیشتر است.



شکل۵. تغییر هزینه ها در برابر تغییرات قیمت سوخت

جدول ۹. تحلیل پارامترهای موثر در تابع مصرف سوخت بر روی مسئله شماره (٤)

مسئله	N	V	w	A	η	کل تابع هزینه	هزینه‌های مصرف سوخت	هزینه دیرکرد و زودکرد
٤,١	٣٣	٥	٥٦٤٠	٣,٩١	٠,٩	١٠,٨٨	٧,٣٩	٣,٤٩
٤,٢	١٦	٢	٥٦٤٠	٢,١٠	٠,٤	١٢,٦٨	٨,٨٢	٣,٨٦
٤,٣	١٦	٥	٥٦٤٠	٣,٩١	٠,٩	١٠,٠٨	٦,٥٩	٣,٤٩
٤,٤	٣٣	٣	٥٦٤٠	٣,٩١	٠,٩	١٠,٢٦	٦,٧٧	٣,٤٩
٤,٥	٣٣	٥	٥٦٤٠	٣,٩١	٠,٥	١٤,٩٥	٩,٩٤	٥,٠١
٤,٦	٣٣	٥	٥٦٤٠	٥,٦١	٠,٩	١٢,٧٣	٧,٧٢	٥,٠١
٤,٧	٤٨	٨	٥٦٤٠	٥,٦١	٠,٩	١٤,٦١	١٠,٧٤	٣,٨٦
٤,٨	٣٣	٥	٥٦٤٠	٢,١٠	٠,٩	٨,٨٨	٥,٩٨	٢,٨٩
٤,٩	٣٣	٥	٦٣٥٠	٣,٩١	٠,٩	١١,١٠	٧,٦١	٣,٤٩
٤,١٠	١٦	٢	٦٣٥٠	٢,١٠	٠,٤	١٣,٢٠	٩,٣٣	٣,٨٦
٤,١١	٣٣	٥	٦٣٥٠	٥,٦١	٠,٩	١٢,٧٣	٧,٧٢	٥,٠١
٤,١٢	٤٨	٥	٦٣٥٠	٣,٩١	٠,٩	١١,٨٠	٨,٣١	٣,٤٩
٤,١٣	٣٣	٨	٦٣٥٠	٣,٩١	٠,٩	١٢,٠٣	٨,٥٤	٣,٤٩
٤,١٤	٤٨	٨	٦٣٥٠	٥,٦١	٠,٩	١٤,٨٤	١٠,٩٧	٣,٨٦
٤,١٥	٣٣	٨	٦٣٥٠	٢,١٠	٠,٩	٩,١٠	٦,٢١	٢,٨٩

به عبارت دیگر افزایش مساحت جلویی وسیله نقلیه باعث بروز تاثیر بر روی انتخاب سطوح سرعت می‌شود؛ در نتیجه مقدار هزینه‌های زمان‌بندی را افزایش می‌دهد. از مقایسه مسئله ٤,١ و ٤,٥ نتیجه می‌شود کاهش میزان بازدهی موتور نیز تاثیر قابل توجهی در افزایش هزینه‌های مصرف سوخت و زمان‌بندی دارد. از مقایسه مسئله ٤,٩ با مسائل ٤,١٢و٤,١٣ معلوم می‌شود افزایش تعداد دور موتور و یا حجم موتور تاثیری بر میزان هزینه‌های زمانبندی ندارد و هزینه های مصرف سوخت را کمی افزایش می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد استفاده از وسائل نقلیه دارای سطح جلویی کم و بازدهی بالا و وزن کمتر برای این سیستم توزیع مناسب تر بوده ومنجر به کاهش هزینه‌های مصرف سوخت و هزینه‌های زمانبندی به صورت همزمان می‌شود.

۹. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این پژوهش یک مدل ریاضی جدید برای مسئله زمان‌بندی و مسیریابی طراحی و ارائه شده است. با توجه به اهمیت مسئله آلودگی هوا این مدل به گونه ای طراحی شده است که سازگار با محیط‌زیست باشد. از طرفی با اعمال کردن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد در تابع هدف مسئله، مدل سعی دارد رضایت مشتریان در این زنجیره‌تأمین را افزایش دهد. یکی دیگر از نوآوری‌های مدل استفاده از سیستم توزیع چند سفری بود که با توجه به محدودیت سازمان‌ها و سیستم‌های توزیع کننده در داشتن وسائل نقلیه، مدل را به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند.

در این پژوهش علاوه بر طراحی و ارائه مدل ریاضی ، با طراحی یک الگوریتم ابتکاری به حل آن پرداخته و نتایج حل الگوریتم با جواب‌های بهینه بدست آمده از نرم‌افزار بهینه‌سازی ILOG CPLEX12.3، کارایی الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه زمان‌های بسیار طولانی نرم افزار برای حل مدل، الگوریتم کارایی مناسبی برای حل مدل دارد. از آنجایی‌که مثال موردی برای این پژوهش می‌تواند یک رستوران و یا کترینگ بزرگ توزیع‌کننده غذا به افراد و سازمان‌ها باشد، لازم است ابتدای هر روز برای نحوه زمان‌بندی تولید و توزیع غذا برنامه‌ریزی شود. پس زمان حل کوتاه برای این الگوریتم ابتکاری امتیاز بسیار مهمی محسوب می‌شود.

این مدل می‌تواند برای تمامی سازمان‌های تولیدکننده و توزیع‌کننده توسعه داده شده و مورد استفاده قرار بگیرد. برای مثال می‌توان تولیدکنندگان لبنیات را که مثال زد که تقاضای روزانه مشتریان را تولید نموده و در یک دوره کاری توزیع آن باید انجام گیرد. در این مثال موعد تحویل برای تمامی تقاضا می‌تواند یکسان فرض شود.

۱۰. پی‌نوشت‌ها

1. Supply Chain
2. Routing vehicle problem
3. Parallel machine
4. Time window
5. Due date
6. Pollution routing problem
7. Routing whit multiple trips
8. E-groceries
9. A comprehensive modal emission model
10. The engine power module
11. The engine speed module
12. The fuel rate module
13. Sub tour
14. Heuristic algorithm
15. Batch
16. Swap in batch
17. Swap in batch
18. Remove – Insertion
19. Buffer Time

۱۱.مراجع

-بهشـــتی نیا، م.، فیض، د. و ســـدادی، ف. (۱۳۹۷) "یکپارچگی مسـئله مسیریابی وسایل نقلیه با زمان‌بندی حمل و نقل و تولید در زنجیره تأمین". فصـلنامه علمی- پژوهشـی مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره چهارم،۵۴۹-۵۷۰

-علینقیان، م. و نادری پور، م. (۱۳۹٦) "کاهش مصـرف سـوخت در مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ترافیک شهری، مطالعه موردی: یک شـرکت توزیع در اصـفهان"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره سوم،ص. ۴۹۹-۵۲۲

-ذگردی، ح. و بهشتی نیا، م. (۱۳۸۸) "یکپارچگی زمانبندی حمل و نقـل در زنجیره تـأمین با وســـائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره سوم، ص.۲۳۳-۲٤٤.

-تـوکـلی مقـدم، ر.، یزدانی، م. و ملاعلیزاده زواردهی، ص. (۱۳۹۱) "زمـان‌بنـدی یکپـارچـه تولید و حمل هوایی در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن زمان های آماده‌ســازی وابســته به توالی"، نشـریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره سوم، ص. ۳۵۲-۳٦۲.

-جمیلی، ن و رنجبر، م. (۱۳۹۵) "زمانبندی یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین"، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره بیست و هفتم، شماره چهارم، ص. ۵۲۹-۵٤٦.

-نوروزی، ن، رزمی، ج. و عمـل نیـک، م. (۱۳۹۱) "مســـئله مسـیریابی وسـائط نقلیه با هدف کاهش سوخت مصرفی و تعداد وســـائط نقلیه توســـط الگوریتم بهبود یافته بهینه ســـازی انبوه ذرات"، نشـریه تخصـصـی مهندسـی صنایع، شماره یک، ص. ۱۰۵-۱۱۲.

-Barth, M., Younglove T. and Scora G., (2005) "Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model", California Berkeley Technical report, UC Partners for Advanced Transit and Highways (PATH).

-Cakici, E, Mason S.J. and Kurz, M. E. (2012) "Multi-objective analysis of an integrated supply chain scheduling problem", International Journal of Production Research, Vol.50, No.2, pp. 2624–2638.

-Chang C.-T. and Chang C.-C. (2000) "A linearization method for mixed 0–1 polynomial programs", Computers and Operations Research, Vol. .27, pp.1005-1016.

-Cheikh, M., Ratli M., Mkaouar O. and Jarboui B. (2015) "A variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with multiple trips", Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 47, pp. 277–284.

-Cheng, T. C. E. and Kahlbacher, H. G. (1993) "Scheduling with delivery and earliness penalties", Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 10, No, 2, pp 145–152.

-Chen, Z. and Vairaktarakis, G. (2014) "Integrated scheduling of production and distribution operations", Management Science, Vol. 51, No. 4, pp. 12-22.

-Demir, E., Bektas, T. and Laporte, G. (2012) "An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem", European Journal of Operational Research, Vol. 223, pp. 346–359.

-Demir, E., Bektas, T. and Laporte, G. (2011) "A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation", Transportation Research Part D, Vol.16, pp. 347–357.

-Fleischmann, B. (1990) “The vehicle routing problem with multiple use of vehicles”, Working Paper, University Hamburg Germany.

-Francois .V, Arda .Y, Crama .Y. and Laporte .G. (2016) “large neighborhood search for multi-trip vehicle routing” European Journal of Operational Research (in press)

-Kara, I., Laporte, G. and Bektas, T. (2004) “A note on the lifted Miller-Tucker-Zemlin sub tour elimination constraints for capacitated vehicle routing problem”, European Journal of Operation Research, Vol.158, pp.793-795.

-Labatt, S. and White, R. R. (2011) “Carbon finance: the financial implications of climate change”, London: John Wiley & Sons.

-Marufuzzaman M. and Ekşioğlu, Hernandez R. (2014) “Environmentally friendly supply chain planning and design for biodiesel production via wastewater sludge”, Transportation Science, Vol. 48, pp. 555-574.

-Miller, C. E., Tucker, A. W. and Zemlin, R. A. (1960) “Integer programming formulations and traveling salesman problems”, Journal of the Association for Computing Machinery Vol.7, pp.326–329

-Palmer, A. (2007) “The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles”, PhD Thesis, supervisor: Dr John Towriss, School of Management, Cranfield University

-Turkensteen, M. (2017) “The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing”, European Journal of Operational Research, pp1-35.

-Ullrich, Ch. A. (2013) “Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows”, European Journal of Operational Research, Vol. 227, pp.152–165.

-Wang, Z., Liang, W. and Hu X. (2014) “A metaheuristic based on a pool of routes for the vehicle routing problem with multiple trips and time windows”, Journal of the Operational Research Society, Vol. 65, pp.37–48

-Wassn, N., Wassan, N., Nagi, C. and Salhi, S. (2016) “The multiple trip vehicle routing problem with backhauls: formulation and a two-level variable neighborhood search” , Computers & Operations Research, Vol. 78, pp.454-467

An Integrated Model and a Solution Method for Production Scheduling and Vehicle Routing in a Two-Stage Supply Chain to Reduce Fuel Consumption

S. B. Fathi, MSc. Grad., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

F. Dehghanian, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

E-mail: f.dehghanian@um.ac.ir

Abstract

Presently, the world faces two challenges of fuel shortage and the reduction of environmental emissions due to the growing population and consequently increased fuel consumption in the manufacturing and transportation systems. Hence, the adoption of solutions that can reduce fuel consumption in these organizations is unavoidable. This paper presents a new mathematical model for integrating scheduling and routing problems in a two-stage supply chain. Vehicles can distribute the demands between customers in a multi-trip manner in which each vehicle has to be used multiple times. Vehicles, in this supply chain, are considered as multi-trip. In other words, in each period, any vehicle can be used several times. The model considers the effect of vehicle weight, speed and technical characteristic on its fuel consumption. The goal of the problem is to determine the optimal sequence of production, routing, and determination of the transmission speed in each distribution path by vehicles in order to minimize fuel consumption costs and lateness and earliness costs. A mathematical model for this problem is presented and an innovative heuristic solution algorithm is also introduced. The efficiency of the solution algorithm is examined through extensive numerical experiments. The results indicate that the production sequence, customer order distribution and vehicle speed can have a significant impact on fuel consumption. Finally, the results of the analysis of numerical examples and managerial insights are presented.

Keywords: vehicle routing, fuel consumption, speed, production sequence, customer order distribution

سیده بتول فتحی، فرزاد دهقانیان

سیده بتول فتحی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی بیرجند و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمان‌بندی، مسیریابی و زنجیره‌تأمین است.

فرزاد دهقانیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم وصنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت زنجیره تامین و توسعه پایدار بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه فردوسی مشهد است.