بهینه‌سازی چند هدفه مسئله مسیریابی و زمانبندی سبز وسایل نقلیه ناهمگون با عرضه و تقاضای احتمالی

مقاله علمی – پژوهشی

یاسر زروک، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، مازندران، ایران
جواد رضائیان*، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، مازندران، ایران
ایرج مهدوی، استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، مازندران، ایران
مسعود یقینی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: : j.rezaeian@ustmb.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵
صفحه ۲۰-۱

چکیده

همواره یکی از مسائل مهم در مدیریت زنجیره تامین ، مسئله مسیر یابی و زمان بندی وسایل نقلیه بوده است که تاکنون بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته شده است. در این مقاله سعی شده تا مسیریابی و زمانبندی بهینه برای یک سیستم حمل و نقل ناهمگون با عرضه و تقاضای تصادفی مشتریان و با در نظرگیری شرایط ترافیکی متنوع، حداکثر زمان رانندگی مستمر رانندگان و محدودیت بازه زمانی تحویل تقاضای مشتریان و با رویکرد بهینه سازی، مصرف انرژی و حداکثر سازی رضایتمندی مشتریان برای اولین بار ارایه گردد. بدواً این مسئله در قالب یک مدل ریاضی خطی چندهدفه جدید ارایه و سپس با رویکرد ادغامی پیشنهادی که ترکیبی از روش‌های برنامه‌ریزی احتمالی مقید و برنامه‌ریزی آرمانی بوده با یک مسئله عددی حل گردیده و نتایج با تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفته و میزان تاثیر پارمترهای مسئله بر توابع هدف نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، پنجره زمانی سرویس‌دهی، خستگی راننده، مسیریابی و زمان بندی سبز، وسایل نقلیه ناهمگون

۱-مقدمه

مسئله مسیر یابی وسایل حمل و نقل از جمله مسائلی است که از دیرباز تاکنون بشر با آن درگیر بوده، از آنجایی که بشر ابتدا جای سکونت دائمی نداشته همواره جهت جابجایی به دنبال راحت‌ترین مسیر بوده است با وجود گذشت زمان و پیشرفت بشر در زمینه‌های مختلف، مسئله مسیریابی همچنان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه با گسترش راه‌ها و ایجاد روش‌های مختلف حمل و نقل این مسئله پیچیده‌تر از گذشته گردیده است. از طرفی یکی از مهمترین نگرانی‌های جامعه جهانی طبق آمار کمیته بین المللی تغییرات آب و هوایی، تغییراتی است که بواسطه گازهای گلخانه‌ای در جو ایجاد می‌شود. یکی از موثرترین این گازها، گاز دی اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت های فسیلی در سیستم های حمل و نقل می باشد که طبق آخرین آمار منتشره از آژانس محافظت از محیط زیست آمریکا، ۲۶ درصد از کل آلاینده منواکسیدکربن منتشره در جو، ناشی از سیستم‌های حمل و نقل بوده است. همچنین طبق آخرین آمار منتشره از سازمان هواشناسی ایران حدود ۸۵ درصد از آلاینده‌های محیطی در کلان شهر تهران از سیستم های حمل و نقل زمینی، هوایی و ریلی می‌باشد، این

درحالی است که به دلیل کمبود منابع سوخت‌های فسیلی، بهینه سازی در مصرف انرژی از یک طرف و کاهش آلاینده های ناشی از مصرف این منابع از سوی دیگر منجر به انجام مطالعات گسترده در حوزه بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش گازهای آلاینده ناشی از آن در مسائل حمل و نقل شده است که اصطلاحا مسائل مسیر یابی وسایل نقلیه سبز نامیده می‌شوند. زمان بندی در مسئله مسیر یابی وسایل حمل و نقل از جمله دیگر دغدغه‌های مهم محققان در سال های اخیر بوده است تا بتوان در یک برنامه زمانی بهینه به تقاضای مشتریان پاسخ داد در این مطالعه زمانبندی در سفرها بگونه‌ای مد نظر قرار گرفته که با تامین تقاضاهای مشتریان در بازه زمانی تعیین شده ،برنامه زمانی مناسب جهت استراحت راننده با توجه به محدودیت حداکثر زمان رانندگی مستمر رانندگان درنظر گرفته شود. اکثر مطالعات پیشین، حرکت بدون توقف در مسیر را بعنوان یک فرض اصلی تعریف می کنند ، این در حالی است که در این مطالعه محدودیت زمانی دسترسی به رانندگان به دلیل خستگی و نیاز به استراحت که منجر به توقف در طول مسیر اعم از گره‌ها و یال‌ها می‌گردد، مفروض است. ورود عدم قطعیت در فضای مسئله مسیریابی در سال‌های اخیر منجر به نزدیک‌تر شدن این دسته از مسائل به دنیای واقعی شده که بسیار هم مورد توجه محققان قرار گرفته است از جمله پارامترهایی که با عدم قطعیت در اینگونه مسائل در نظر گرفته شده میتوان اشاره داشت به تقاضای مشتریان، زمان سفر، بازه زمانی تحویل و ... ، در این مطالعه علاوه بر تصادفی بودن تقاضای مشتریان برای اولین بار امکان عرضه در مکان مشتریان نیز وجود داشته که از توزیع احتمالی مشخصی پیروی می‌کند. بنابراین، مسئله مورد مطالعه، ارائه مدلی جامع با هدف تخصیص بهینه مجموعه ای از وسایل نقلیه ناهمگون (از نظر: ظرفیت، نرخ مصرف انرژی و ضریب خستگی راننده) به رانندگان و بارگیری بهینه و تامین تقاضای احتمالی مشتریان در پنجره های زمانی تعیین شده، با توجه به عرضه احتمالی در هریک از نقاط شبکه از طریق مسیری مناسب با یک برنامه توقف مناسب جهت استراحت به موقع برای راننده در طول سفر و همچنین زمان بندی مناسب برای زمان شروع سفر با توجه به شرایط ترافیکی هر مسیر با استفاده از روش های برنامه ریزی تصادفی چند هدفه بوده به طوری که یک توازن صحیح بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی صورت پذیرد.

قابل ذکر است انگیزه اصلی برای مطالعه این تحقیق از سیستم‌های حمل و نقل پستی، سیستم‌های حمل و نقل در میادین تره بار و پایانه های حمل و نقل مسافربری نشات گرفته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

مسئله مسیریابی وسیله حمل و نقل ابتدا در سال ۱۹۵۹ توسط دانزیگ و رامزر معرفی شد (Dantzig and Ramser, 1959) و با گذشت زمان کاربردهای متنوعی از آن توسط محققان ارائه گردید که مروری بر انواع مدل ها و الگوریتم های حمل و نقل را میتوان در مراجع(Golden et al.,2008; Toth and Vigo, 2002 and 2014; Laporte et al., 2000; Laporte, 1992; Burak et al., 2009) مطالعه نمود. از جمله موضوعاتی که امروزه مورد توجه محققان و دوست داران زیست محیطی قرار گرفته بهینه سازی مصرف انرژی در سیستم های حمل و نقل و متعاقباً کاهش آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی علی الخصوص گازهای گلخانه ای (GHG) است برای مطالعه بیشتر در این زمینه می‌توان به مراجع (Rodrigue et al.,2013; Demir et al., 2014; Eglese et al., 2014) رجوع نمود. نقطه تمایز اکثر این مطالعات در مورد تابع هدف سبز و وابستگی آن به عوامل متعدد می باشد از قبیل: شرایط ترافیکی و سرعت وسیله نقلیه که توسط (Kuo,2010) و (Woensel et al., 2001) مطالعه شده و یا وزن محموله حمل شده توسط وسیله نقلیه که در مراجع (Demir et al., 2011; Xiaoet al., 2012; Defra, 2012; Imdat et al., 2007) اشاره شده و یا هر دو عامل که در مراجع (Xiao and Konak, 2016; Kontovas, 2014) بررسی گردیده است. در این مطالعه تابع مصرف انرژی هم وابسته به عامل سرعت و هم عامل وزن بار وسایل نقلیه در نظرگرفته شده است. (Bodin and Golden, 1981) برای اولین بار مسئله زمان بندی و مسیریابی وسایل نقلیه را ارائه دادند که علاوه بر تعیین مسیر بهینه، توالی و زمان بندی حرکت وسایل نقلیه نیز در این مطالعه تعیین شده بود، به دنبال آن (Solomon, 1983) اولین مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای این مسئله با محدودیت پنجره زمانی جهت سرویس دهی به مشتری ارایه کرد که بعدها این مسئله با روش های ابتکاری و فرا ابتکاری در مطالعات (Christofides et al., 1979; Solomon, 1987; Garcia et al., 1994; Ioannou et al., 2001; Malandraki, 1989; Landeghem, 1988; Thangiah, 1995; Vidal et al., 2013) بررسی شده است. مسئله قبل با درنظرگیری مدت زمان سفر وابسته به زمان شروع سفر با نماد TD-VRSPTW نمایش داده می‌شود که یک مسئله توسعه یافته از مسئله فوق است. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط این مسئله اولین بار توسط (Garcia et al., 1994) و (Thangiah, 1995) ارایه گردید که جهت مطالعه بیشتر میتوان به مرجع (Vidal et al., 2013) رجوع کرد. بنابراین، از دیدگاه زمان بندی ، این مقاله یک مسئله برنامه‌ریزی زمان بندی شبکه حمل و نقل بوده و در شرایطی در نظر گرفته که بازه زمانی سرویس دهی از پیش تعیین شده برای هر مشتری مشخص و شرایط ترافیکی بصورت سناریوهای متفاوت، روی مدت زمان و سرعت سفر موثر می‌باشد. از طرفی دیگر با مروری که بر اکثر مسائل مسیریابی و زمان بندی وسایل نقلیه انجام شد مشاهده گردید که وسایل نقلیه و رانندگان همواره بدون هیچ محدودیتی در دسترس بوده در صورتیکه در دنیای واقعی این چنین نمی‌باشد به عنوان مثال به دلیل خستگی و محدودیت حداکثر توان راننده در رانندگی و نیاز مبرم به استراحت ممکن است همواره شرایط برقراری سیستم مهیا نباشد. لذا، با مشاهده چنین خلاءای در پیشینه تحقیق در این مطالعه سعی شده تا محدودیت دسترسی راننده به دلیل نیاز به استراحت و قابلیت استراحت راننده در طول مسیر، لحاظ و بررسی گردد. دیگر جوانب مورد بررسی در مسائل مسیریابی، نوع وسایل نقلیه مورد استفاده در سیستم های حمل و نقل می باشد که در این مطالعه از وسایل نقلیه نا همگون استفاده شده است، مسئله حمل و نقل با وسایل نقلیه نا همگون اولین بار توسط (Golden et al., 1984)، که در آن وسایل نقلیه فقط از نظر ظرفیت باربری متفاوت لحاظ شده بودند. در این مطالعه وسایل نقلیه نه تنها از نظر حداکثر ظرفیت باربری و نرخ مصرف انرژی (نرخ آلایندگی) بلکه از نظر ضریب موثر خستگی روی راننده نیز برای اولین بار به صورت ناهمگون در نظر گرفته می‌شوند. در مورد روش‌های حل مسائل مسیریابی و زمان بندی وسایل حمل و نقل (VRSP) تکنیک‌های بهینه سازی متنوعی ارایه شده که (Guo et al., 2017) به دو دسته کلی تقسیم بندی نموده اند: دسته اول روش های دقیق و ابتکاری می‌باشند که معمولاً جهت حل مسائل کوچک بکار می‌روند (Forbes et al., 1994; Franceschetti et al., 2013; Hachemi et al., 2013) و دسته دوم ، از آنجایی که مسائل VRSP ذاتاً جز مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی NP-Hard بوده با افزایش ابعاد مسئله روش‌های قبلی کارآمد نخواهند بود، روش‌های فراابتکاری جهت دست‌یابی به حل‌های نزدیک به بهینه و یا گاهاً حل‌های بهینه بوده اند.(Zegordi and Beheshti nia, 2009). با بررسی در ادبیات موضوع مشاهده شد که عمدتاً در مسائل مسیریابی تقاضای مشتریان در ابتدا مشخص شده که مسیریابی جهت برآورده نمودن تقاضاهای قطعی صورت می‌پذیرد ولی بعضاً در برخی مطالعات تقاضای مشتریان نامشخص (تصادفی) بوده که پس از مسیریابی و رسیدن وسیله نقلیه به مشتری تقاضای مشتری مشخص می‌شود که در این حالت مسیریابی بر اساس توزیع احتمالی تقاضای مشتریان انجام می شود و سعی در برآورد نمودن تقاضای مشتریان در راستای بهینه‌سازی ارزش انتظاری توابع هدف با روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی می‌شود. اولین مطالعات در حوزه مسئله مسیریابی با تقاضاهای تصادفی مشتریان (VRPSD) توسط (Dror et al., 1989) انجام شد. سپس (Gendreau et al., 1996) به توسعه موضوع و اهمیت آن پرداختند. در بحث عرضه و تامین تقاضای مشتریان، اکثر مسائل کلاسیک VRP بصورت تامین تقاضا تنها از یک منبع مطرح شده و بعدها در انواع دیگر مسائل VRP بصورت چند منبعی بررسی گردیده است (Bae and Moon, 2016; Bae et al., 2007; Allahyari et al., 2015). ولی در دنیای واقعی تامین و عرضه بشکل‌های دیگری هم ممکن می‌باشد از قبیل تامین تقاضا در طول مسیر و امکان عرضه در هر یک از نقاط شبکه حمل و نقل در چندین مطالعه به آن پرداخته شده است (Parragh et al., 2008a, b) که تحت عنوان مسائل مسیریابی با قابلیت جمع‌آوری و تحویل نامگذاری شده با توجه به موارد اشاره شده عرضه و تقاضا به صورت همزمان در نقاط شبکه به صورت احتمالی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از اینرو در این مقاله سعی بر جبران این خلاء گریده است، انگیزه اصلی این مسئله از شبکه‌های باربری میادین تره‌بار، ترمینال‌های مسافربری و شبکه‌های حمل و نقل پستی سرچشمه می‌گیرد به عبارتی دیگر با در نظر گیری ناوگان حمل و نقل در میادین تره‌بار، از یک پایگاه اصلی وسایل نقلیه عازم مسیرهای می‌شوند و در هر شهر از مسیر با عرضه یک محصول خاص روبرو شده که

مختص آن شهر بوده و بارگیری باید به گونه‌ای صورت پـذیرد که تقاضای این محصول در دیگر شهرها به بهترین شکل تامین گردد، تمامی مقادیر عرضه و تقاضا تصـادفی بـوده و وسـایل نقلیه پس از ملاقات با تعدادی شهرها دوباره به پایگاه اصلی بر می‌گردند. مطالعاتی که در گذشـته بـر روی مسـئله مسـیریابی وسایل حمل و نقل بـا تقاضـای تصـادفی انجـام شـده عمـدتاً رویکرد حل شـان در یکـی از سـه دسـته، برنامـه‌ریـزی مفیـد احتمالی (Stewart and Golden, 1983; Cock et al., 1992)، بهینـــه ســـازی مجـــدد (Psaraftis, 1995; Bertsimas, 1992; Secomandi and Margot, 2009; Novoa and Storer, 2009) و بهینه‌سازی پیشـین (قیاسـی) جـای مـی‌گیرنـد (Campbell and Thomas, 2008). در ایـــن مطالعـــه اســـتفاده از رویکـــرد ترکیبـــی از برنامه‌ریزی احتمالی مقید و برنامه‌ریزی آرمانی مد نظر می‌باشد که سعی بر این است با تبدیل مسئله احتمالی به مسئله قطعـی، ارزش انتظاری توابع هدف بهینه گردد. به طـوری کـه احتمـال نقض محدودیت‌ها بیشتر از یک ارزش مرزی نشود.

۳-مدل ریاضی

در این بخش مسئله مد نظر در قالب مدل ریاضی نمایش داده می‌شود، در ایـن راسـتا بـدواً بـه معرفـی مسـاله، مفروضـات، مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترهـا و متغیرهـای تصـادفی مسـئله پرداخته می‌شود:

مسئله مد نظر در این مطالعه، مسیریابی و زمان بندی مجموعـه ای از k وسیله نقلیه ناهمگون در گراف شبکه حمل و نقـل G با N شهر بوده که تمامی وسایل از یک شـهر بـه عنـوان انبـار مرکزی خارج و پس از طی نمودن یک مسیر غیر تکـراری از چندین شهر دوباره به انبار مرکزی باز می گردند، به طوری که مفروضات ذیل برقرار باشند:

-منظور از وسایل نقلیه ناهمگون این است که هر نـوع ماشـین مشخصه هـای مخـتص بخـود از قبیـل: حـداکثر ظرفیـت بـار (کیلومتر) و نرخ مصرف سوخت به ازای هر کیلومتر (کیلـومتر بر لیتر) و ضریب موثر در خستگی راننده را دارد.

-هر شهر غیر از depot یک محصول مختص به خود آن شهر را عرضه می کند ولی می‌تواند تقاضـاهایی بـرای محصـولات مختلف سایر شهرها را داشته باشد.

-عرضه و تقاضا در تمامی گره‌های شبکه احتمالی فرض شـده است.

-هر وسیله نقلیه قادر به حمل همزمـان محصـولات شـهرهایی است که از آن می‌گذرد.

-تمـام راننـدگان بـا گذشـت زمـان راننـدگی دچـار خسـتگی می‌شوند.

-مسیر دارای سناریوهای متفاوت ترافیکی در ساعات مختلـف شبانه روز می‌باشد.

-خستگی راننده به مدت راننـدگی (شـرایط ترافیکـی) و نـوع وسیله نقلیه وابسته است.

مدت زمان استراحت راننده مقدار ثابتی است که با رسیدن بـه آستانه خسـتگی راننـده، هـم در $node$ و هـم در طـول یـال، می‌تواند توقف جهت استراحت راننده اتفاق بیافتد.

-سرعت وسیله نقلیه در طول هـر کمـان از مسـیر وابسـته بـه عواملی چون شرایط ترافیکی مسـیر در زمـان حرکـت وسـیله می‌باشد.

-میزان مصرف سوخت هر وسیله نقلیه وابسته به عواملی چون: وزن محموله و سرعت حرکت می‌باشد.

-طول مدت سرویس دهی به مشتری i ناچیز بوده ولی باید در بازه زمانی مشخص محموله به مشتری برسـد کـه در صـورت خروج از ایـن بـازه زمـانی جریمـه لحـاظ مـی‌گـردد. (Soft Time-window servicing)

گراف شبکه حمل و نقل با تعداد نقاط و کمان های مشخص	$G=(N,V), N=\{0,1,2,\dots,n\}, V=\{(i,j)\|i,j\epsilon N\}$
اندیس وسایل نقلیه ناهمگون	$K=\{1,2,\dots,k\}$
اندیس سناریوهای ترافیکی	$S=\{\{1,2,\dots,s\}\}$
اندیس محصولات	$i',i''\epsilon N\backslash 0$
سرعت وسیله نقلیه نوع k در سناریو ترافیکی s	V_{ks}
حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه نوعk	C_k
وزن وسایل نقلیه نوعk	γ_k
ضریب خستگی رانندگی با وسیله نقلیه نوع k در سناریوی ترافیکی s	$\vartheta_{ks}\geq 1$

تعریف	نماد
پارامترهای مربوط به مشخصه‌های وسیله نقلیه نوع k	α_k ، β_k و φ_k
تقاضای تصادفی مشتری i برای محصول i'	$D_{ii'} \quad \forall i \in N\backslash 0, i \neq i'$
عرضه تصادفی محصول i' در نقطه i	$SU_{ii'} \quad \forall i' = i \in N\backslash 0$
جریمه هر واحد زمانی دیرکرد در تحویل هر واحد تقاضای مشتری i	t_i
جریمه هر واحد زمانی زودکرد در تحویل هر واحد تقاضای مشتری i	e_i
مجموعه محصولاتی که وسیله نقلیه k از انبار اصلی تا شهر i می‌تواند حمل کند	P_{ik}
پنجره زمانی مجاز جهت سرویس‌دهی به تقاضای مشتری i	$[s_i, f_i]$
مسافت بین دو نقطه i و j	d_{ij}
مدت زمان استراحت مورد نیاز راننده جهت رفع خستگی	R
حداکثر زمان مجاز رانندگی مستمر	U
عدد مثبت بزرگ	M

متغییرهای تصمیم وابسته

تعریف	نماد
تعداد دفعات استراحت در مسیر i به j با وسیله نقلیه نوع k در سناریوی ترافیکی s	H_{ijks}
زمان طی نمودن مسیر i به j با وسیله k در سناریو s	t_{ijks}
زمان رسیدن به نقطه i	$\tau_i \geq 0 \quad \forall i \in N\backslash 0, \tau_0 = 0$
مدت زمان زودکرد و دیرکرد در سرویس دهی به نقطه i	$E_i, T_i \geq 0$
حداکثر نسبت تقاضای برآورده نشده مشتری‌ها	B_{max}

متغیرهای تصمیم مستقل:

تعریف	نماد
چنانچه وسیله نقلیه نوع k در سناریو ترافیکی s محصول i' را در مسیر i به j حمل کند متغییر برابر ۱ در غیر اینصورت برابر ۰ می باشد	$X_{ijs}^{ki'} = 0$ or 1 $\quad \forall i, j, k, s; i' \in P_{ik}$
میزان محصول حمل شده i' در مسیر i به j توسط وسیله نقلیه نوع k در سناریو ترافیکی s	$Y_{ijs}^{ki'} \geq 0 \quad \forall i, j, k, s; i' \in P_{ik}$

مدل ریاضی

توابع هدف

(۱)

$$min\ Z_1 = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_s \{(\alpha_k . V_{ks}^{-1} + \beta_k . V_{ks}^2 + \gamma_k). X_{ijs}^{ki'} + \varphi_k . \sum_{i'} Y_{ijs}^{ki'}\}. d_{ij}$$

(۲)

$$min\ Z_2 = \sum_i (e_i . E_i + t_i . T_i)$$

(۳)

$$min\ Z_3 = B_{max} \quad ; \quad B_{max} \geq \frac{\sum_{i'} (D_{ii'} - \sum_j \sum_k \sum_s Y_{jis}^{ki'})}{\sum_{i'} (D_{ii'})} \qquad \forall i \in N\backslash 0$$

محدودیت‌ها:

St:

$$\sum_j \sum_k \sum_s X_{ijs}^{ki'} = 1 \qquad \forall i \in N\backslash 0, \forall i' \in P_{ik} \tag{۴}$$

$$\sum_i \sum_k \sum_s X_{ijs}^{ki'} = 1 \qquad \forall j \in N\backslash 0, \forall i' \in P_{ik} \tag{۵}$$

(٦)

$$\sum_j \sum_s X_{0js}^{ki'} \leq 1 \qquad \forall k; i' \in \{\emptyset\}$$

$$\sum_{i' \in P_{ik}} Y_{ijs}^{ki'} \leq C_k \quad \forall i, j, k, s \tag{۷}$$

(۸ و ۹)

$$\sum_{j}\sum_{i'}\sum_{k}\sum_{s} X_{jis}^{ki'} - \sum_{j}\sum_{i''}\sum_{k}\sum_{s} X_{ijs}^{ki''} = 0 \quad \forall i\,;\ i' \in P_{jk};\ i'' \in P_{ik}$$

$$\sum_{j}\sum_{k}\sum_{s} Y_{jis}^{ki'} - \sum_{j}\sum_{k}\sum_{s} Y_{ijs}^{ki'} \le D_{ii'} - SU_{ii'} \quad \forall i \in N\backslash 0\ ,\ \forall i' \in P_{jk}$$

$$X_{ijs}^{ki'} \le Y_{ijs}^{ki'} \qquad \forall i,j,k,s,\ \forall\, i' \in P_{ik} \tag{۱۰}$$

$$Y_{ijs}^{ki'} \le X_{ijs}^{ki'}.\,C_k \qquad \forall i,j,k,s,\ \forall i' \in P_{ik} \tag{۱۱}$$

$$\tau_j \ge (\tau_i + t_{ijks}) - \left(1 - X_{ijs}^{ki'}\right).\,M \quad \forall i,j,k,s\ ,\ \ \forall i' \in P_{ik} \tag{۱۲}$$

$$\tau_j \le (\tau_i + t_{ijks}) + \left(1 - X_{ijs}^{ki'}\right).\,M \quad \forall i,j,k,s,\ \forall\, i' \in P_{ik}$$

$$t_{ijks} = \frac{d_{ij}}{V_{ks}} + R.\,H_{ijks} \qquad \forall i,j,k,s \tag{۱۳ و ۱۴}$$

تابع هدف اول حداقل سازی مصرف انرژی را نشان می‌دهد که در این تابع هدف ضرایب α_k ، β_k و φ_k مربوط به مشخصه‌های وسیله نقلیه نوع k می‌باشد. توابع هدف دوم و سوم مربوط به رضایتمندی مشتریان بوده که هدف دوم از طریق حداقل سازی جرایم ناشی از زودکرد و دیرکرد در تحویل تقاضای مشتریان و هدف سوم از طریق حداقل سازی نسبت حداکثر تقاضاهای برآورده نشده مشتریان به جلب رضایت مشتری می پردازد. مجموعه محدودیت‌های شماره‌های ٤و ٥ تضمین می کنند تا هر نقطه تقاضا از هر محصولی تنها توسط یک ماشین در یک سناریو ترافیکی و از یک نقطه وارد و فقط به یک نقطه خارج گردد. محدودیت شماره ٦ نشان می‌دهد ماشین نوع k یا از انبار اصلی (depot) خارج نمی‌شود و چنانچه خارج گردد تنها به یک نقطه اعزام می‌گردد. محدودیت شماره ۷ از بارگیری بیش از حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه ممانعت به عمل می‌آورد. مجموعه محدودیت‌های شماره ۸ تضمین کننده آن است که ماشین‌های ورودی و خروجی به هر نقطه با هم برابر است. محدودیت

$$H_{ijks} = \left\lfloor \frac{\left(\frac{d_{ij}.\,\vartheta_{ks}}{V_{ks}}\right) + \left(\frac{d_{j',i}.\,\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.\,U} - \left\lfloor \frac{d_{j',i}.\,\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.\,U} \right\rfloor\right).\,U}{U} \right\rfloor .\,X_{j'i\,s'}^{ki''}.\,X_{i} \in N\backslash 0 \qquad i'' \in P_{j'k};\ \ i' \in P_{ik}$$

$$H_{0jks} = \left\lfloor \frac{d_{0j}.\,\vartheta_{ks}}{V_{ks}U} \right\rfloor .\,X_{0js}^{ki'}$$

$$\tau_i + E_i \ge s_i \quad \forall i \in N\backslash 0 \tag{۱۵}$$

$$\tau_i - T_i \le f_i \qquad \forall i \in N\backslash 0 \tag{۱۶}$$

$$\sum_{i\in F}\sum_{j\in F}\sum_{s} X_{ijs}^{ki'} \le \sum_{i\in F}\sum_{j\in F}\sum_{s} X_{ijs}^{ki'} - 1 \quad \forall F \subset N;\, 2 \le |F| \le \sum_{i}\sum_{j}\sum_{s} X_{ijs}^{ki'}\ ,\forall k, \forall i' \in P_{ik} \tag{۱۷}$$

شماره ۹ نشان می‌دهد در هر نقطه به غیر از depot اختلاف مقدار ورودی از یک محصول نسبت به خروجی همان محصول حداکثر برابر است با اختلاف میزان تقاضا نسبت به عرضه آن محصول در آن نقطه مد نظر. محدودیت‌های شماره‌های ۱۰ و ۱۱ رابطه بین دو متغییر اصلی مسئله را نشان می‌دهند. مجموعه محدودیت‌های ۱۲ زمان رسیدن به نقطه j را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۳ زمان پیمودن مسیر i به j را در سناریو s با وسیله نوع k نشان می‌دهد.

مجموعه محدودیت‌های شماره ١٤ تعداد دفعات استراحت راننده در طول مسیر i به j را با ماشین نوع k و سناریو ترافیکی s محاسبه می نمایند. محدودیت‌های ۱۵ و ۱٦ میزان خروج از پنجره زمانی سرویس‌دهی به مشتری i را با توجه به تابع هدف دوم نشان می‌دهد و مجموعه محدودیت‌های شماره ۱۷ جهت ممانعت از ایجاد sub-tour ها در مسیر وسایل نقلیه می‌باشد.

خطی‌سازی مدل

محدودیت شماره ۱۴ محدودیت غیر خطی این مدل بوده که با جایگزینی متغییر $Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'}$ بجای ضرب دو متغییر $X^{ki''}_{j'i\,s'}$ و $X^{ki'}_{ijs}$ بصورت مجموعه محدودیت های ۱۴.۱و۱۴,۲و۱۴,۳ قابل خطی سازی می‌باشد. بنابراین، می‌توان با جایگزینی و ادغام محدودیت‌های ۱۲،۱۳و (۱۴.۱و۱۴,۲و۱۴,۳) با محدودیت (۱۸)، مدل ریاضی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

مدل ریاضی خطی:

معادلات ۱– ۱۱

معادلات۱۵– ۱۸

(۱-۱۴)

$$H_{ijks} = \left\lfloor \frac{\left(\frac{d_{ij}.\vartheta_{ks}}{V_{ks}}\right) + \left(\frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} - \left\lfloor \frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} \right\rfloor\right).U}{U} \right\rfloor . Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'} \qquad \forall j',j,k,s,s',i \in N\backslash 0;\ \ i'' \in P_{j'k};\ \ i' \in P_{ik}$$

(۱۴-۲) و (۱۴-۳)

$$Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'} + 1 \geq X^{ki''}_{j'i\,s'} + X^{ki'}_{ijs} \qquad \forall i \in N\backslash 0, j',j,k,s,s';\ \ i'' \in P_{j'k};\ \ i' \in P_{ik}$$

$$2Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'} \leq X^{ki''}_{j'i\,s'} + X^{ki'}_{ijs} \qquad \forall i \in N\backslash 0, j',j,k,s,s';\ \ i'' \in P_{j'k};\ \ i' \in P_{ik}$$

(۱۸)

$$\begin{cases} \tau_j \geq \left(\tau_i + \frac{d_{ij}}{V_{ks}} + R.\left\lfloor \frac{\left(\frac{d_{ij}.\vartheta_{ks}}{V_{ks}}\right) + \left(\frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} - \left\lfloor \frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} \right\rfloor\right).U}{U} \right\rfloor . Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'}\right) - \left(1 - X^{ki'}_{ijs}\right).M \\ \qquad \forall j',i,j,k,s,s',\ \forall i' \in P_{ik},\ \forall i'' \in P_{j'k} \\ \tau_j \leq \left(\tau_i + \frac{d_{ij}}{V_{ks}} + R.\left\lfloor \frac{\left(\frac{d_{ij}.\vartheta_{ks}}{V_{ks}}\right) + \left(\frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} - \left\lfloor \frac{d_{j',i}.\vartheta_{ks'}}{V_{ks'}.U} \right\rfloor\right).U}{U} \right\rfloor . Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'}\right) + \left(1 - X^{ki'}_{ijs}\right).M \\ \qquad \forall j',i,j,k,s,s',\ \forall i' \in P_{ik},\ \forall i'' \in P_{j'k} \\ Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'} + 1 \geq X^{ki''}_{j'i\,s'} + X^{ki'}_{ijs} \qquad \forall i,j',j,k,s,s',\ \forall i'' \in P_{j'k},\ \forall i' \in P_{ik} \\ 2Q^{k\,i''\,i'}_{j'ijss'} \leq X^{ki''}_{j'i\,s'} + X^{ki'}_{ijs} \qquad \forall i,j',j,k,s,s',\ \forall i'' \in P_{j'k},\ \forall i' \in P_{ik} \end{cases}$$

۴-رویکرد حل پیشنهادی

مسائل بهینه سازی چند هدفه که به معنی بهینه‌سازی همزمان K تعداد تابع هدف متناقض، مشروط به برقراری محدودیت‌های S می‌باشد را در حالت کلی با نماد ذیل نشان می دهند:

(۱۹)

$$\begin{aligned} &Min\{f_1(x), \dots, f_k(x)\} \\ &s.t \\ &\qquad x \in S \end{aligned}$$

روش‌های بهینه سازی چنین مسائلی به ۲ دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند.

-روش‌های استقرایی با رویکردهای عددی از قبیل: روش های وزنی،$\varepsilon -$ constraint و برنامه ریزی آرمانی.

-روش های استقرایی با رویکرد چند هدفه از قبیل: NSGAII و NRGA

در روش‌های گروه اول فضای مسئله به یک فضای اسکالر تبدیل می‌شود. به این روش‌ها، وزن دهی قبل از حل نیز گفته می‌شود. در این روش‌ها تصمیم گیری در مورد ترجیحات توابع هدف، قبل از جستجوی فضای جواب ارایه می‌شوند و معمولاً وزن‌ها توسط کارشناسان این زمینه تعریف می‌شوند جوابها کاملاً تحت تأثیر کارشناسان قرار دارند. توابع هدف با روش‌های مختلف به یک تابع هدف اسکالر تبدیل شده و مسئله به صورت تک هدفه حل می‌شود. در این روش‌ها برای به دست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌های مؤثر لازم است الگوریتم به دفعات حل شود و در هر بار اجرا بایستی جواب جدیدی به دست آید. در گروه دوم از روش‌ها مسئله بصورت

چند هدفه حل، تصمیم گیرنده بعد از محاسبه جواب‌های پارتو (نامغلوب) بنا بـه تشـخیص و نظـر خـودش در سـطح بـالاتر جواب بهینه نهایی را انتخاب می‌کند. به این روش‌ها وزن دهی بعد از حل نیز گفته مـی‌شـود. در ایـن مقالـه مسـئله مـد نظـر بصورت چند هدفه با اهداف حداقل سـازی مصـرف سـوخت (هدف اول) و حداکثرسازی رضایتمندی مشتریان (هـدف دوم و سوم) می‌باشد از دیگر ویژگی‌های بارز این مطالعه عرضـه و تقاضای تصادفی بوده کـه سـاختار مسـئله را از حالـت قطعـی خارج کرده بنابراین باید به دنبال روش‌هایی جهت بهینه سازی چند هدفه مسئله احتمالی بود. در اینجا از رویکـرد ترکیبـی از روش برنامه‌ریزی آرمانی (GP) و روش برنامه‌ریـزی احتمـالی مقید (CC) بعنوان روش حل مسئله چند هدفه تصادفی استفاده می‌شود:

$$Proposed\ CCGP \left\{ \begin{array}{l} GP \\ CC \end{array} \right.$$

روش فوق را تحت عنوان برنامه ریـزی آرمـانی احتمـالی مقید و با نماد اختصـاری $CCGP$ در ایـن مقالـه از ایـن پـس اشاره خواهد شد. برای توضیح، بدواً یک نمای کلی از مسـئله برنامه ریزی تصادفی چند هدفه نشان داده می‌شود:

(۲۰)

$$Min\ \sum_j c_{ij}x_{ij} \qquad \forall i = 1, \dots, m$$

$$s.t:$$

$$\sum_j a_{kj}x_j \le b_k \qquad \forall k = 1, \dots, k$$

$$x \in S$$

در مـدل فـوق پارامترهـای c_{ij} ، a_{kj} و b_k مـی‌تواننـد تصادفی با توزیع احتمالی معین (در ایـن مقالـه نرمـال فـرض می‌شوند) باشند. از این رو برای هر محدودیت تصادفی kام در سـطح اطمینـان ($1-\alpha_k$) کـه توسـط تصـمیم‌گیرنـده تعیـین می‌شود خواهیم داشت:

(۲۱)

$$prob\left(\sum_j a_{kj}x_j \le b_k\right) \ge \alpha_k \quad \alpha_k \in (0,1)$$

جهت ساده سازی معادله بالا ،$h_k(x)$ به صورت زیـر در نظر گرفته می‌شود که خود یک متغیر تصادفی نرمال با میانگین $\mu\big(h_k(x)\big)$ و انحراف معیار $\sigma\big(h_k(x)\big)$ می‌باشد (با فرض توزیع نرمال برای پارامترهای تصادفی)

(۲۲)

$$h_k(x) = \sum_j a_{kj}x_j - b_k$$

بنابراین، خواهیم داشت:

(۲۳)

$$prob\big(h_k(x) \le 0\big) \ge \alpha_k \quad \alpha_k \in (0,1)$$

$$prob\left(Z \le \frac{-\mu\big(h_k(x)\big)}{\sigma\big(h_k(x)\big)}\right) \ge \alpha_k$$

(۲٤)

(2٥) $F^{-1}(\alpha_k).\,\sigma\big(h_k(x)\big) + \mu\big(h_k(x)\big) \le 0$

محدودیت قطعی‌سازی شده K ام بـر حسـب x بصـورت معادله ۲۵ می‌باشد. سپس هر یـک از توابـع هـدف کـه دارای ضرایب غیر قطعی می باشد قطعی‌سازی می‌گردند، از آنجـایی که در رویکرد برنامه ریزی آرمانی برای هر یک از اهداف یک آرمان (g_i^*) از پیش تعیین شده از سوی تصمیم گیرنده تعریف می‌گردد. بنابراین، برای هر یـک از اهـداف i ام بصـورت زیـر خواهیم داشت:

$$Min \sum_j c_{ij}x_{ij} = g_i^* \qquad (۲۵)$$

طبق قاعده برنامه‌ریزی آرمانی هریک از اهداف را در قالب محدودیت در نظر گرفته و همانند مرحلـه قبـل بصـورت زیـر قطعی‌سازی می‌گردند:

(۲٦)

$$prob\left(\sum_j c_{ij}x_{ij} \le g_i^*\right) \ge \alpha_i \quad \alpha_i \in (0,1)$$

جهت ساده سازی معادله بـالا،$I_i(x)$ را بصـورت زیـر در نظر گرفته کـه خـود یـک متغیـر تصـادفی نرمـال بـا میـانگین $\mu\big(I_i(x)\big)$ و انحراف معیار $\sigma\big(I_i(x)\big)$ می‌باشد:

$$I_i(x) = \sum_j c_{ij}x_{ij} - g_i^* \qquad (۲۷)$$

$$prob\big(I_i(x) \le 0\big) \ge \alpha_i \quad \alpha_i \in (0,1) \qquad (۲۸)$$

(۲۹)

$$prob\left(Z \le \frac{-\mu\big(I_i(x)\big)}{\sigma\big(I_i(x)\big)}\right) \ge \alpha_i$$

(۳۰)

$$F^{-1}(\alpha_i).\sigma\big(I_i(x)\big) + \mu\big(I_i(x)\big) \leq 0 \quad (۳۰)$$

محدودیت قطعی‌سازی شده مربوط به تابع هدف تصادفی i ام معادله ۳۰ بوده که طبق ضوابط روش برنامه‌ریزی آرمانی باید به صورت ذیل نوشته شود:

(۳۱)

$$F^{-1}(\alpha_i).\sigma\big(I_i(x)\big) + \mu\big(I_i(x)\big) + d_i^- = 0$$

چنانچه تابع هدف اولیه مسئله حداکثر سازی بود آنگاه معادله فوق بصورت ذیل در نظر گرفته می‌شود.

(۳۲)

$$F^{-1}(\alpha_i).\sigma\big(I_i(x)\big) + \mu\big(I_i(x)\big) - d_i^+ = 0$$

نحوه برخورد با سایر اهداف قطعی طبق قواعد برنامه ریزی آرمانی خواهد بود. در انتها مدل نهایی رویکرد ادغامی CCGP، بصورت ذیل خواهد بود:

$$Min \ \sum_i d_i^+ + d_i^- \quad (۳۳)$$

$$s.t:$$

$$F^{-1}(\alpha_i).\sigma\big(I_i(x)\big) + \mu\big(I_i(x)\big) - d_i^+ + d_i^- = 0 \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$F^{-1}(\alpha_k).\sigma\big(h_k(x)\big) + \mu\big(h_k(x)\big) \leq 0 \quad \forall k = 1, \dots, k$$

$$x \in S$$

۵-مثال عددی و تحلیل نتایج

در این بخش یک مثال عددی نشان داده می‌شود که با رویکرد CCGP مدل پیشنهادی در نرم افزار LINGO 11 کدنویسی و در کامپیوتری با مشخصات (Laptop 4520s model with Core i3 due CPU, 2.4 GHz ,Windows 7 using 3 GB of RAM) حل گردیده است. برای این مثال یک شبکه حمل و نقل متشکل از ۲ نوع وسیله نقلیه با مشخصات جدول ۱ فرض شده است. دو سناریو ترافیکی light (S_1) و heavy (S_2) ، سرعت و ضریب خستگی وابسته به این سناریوها به شرح جداول ۲ و۳ می‌باشد. شبکه مفروض دارای ٤ نقطه تقاضا و یک قرارگاه مرکزی مطابق تصویر ۱ بوده که پارامترهای مربوط به این نقاط در جداول ٤-٦ ثبت شده است.

مدت زمان استراحت جهت رفع خستگی $R = 20'$ و حداکثر زمان رانندگی مجاز $U = 90'$ و آرمان‌های در نظر گرفته شده برای اهداف برابر 0 می‌باشند. با توجه به تعداد متغیرها و محدودیت‌های مثال عددی در جداول ۷ و ۸ لازم به ذکر است که مسئله پیشنهادی از جمله مسائل پیچیده ترکیباتی بوده حتی در اندازه کوچک (مثال عددی) و حل آن زمان بر می‌باشد و پس از مدت "۳۲٤۰ جواب فوق به دست آمده که ارزش انتظاری توابع هدف برای جواب مسئله مد نظر برابر است با: $Z_1^* = 449{,}575$; $Z_2^* = 13{,}000$ و $Z_3^* = 1$ بوده، بنابراین این رویکرد برای مسائل در اندازه‌های متوسط و بزرگتر کارایی خود را از دست داده و رویکردهای ابتکاری و فرا ابتکاری مورد توجه قرار می‌گیرند. خروجی مثال عددی فوق در قالب جداول ۹ تا ۱۱ و شکل شماره ۱ نشان داده شد.

جدول ۱. پارامترهای مربوط به وسایل نقلیه

	C_k(tons)	φ_k	γ_k(tons)	α_k	β_k
k=۱	10	1	20	1	1
k=۲	2	0.9	3	0.95	0.8

جدول۲. ضریب خستگی

ϑ_{ks}	k=1	k=2
s=1	1.5	1
s=2	2	1.3

جدول ۳. سرعت

V_{ks}	k=1	k=2
s=1	50	90
s=2	30	70

جدول ٤. پارامترهای مربوط به عرضه، جرایم، و پنجره زمانی نقاط

	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$[s_i, f_i]$ دقیقه	[550,650]	[240,500]	[600,700]	[60,180]
e_i	40	50	60	20
t_i	70	50	30	60
SU_i (μ,σ)	(0.5,0.2)	(1,0.5)	(3,1)	(10,2)

جدول ۵. ماتریس متقارن مسافت

d_{ij}	j=0	j=1	j=2	j=3	j=4
i=0	0	50	150	40	110
i=1	50	0	30	40	80
i=2	150	30	0	40	65
i=3	40	40	40	0	35
i=4	110	80	65	35	0

جدول ۶. ماتریس تقاضا

$D_{ii'}(\mu,\sigma)$	i'=1	i'=2	i'=3	i'=4
i=1	–	(1,0.7)	(4,2)	(8,5)
i=2	(2,2)	–	(5,2)	(6,5)
i=3	(1,0.5)	(1,0.5)	–	(4,3)
i=4	(0,0)	(0.5,0.2)	(0.5,0.3)	–

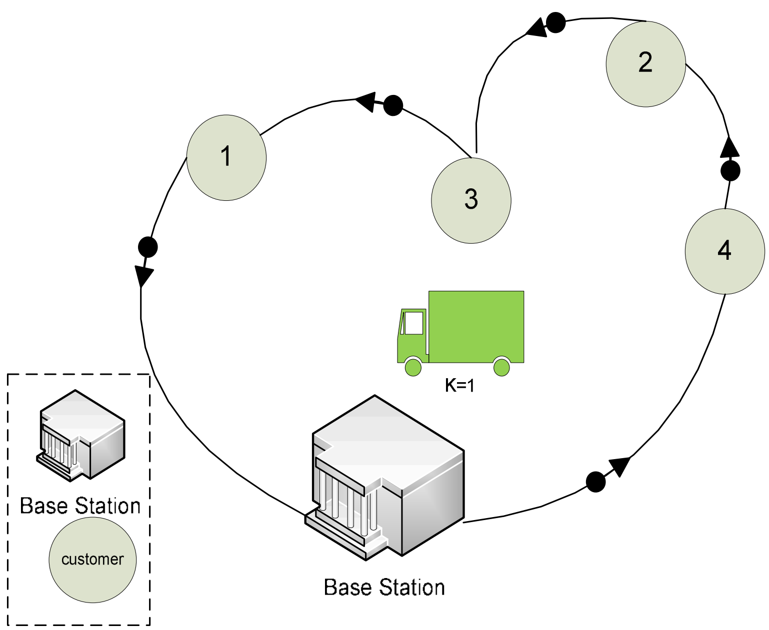

Fig 1: illustration of the example

جدول ۷. تعداد متغیرها در مدل خطی

Variable	Count	Variable	Count
$X_{ijs}^{ki'}$	$N \times (N-1) \times S \times K \times \|P_{ik}\|$	E_i	N
$Y_{ijs}^{ki'}$	$N \times (N-1) \times S \times K \times \|P_{ik}\|$	T_i	N
$Q_{j'ijss'}^{k\,i''\,i'}$	$N \times (N-1) \times (N-2) \times S^2 \times K \times \|P_{ik}\| \times \|P_{j'k}\|$	t_{ijks}	$N \times (N-1) \times S \times K$
τ_i	N	H_{ijks}	$N \times (N-1) \times S \times K$

$$Sum = 3[N] + 2[N \times (N-1) \times S \times K \times |P_{ik}|] + [N \times (N-1) \times (N-2) \times S^2 \times K \times |P_{ik}| \times |P_{j'k}|] + 2[N \times (N-1) \times S \times K]$$

جدول ۸. تعداد محدودیت ها در مدل خطی

Constraint	Count	Constraint	Count
(2-2)	$(N-1)$	(14)	$(N-1)$
(3)	$(N-1) \times \|P_{ik}\|$	(15)	$(N-1)$
(4)	$(N-1) \times \|P_{ik}\|$	(16)	$\sum_{e=2}^{N} \binom{N}{e} \times K \times \|P_{ik}\|$
(5)	K	(17)	$4 \times N \times (N-1) \times (N-2) \times K \times S^2 \times \|P_{ik}\| \times \|P_{j'k}\|$
(6)	$N \times (N-1) \times K \times S$		
(7)	N		
(8)	$(N-1) \times \|P_{jk}\|$		
(9)	$N \times (N-1) \times K \times S \times \|P_{ik}\|$		
(10)	$2 \times N \times (N-1) \times K \times S \times \|P_{ik}\|$		

$$Sum = 3[N-1] + 3[(N-1) \times |P_{ik}|] + K + [N \times (N-1) \times K \times S] + [N] + 3[N \times (N-1) \times K \times S \times |P_{ik}|] + \left[\sum_{e=2}^{N} \binom{N}{e} \times K \times |P_{ik}|\right] + [4 \times N \times (N-1) \times (N-2) \times K \times S^2 \times |P_{ik}| \times |P_{j'k}|]$$

جدول ۹. مقادیر بهینه متغیر X با توجه به ماشین k=1

$X_{ijs}^{1i'}$	*i'=0*					*i'=1*					*i'=2*					*i'=3*					*i'=4*				
S=1	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S=2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

***با توجه به ماشین* k=2**

$X_{ijs}^{2i'}$	*i'=0*					*i'=1*					*i'=2*					*i'=3*					*i'=4*				
S=1	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S=2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

جدول۱۰. مقادیر بهینه متغیر Y با توجه به ماشین k=1

$Y_{ijs}^{1i'}$	*i'=0*					*i'=1*					*i'=2*					*i'=3*					*i'=4*				
S=1	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
S=2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

با توجه به ماشین k=2

$Y_{ijs}^{2i'}$	*i'=0*					*i'=1*					*i'=2*					*i'=3*					*i'=4*				
S=1	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S=2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

جدول ۱۱. مقادیر بهینه متغیر H (موقعیت استراحت راننده در طول سفر)

H_{ijks}			$K=1$					$K=2$		
$S=1$	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
$S=2$	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

تحلیل حساسیت ابزاری جهت تعیین میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر توابع هدف می‌باشد که روشهای نمایش این ابزار می‌توانند به صورت ریاضیاتی و گرافیکی باشد (حسینی و همکارانش، ۱۳۹۳). در این مطالعه سعی می‌شود. به منظور انتخاب استراتژی مناسب جهت بارگیری، مسیریابی و زمانبندی، اثرات پارامترهای ورودی از جمله مدت زمان استراحت راننده جهت رفع خستگی (R)، حداکثر زمان مجاز رانندگی مستمر (U)، میزان تقاضای مشتریان، میزان عرضه محصولات، ویژگی‌های وسایل نقلیه و پنجره‌های زمانی سرویس دهی به مشتریان را بر روی توابع هدف بررسی شود، که نتایج تحلیل حساسیت هر یک از این پارامترها با فرض ثابت بودن سایر پارامترها در جداول۱۲ تا ۱۹ نشان داده شد. همان طوری که نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد تابع هدف اول نسبت به پارامترهای تقاضای مشتریان، عرضه محصولات، وزن، ظرفیت و سرعت وسیله نقلیه بیشترین حساسیت را نشان داده و تابع هدف دوم نسبت به پارامترهای R و پنجره زمانی سرویس‌دهی بیشترین حساسیت را نشان داده و در انتها تابع هدف سوم تنها نسبت به پارامتر تقاضاهای مشتریان واکنش نشان داده است.

جدول۱۲. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر R

پارامتر R	*20’*	*30’*	*40’*	*50’*
Z_1	449,575	449600	448999	449789
Z_{2-1}	13,000	15125	18954	25671
Z_{2-2}	1	1	1	1

جدول۱۳. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر U

پارامتر U	*60’*	*90’*	*120’*	*150’*
Z_1	٤٤٨٩٦٨	449,575	٤٥٠١٠١	٤٥٩٨٣
Z_{2-1}	١٥٢٠٠	13,000	١٢٨٩٥	١١٩٨٧
Z_{2-2}	1	1	1	1

جدول١٤. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر تقاضای احتمالی

پارامتر تقاضای احتمالی	$D_{ii'}(\mu,\sigma)$	$D_{ii'}(\mu,2\sigma)$	$D_{ii'}(\mu,3\sigma)$
Z_1	449,575	٤٦٩٥٢١	٤٤٠٣٩٨
Z_{2-1}	13,000	١٣٠٨٠	١٢٩٦٨
Z_{2-2}	1	٠,٥٢	٠,٨٩

جدول١٥. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر عرضه احتمالی

پارامتر عرضه احتمالی	$SU_i(\mu,\sigma)$	$SU_i(\mu,2\sigma)$	$SU_i(\mu,3\sigma)$
Z_1	449,575	٤٣٠٨٠٠	٤٧١٠٢٠
Z_{2-1}	13,000	١٣١٢٠	١٣٠٩٢
Z_{2-2}	1	1	1

جدول١٦. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر پنجره زمانی سرویس دهی

پنجره زمانی سرویس دهی	$[s_i, f_i]$	$[s_i, 1/2f_i]$	$[s_i, 2f_i]$
Z_1	449,575	٤٥٠١٢٣	٤٥٠٣٢٧
Z_{2-1}	13,000	٢١٥٧٨	٩٨٥١
Z_{2-2}	1	1	1

جدول۱۷. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر وزن وسایل نقلیه

وزن وسایل نقلیه	γ_k	$1/2\gamma_k$	$2\gamma_k$	$3\gamma_k$
Z_1	449,575	۴۳۹۵۴۶	۴۶۵۲۳۱	۴۷۵۶۹۸
Z_{2-1}	13,000	۱۱۹۸۶	۱۳۶۵۴	۱۳۹۹۹
Z_{2-2}	1	1	1	۱

جدول ۱۸. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر ظرفیت وسایل نقلیه

ظرفیت وسایل نقلیه	C_k	$1/2C_k$	$2C_k$	$3C_k$
Z_1	449,575	۴۴۰۲۵۶	۴۵۵۶۴۷	۴۶۱۲۳۵
Z_{2-1}	13,000	۱۲۹۸۶	۱۲۹۹۸	۱۳۰۹۱
Z_{2-2}	1	1	1	۱

جدول۱۹. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پارامتر سرعت وسایل نقلیه

سرعت وسایل نقلیه	V_{ks}	$1/2V_{ks}$	$2V_{ks}$	$3V_{ks}$
Z_1	449,575	۴۵۹۵۵۵	۴۴۸۶۹۸	۴۴۸۰۱۰
Z_{2-1}	13,000	۱۳۵۶۸	۱۲۶۸۹	۱۲۱۲۵
Z_{2-2}	1	1	1	۱

۶-نتیجه گیری

در این مقاله مسئله مسیریابی و زمانبندی بهینه بـرای یـک سیستم حمل و نقل نـاهمگون بـا عرضـه و تقاضـای تصـادفی مشتریان و با در نظر گیری شرایط ترافیکی متنوع، حداکثر زمان رانندگی مستمر راننده، و محدودیت بازه زمانی تحویل تقاضای مشتریان و با رویکرد بهینه سازی چند هدفه، مصرف انـرژی و حداکثر سازی رضایتمندی مشتریان، مورد مطالعه قـرار گرفتـه شد. این مسئله بدواً در قالب یک مدل ریاضی چندهدفـه غیـر خطی ارایه و سپس خطی سازی و با رویکرد ادغامی پیشنهادی که ترکیبی از روش های برنامه ریزی احتمـالی مقیـد و برنامـه ریزی آرمانی بوده حل گردیده و نتایج حل با آنالیز حساسـیت مورد بررسی قرار گرفته تا میزان حساسیت اهـداف نسـبت بـه پارامترهای مسئله تعیـین گـردد. زمینـه هـای متعـددی جهـت توسعه مدل ارایه شده وجود دارد از قبیل در نظر گیری اهداف دیگر و فاکتورهای موثر برای مسئله و در نظرگیری پارامترهای فازی بجای احتمالی جهت مواجهه با عدم قطعیت و همچنـین ارایه راه حل‌ها و الگوریتم های فراابتکاری برای حل مسئله بـا توجه به پیچیدگی محاسباتی بالای مسئله مورد مطالعه که حائز اهمیت می باشند.

۷-مراجع

-حسینی، ز.، اسمعیلی، م.، و قاسمی یقین، ر.، (۱۳۹۳)، "ارایه مدل بهینه سازی چند هدفه برای تصمیمات توام موجودی و قیمت‌گذاری در حالت زمان‌های تدارک احتمالی (نمایی و یکنواخت) با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، مجله تحقیق در عملیات و کاربرد های آن، ۱۱(۱)، ص.۳۱-۴۶.

-Dantzig, G. and Ramser, J., (1959), "The Truck Dispatching Problem", Management Science, 6, pp.80-91.

-Golden, Bruce L., Raghavan, S., Wasil, Edward A., (2008), "The Vehicle Routing Problem", Latest Advances and New Challenges, springer.

-Toth, P and Vigo, D., (2002), “The Vehicle Routing Problem”, SIAM.

-Toth, P and Vigo, D., (2014), “Vehicle Routing: Problems”, Methods, and Applications, Second Edition, SIAM.

-Laporte, G.,Gendreau, M., Potvin, J. Y., Semet, F., (2000), “Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem”, International Transactions in Operational Research,7(4-5), pp.285-300.

-Laporte, G., (1992), “The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms”, European Journal of Operational Research, 59(3), pp.345-358.

congestion", Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, 88, pp.146-166.

-C.A. Kontovas, (2014), "The green ship routing and scheduling problem (GSRSP)", A conceptual approach, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31, pp.61-69.

-L. D. Bodin and B. L. Golden, (1981), "Classification in Vehicle Routing and Scheduling", Networks, 11(2), pp.97-108.

-SOLOMON, M., (1983), "Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms", Ph.D. Dissertation, Dept. of Decision Sciences, University of Pennsylvania.

-Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1979), "The vehicle routing problem", In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi, C. (Eds.), Combinatorial Optimization. Vol. 1. Wiley Interscience, pp. 315–338.

- Solomon, M.M., (1987), "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints", Operations Research, 35, pp.254−265.

- B.-L. Garcia, J.-Y. Potvin, J.-M. Rousseau, (1994), "A parallel implementation of the tabu search heuristic for vehicle routing problems with time window constraints", Computers Ops. Res., 21, pp.1025-1033.

- Ioannou, G., M. Kritikos and G. Prastacos (2001), "A Greedy Look-Ahead Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", Journal of the Operational Research Society, 52, pp.523−537.

- Malandraki, C., (1989), "Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Solution Algorithms and Computational Experiments", Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois.

-Van Landeghem, H.R.G., (1988), "A Bi-criteria Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", European Journal of Operations Research, 36, pp.217−226.

- Sam Thangiah, (1995), "Vehicle routing with time windows using genetic algorithms. In Application Handbook of Genetic Algorithms": CRC Press, Boca Raton, New Frontiers, Volume II, pp.253−277.

-Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C., (2013), "A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows", Computers & Operations

-Burak Eksioglu, Arif Volkan Vural, Arnold Reisman, (2009), "The vehicle routing problem: A taxonomic review", Computers & Industrial Engineering, 57(4), pp.1472-1483.

-Rodrigue, J-P, B. Slack and C. Comtois (2013), "Green Supply Chain Management", in J-P Rodrigue, T. Notteboom and J. Shaw (eds) The Sage Handbook of Transport Studies, London: Sage.

- Demir, E., Bekta¸s, T. e Laporte, G., (2014), "The bi-objective pollution-routing problem", European Journal of Operational Research, v. 232, n. 3, pp. 464 – 478.

- Demir, E., Bekta¸s, T. e Laporte, G., (2014), "A review of recent research on green road freight transportation", European Journal of Operational Research, v. pp.237,775-793.

- R. Eglese, T. Bektaş, "Green vehicle routing In: Toth P., Vigo D. (Eds.), Vehicle Routing: Problems", Methods, and Applications, 18, SIAM (2014), pp. 437-458.

-Yiyo Kuo, (2010) "Using simulated annealing *to* minimize fuel c onsumption for the *t*ime-dependent vehicle routing problem*"*, Computers & Industrial Engineering, 59 (1), pp.157-165.

-Van Woensel, T., Creten, R., & Vandaele, N., (2001), "Managing the environmental externalities of traffic logistic"s: The issue of emissions, Production and Operations Management, 10(2), pp. 207–223.

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

-Y. Xiao, Q. Zhao, I. Kaku, Y. Xu., (2012), "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", Computers & Operations Research, 39, pp.1419-1431.

- Defra, (2012), "Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors for company reporting: methodology paper for emission factors". Technical report, Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK.

-Imdat Kara, Bahar Yetis Kara, M. Kadri Yetis., (2007), "Energy Minimizing Vehicle Routing Problem", International Conference on Combinatorial Optimization and Applications, pp.62-71.

- Xiao, Yiyong and Konak, Abdullah, (2016), "The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic

-Somayeh Allahyari, Majid Salari, Daniele Vigo., (2015), “A hybrid metaheuristic algorithm for the multi-depot covering tour vehicle routing problem″, European Journal of Operational Research, 242 (3), pp.756-768.

- Parragh S, Doerner K, and Hartl R., (2008), “A survey on pickup and delivery problems Part I: Transportation between customers and depot”, Journal für Betriebswirtschaft, 58, pp.21-51.

-Parragh S, Doerner K, and Hartl R., (2008), “A survey on pickup and delivery problems Part II: Transportation between pickup and delivery locations”. Journal für Betriebswirtschaft, 58, pp.81-117.

- Stewart, W. R. and B. L. Golden, (1983), “Stochastic Vehicle Routing: A Comprehensive Approach”, European J. Oper. Res. 14, pp.371-385.

- Cock Bastian and Alexander H. G. Rinnooy Kan., (1992), “The stochastic vehicle routing problem revisited”, European Journal of Operational Research, 56 (3), pp.407-412.

-Psaraftis H.N., (1995), “Dynamic vehicle routing: status and prospect”, Annals of Operations Research, 61, pp.143-164.

- Bertsimas, D. J., (1992), “A vehicle routing problem with stochastic demand”, Oper. Res. 40(3), pp.574–585.

-Nicola Secomandi and François Margot. (2009), “Re-optimization Approaches for the Vehicle-Routing Problem with Stochastic Demands”, Operations Research, 57(1), pp.214-230.

- Clara M. Novoa and Robert Storer, (2009), “An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands”, European Journal of Operational Research, 196(2), pp.509–515.

- Campbell, A. M. and B. W. Thomas, (2008), “Probabilistic traveling salesman problem with deadlines”, Transportation Science, 42 (1), pp.1 – 21.
Research, 40(1), pp.475–489.

-Golden, Assad, Levy, Gheysens, (1984), “The fleet size and mix vehicle routing problem”, Computers & Operations Research, 11, pp.49-66.

- Guo Y.N, Cheng J, Luo S, Gong D.W., (2017), “Robust Dynamic Multi-objective Vehicle Routing Optimization Method”. IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform.

- Forbes, M.A., Holt, J.N. & Watts, A. M. (1994), “An Exact Algorithm for Multiple Depot Bus Scheduling”. European Journal of Operational Research, vol. 72, pp.115- 124.

-A. Franceschetti, D. Honhon, T. Van Woensel, T. Bektas, and G. Laporte, (2013), “The time-dependent pollution-routing problem”, Transportation Research Part B: Methodological, 56, 265–293.

- El Hachemi N, Gendreau M, Rousseau LM (2013), “A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem”, Computers & Operations Research ,40(3), pp.666–673.

- S.H. Zegordi and M.A. Beheshti nia., (2009), “A multi-population genetic algorithm for transportation scheduling”, Transportation Research Part E , 45 (6), pp.946-959.

- M. Dror, G. Laporte, and P. Trudeau., (1989), “Vehicle routing with stochastic demands: properties and solutions frameworks”, Transportation Science, 23, pp.166–176.

-Gendreau, M, G Laporte and R Seguin (1996), “Stochastic vehicle routing”. European Journal of Operational Research, 88, pp.3–12.

-Bae .H, and Moon. I., (2016), “Multi-depot vehicle routing problem with time windows considering delivery and installation vehicles”, Appl. Math. Model, 40, pp.6536–6549.

-Bae T.S., Hwang H.S., Cho G, S., & Goan M.J., (2007), “Integrated GA-VRP solver for multi-depot system”, Computers & Industrial Engineering, 53, pp.233-240.

Multi-Objective Optimization for Green Heterogeneous Vehicle Routing and Scheduling Problem with Stochastic Demand and Supply

Yaser Zarook, Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

Javad Rezaeian, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

Iraj Mahdavi, Professor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

Masoud Yaghini, Associate Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

E-mail : J.rezaeian@ustmb.ac.ir

Received: September 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

One of the important issues in supply chain management, vehicle routing and scheduling problem has always been which has so far attracted considerable attention from researchers. This paper attempts to optimize routing and scheduling for a heterogeneous transportation system with considering stochastic supply and demand, various traffic conditions, maximum continuous driving time constraint and soft time window constraint of each customer delivery. The consideration of pollution in routing decisions gives rise to a new routing framework where measures of the environmental implications are traded off with business performance measures. Also, the aim of this study is to minimize energy consumption and to maximize customer satisfaction, simultaneously. At first, this problem is presented in the form of a multi-objective linear programming model and then a novel integrated approach is proposed based on combination of chance constraint method and goal programming. Finally, the results of numerical example are analyzed with sensitivity analysis.

Keywords: Multi Objective Optimization, Green Routing and Scheduling, Heterogeneous Vehicles, Driver Fatigue, Service Time Window