

بهینه‌سازی چندهدفه مسیریابی حرکت خودرو تحت شرایط عدم قطعیت با تأکید

بر اقدامات سبز-ناب و رضایت مشتری (مورد مطالعه: شرکت شهید پاک)

مقاله پژوهشی

محسن شفیع نیک آبادی^{*}، استادیار، گروه مدیریت تولید و عملیات، دانشکده اقتصاد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

احسان ملایی، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، موسسه آموزش عالی بینالود مشهد، مشهد، ایران

مهسا اخوان راد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی بینالود مشهد، مشهد، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shafiei@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۳/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۱۱۳-۱۳۴

چکیده

با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی توزیع در میان حلقه‌های زنجیره توزیع یک بنگاه اقتصادی، در این پژوهش مسئله مسیریابی ناوگان حمل‌ونقل کالا تحت عنوان مسئله مسیریابی حمل‌ونقل^۱ (VRP) مورد توجه قرار گرفته است. از نوآوری‌های این مدل می‌توان به تعریف جریمه‌ی نقض محدودیت پنجره زمانی (دیرکرد و زود کرد تحویل محصول) در جهت تأمین رضایت مشتری، در نظر گرفتن رابطه‌ی مستقیم وزن و مصرف سوخت که کاهش وزن علاوه بر کاهش هزینه‌ها، باعث کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و کربن‌دی‌اکسید می‌گردد، کاهش هزینه‌های رانندگان که در نهایت موجب کاهش هزینه‌های کل می‌گردد و علاوه بر ناب‌سازی موجب افزایش رضایت مشتری می‌شود، استفاده از مفهوم استوار برای زمان سرویس‌دهی در شرایط متفاوت در حالت چندمحصولی و تغییر در نظر گرفتن هزینه‌های توزیع اشاره کرد. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرکت شهید پاک به‌عنوان مطالعه موردی، عملیات توزیع محصول از انبار به مصرف‌کننده به صورت یک زنجیره تأمین مدل‌سازی می‌گردد. با توجه به NP-HARD بودن این مسئله به منظور پیدا کردن جواب‌های نزدیک بهینه، پس از تنظیم پارامتر به روش جستجوی فراگیر^۲، مدل در حالت تک هدفه و چند هدفه با استفاده از نرم‌افزار پایتون توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲- (NSGAII) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO) حل گردید. در پایان این الگوریتم‌ها با معیارهای ارزیابی عملکرد همچون زمان اجرا و کیفیت جواب‌ها با یکدیگر مقایسه شده و الگوریتم برتر در هر معیار مشخص گردید نتایج حاصل حاکی از کارایی مدل پیشنهادی و برتری استفاده از روش تحلیل استوار نسبت به قطعی هست که منجر به بهینه‌سازی مسیر حمل‌ونقل، کاهش هزینه‌ها و در نهایت رضایت مشتری است و همچنین با مقایسه معیارهای ارزیابی عملکرد و مدت‌زمان اجرای مدل، مشخص گردید که الگوریتم MOPSO نسبت به NSGAII کارا تر هست.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، مسیریابی وسایل نقلیه، رضایت‌مندی مشتریان، رویکرد سبز-ناب، تحلیل استوار

۱-مقدمه

زیادی شرکای تجاری باشد، مشکلاتی طی فرایندهای آن پیش می‌آید. این مشکلات در صورت تأخیر در حل شدن، به نارضایتی مشتریان و از دست دادن فروش منجر می‌گردد و هزینه‌های بالایی را برای رفع شدن، به سازمان تحمیل می‌کند؛ بنابراین شرکت‌ها در کلاس جهانی بسیاری از موفقیت‌هایشان

در سال‌های اخیر زنجیره تأمین به‌عنوان موضوعی جذاب برای مدیران و صاحبان صنایع مبدل گردیده و حیات و ممانت سازمان‌ها و بنگاه‌های اقتصادی در گرو فعالیت در قالب زنجیره‌های درهم‌تنیده تعریف شده است. به دلیل اینکه زنجیره‌های تأمین ممکن است طولانی و پیچیده و شامل تعداد

را به مدیریت زنجیره تأمین نسبت می‌دهند (پویا، ۱۳۸۳). یکی از مسائل مهم در مدیریت زنجیره تأمین، مسئله مسیریابی حرکت خودرو هست. دنتزیگ^۳ و رامسر^۴ (۱۹۵۹)، برای اولین بار مسئله مسیریابی را در قالب یک مسئله مرکزی در حوزه حمل و نقل، توزیع و تدارکات مطرح کردند و برای حل این مسئله یک مدل سازی و الگوریتم ریاضی ارائه کردند. سپس کلارک^۵ و رایت^۶ (۱۹۶۴)، به منظور حل این مسئله رویکرد ابتکاری الگوریتم صرفه جویی را پیشنهاد کردند که به عنوان بهترین روش تولید مسیر شناخته شد و مبنای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت. به طور کلی، در یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، هدف پیدا کردن مجموعه‌ای از مسیرها برای چندین وسیله نقلیه از یک انبار به تعدادی مشتری و برگشتن به انبار، بدون این که محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه نقض شود، با مینیمم هزینه است. چون ترکیب مشتری‌ها محدود نیست، VRP به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیباتی مورد توجه است به طوری که تعداد جواب‌های شدنی برای مسئله به طور نمایی با رشد تعداد مشتری‌ها زیاد می‌شود (بل^۷ و مک مولن^۸، ۲۰۰۴). وجود محدودیت‌های مختلف در این گونه مسائل، انواع مختلفی از مسائل VRP را ایجاد می‌کند، پژوهش‌های جدیدی بانام لجستیک سبز انجام می‌شود که هدف آن‌ها کمینه کردن اثرات مضر حمل و نقل روی محیط زیست است. واضح است که با بهتر شدن برنامه ریزی در سطح عملیاتی، تولید CO2 کاهش می‌یابد (زمانی و علیتیان، ۱۳۹۴). همچنین به صفر رساندن اتلاف منابع و استفاده بهینه از آن‌ها همواره یکی از اهداف اساسی در هر سازمان بوده و هست که در مفهوم ناب‌سازی سازمان به آن به طور ویژه تمرکز شده و به آن جامه عمل پوشانده می‌شود. دیدگاه ناب را می‌توان فلسفه مدیریتی و رهبری نوین سازمان در جهت به صفر رساندن اتلاف منابع و اجرای بهبود مستمر و ارزش آفرینی برای ذینفعان کلیدی محسوب کرد که در این راستا، از ابزارها و فن‌های مختلفی بهره می‌برد. به طور کلی ناب‌سازی، به معنی استفاده از منابع کمتر برای تولید ارزش بیشتر است. از طرفی در محیط رقابتی امروز، سرعت بالای تغییر و تحولات موجب عدم اطمینان در تصمیم‌گیری‌ها می‌شود و پیش‌بینی شرایط آینده را با مشکل مواجه می‌سازد. از جمله رویکردهای جدید و مطمئن جهت حل این مشکل برنامه‌ریزی استوار هست. به صورت خلاصه، می‌توان گفت دنیای امروز به شدت بر پایه

رقابت و خواست و تقاضای مشتری پایه‌گذاری شده است و بسیاری از وظایف مربوط به تأمین تقاضای مشتری، از سطح شرکت و سازمان به سطح زنجیره تأمین منتقل شده است. برای کنترل و تأمین کارای نیاز مشتری، می‌بایست مدیریت زنجیره تأمین به صورت کارا و مؤثر انجام شود. از طرفی در محیط پرقابلیت امروزی، سرعت بالای تغییر و تحولات بر عدم اطمینان و ابهام حاکم بر تصمیم‌گیری‌ها تا حدی افزوده است که سطح بالای عدم اطمینان در زنجیره تأمین، توانایی آن را در پیش‌بینی شرایط آینده با مشکل مواجه می‌کند. لذا به منظور برنامه‌ریزی بهتر و صحیح‌تر باید به برنامه‌ریزی قابل‌اتکا در فضای عدم اطمینان و ابهام پرداخته شود. تحقیق حاضر قصد دارد با استفاده از یک مدل پنج هدفه، حمل و نقل در زنجیره تأمین را، با رویکرد عدم قطعیت مورد بررسی قرار دهد و با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات شاید با بحث در مورد زنجیره تأمین سبز، تنها ممانعت استفاده از مواد شیمیایی سمی خطرناک یا کاهش انتشار آلاینده‌ها یا ضایعات به محیط زیست به اذهان خطور کند، اگرچه این موارد نیز جزو موارد مهم هستند اما اهمیت و مزایای «مدیریت زنجیره تأمین سبز»^۹ یا GSCM محدود به کاهش مصرف مواد سمی خطرناک یا کاهش آلاینده‌های مضر نمی‌شود. می‌توان مزایای انطباق با GSCM را به سه دسته مادی، غیرمادی و احساسی تقسیم کرد. چندهدفه و الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲-، مسیریابی بهینه را پیشنهاد دهد. در این روش مسیریابی که تاکنون در مقالات دیگر مشاهده نشده است، در شرایط عدم اطمینان، محدودیت مربوط به بهینه کردن مصرف سوخت لحاظ خواهد شد که در نظر گرفتن این محدودیت، مسیر بهینه نهایی را در زمره لجستیک سبز و ناب قرار می‌دهد چراکه کاهش مصرف سوخت، موجب کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و کاهش مصرف منابع می‌شود که نتیجه‌ی نهایی را در زمره لجستیک سبز و ناب قرار می‌دهد و همچنین بهینه کردن هزینه رانندگان را در نظر می‌گیرد که موجب ناب‌سازی لجستیک می‌گردد و کاهش مصرف سوخت و ناب‌سازی لجستیک خواهد شد. تحقیق حاضر از جنبه‌های مختلفی نسبت به تحقیقات پیشین دارای نوآوری است که عبارت‌اند از: ۱) ارائه مدل پنج هدفه مسئله، ۲) تعریف جریمه‌ی نقض محدودیت پنجره زمانی (دیرکرد و زود کرد تحویل محصول) در جهت تأمین رضایت

یک مجموعه مدل‌سازی کردند که در آن ستون‌ها نشان‌دهنده‌ی مسیرهای قابل قبول شدنی متناظر با مدارهای ساده در یک گراف چندگانه بودند. هر گره در یک گراف چندگانه نشان‌دهنده‌ی یک مشتری و هر قوس بین دو مشتری نشان‌دهنده‌ی یک مسیر غیرمتمرکز از میان یک مجموعه از ایستگاه‌های سوخت‌گیری مجدد بود که توسط یک وسیله نقلیه در حین عبور مستقیم بین دو مشتری، ملاقات می‌شدند. پژوهشگران مجموعه‌ی فرمول جزء بندی را با اضافه کردن نابرابری‌های معتبر شامل برش‌های k -مسیر، تقویت کردند و روشی برای جداسازی آن‌ها توصیف کردند. آن‌ها نتایج محاسباتی را بر روی نمونه‌های معیاری ارائه کردند که نشان می‌داد این الگوریتم می‌تواند به‌طور بهینه، نمونه‌ها را با تقریباً ۱۱۰ مشتری حل کند. افشار و همکاران (۲۰۱۶)، مسئله‌ی لجستیک سبز را با معیار رضایت مشتری در نظر گرفتند. آن‌ها در این تحقیق، علاوه بر آلودگی‌های زیست‌محیطی، معیار رضایت مشتری را نیز وارد محاسبات کردند و مسئله را به‌صورت یک مسئله‌ی MILP مدل‌سازی کردند.

ژو^{۱۴} و ژای^{۱۵} (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای دانش مربوط به VRP و مسیریابی توزیع فیزیکی، مانند ارتباط بین آن‌ها، نحوه‌ی توصیف مسئله توزیع با VRP، نحوه‌ی ساخت مدل ریاضی و درعین حال اشاره به جهت تحقیق را بررسی کردند. سوبرامانیا^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۷) مسئله‌ی مسیریابی چند دوره‌ای را تحت شرایط عدم اطمینان مطرح کردند که هدف آن تعیین مسیر بهینه، کاهش هزینه و برنامه‌ریزی پویا برای هر دوره و وسایل نقلیه با ظرفیت محدود جهت پوشش دهی تمامی سفارش‌ها مشتریان است. جدول ۱ به‌طور خلاصه، ویژگی‌های مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی مسائل مسیریابی را به همراه خلاصه‌ی تحقیقاتی نشان می‌دهد. با مشاهده‌ی جدول شماره ۱، واضح است که مسئله‌ی چندهدفه‌ی مسیریابی سبز- ناب با تأکید بر رضایت مشتری تحت عدم قطعیت و حل این مسئله با مفروضات و تعریف مسئله در این بخش ابتدا به شرح و فرضیات مسئله پرداخته و سپس مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد. استفاده از الگوریتم MOPSO و NSGA II تاکنون در مطالعات قبلی مشاهده نشده است. مسئله موردنظر قصد دارد مسیریابی حرکت خودرو تحت شرایط عدم قطعیت با تأکید بر اقدامات سبز- ناب و رضایت مشتری بهینه‌سازی نماید. سرویس‌دهی از انبار مرکزی به مشتریان صورت می‌گیرد.

مشتری، ۳) در نظر گرفتن رابطه‌ی مستقیم وزن و مصرف سوخت که کاهش وزن علاوه بر کاهش هزینه‌ها، باعث کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و کربن‌دی‌اکسید می‌گردد، ۴) کاهش هزینه‌های رانندگان که در نهایت موجب کاهش هزینه‌های کل می‌گردد و علاوه بر ناب‌سازی موجب افزایش رضایت مشتری می‌شود. ۵) از مفهوم استوار برای زمان سرویس‌دهی در شرایط متفاوت در حالت چندمحصولی استفاده‌شده است که کمتر موردتوجه قرار گرفته است. ۶) مدل‌های مسیریابی اغلب هزینه‌های توزیع را ثابت و از پیش تعیین شده در نظر می‌گیرند این در حالی است که مصرف سوخت و در نتیجه هزینه‌های توزیع تابعی از میزان بار و متعاقباً ملاقات مشتریان است که در این پژوهش به آن نیز اشاره شده است. ساختار ادامه مطالب بدین صورت است که پس از آشنایی با پیشینه تحقیق در بخش دوم، در بخش سوم مدل ریاضی مسئله موردنظر ارائه می‌شود و برای حل آن در بخش چهارم دو الگوریتم چندهدفه پیشنهاد و عملکرد آن‌ها مقایسه می‌شود. بخش پنجم به بیان نتایج محاسباتی و تحلیل آن‌ها اختصاص یافته و سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که یکی از تحقیقاتی که با موضوع مشابهی انجام شده است، الگوریتم دقیقی است که اندلمین^{۱۱} و بارتولینی^{۱۱} در سال ۲۰۱۷ در مورد مسیریابی وسیله نقلیه به‌صورت سبز، ارائه کردند. در تحقیق حاضر مسئله موردبررسی آن‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بررسی می‌شود که نسبت به الگوریتم آن‌ها، به‌روزتر است. در این تحقیق مواردی مانند رضایت مشتری و همچنین تأثیر وزن بر روی مصرف سوخت در نظر گرفته نشده است. اندلمین و بارتولینی (۲۰۱۷)، یک الگوریتم دقیق برای حل مسئله مسیریابی وسیله حمل و نقل سبز^{۱۱} (G-VRP) پیشنهاد کردند. G-VRP مسیریابی بهینه از یک ناوگان سوخت وسایل نقلیه جایگزین را برای خدمت به مجموعه‌ای از مشتریان پراکنده جغرافیایی مدل می‌کند. خودمختاری سوخت خودرو و ایستگاه احتمالی سوخت‌گیری در مسیر به‌صراحت مدل‌سازی شدند و محدودیت‌های حداکثر بازه زمانی، در هر مسیر خودرو اعمال شد. آن‌ها G-VRP را به‌صورت مسئله‌ی جزء بندی^{۱۳}

نظر گرفته و در نهایت در تابع هدف پنجم به مبحث هزینه دستمزد رانندگان در حالت عادی و اضافه‌کاری پرداخته می‌شود.

برای این مسئله ۵ تابع هدف در نظر گرفته می‌شود، در تابع هدف اول بحث کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل مطرح می‌گردد، در تابع هدف دوم بحث کمینه کردن مسافت موردنظر قرار می‌گیرد، در تابع هدف سوم نارضایتی مشتریان در تخطی از بازه تعیین شده برای سرویس‌دهی بیان می‌گردد، در تابع هدف چهارم بحث هزینه مصرف سوخت نسبت به وزن را در

جدول ۱. مقایسه مطالعات مرتبط انجام شده در حوزه مسیریابی و خلاهای تحقیقاتی آنها

روش حل		مفروضات							تابع هدف			مراجع/سال	
ابتکاری یا فرا ابتکاری	دقیق	تحلیل استوار	فازی	رضایت مشتری	ظرفیت وسیله نقلیه	پنجره زمانی	ناوگان ناهمگن	چند کالایی	چند انباری	کمینه کردن زمان پاسخگویی	کمینه کردن تقاضای برآورده نشده		کمینه کردن هزینه
*					*		*			*			تالاریکو ^۱ ۲۰۱۵
*					*					*			طالبیان و همکاران ۲۰۱۵
*			*	*	*	*				*		*	بارکوئی ^۱ ۲۰۱۵
*					*		*					*	زمانی و علیتیان ۲۰۱۶
			*	*		*							بکشلو و همکاران ۲۰۱۶
*				*	*	*				*	*	*	بشیری و همکاران ۲۰۱۶
*				*								*	دیابات ^۱ و همکاران ۲۰۱۷
*				*								*	الفت و همکاران ۲۰۱۷
*			*			*			*	*		*	اندلمین و بارتولینی ۲۰۱۷
*		*				*		*	*	*	*	*	فتحیان و همکاران ۲۰۱۸
*		*		*	*	*		*	*	*	*	*	این پژوهش

۳- مفروضات و تعریف مسئله

در این بخش ابتدا به شرح و فرضیات مسئله پرداخته و سپس مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد.

-تعدادی محصول مستقل از هم وجود دارند که تأمین‌کننده باید آنها را میان تعدادی عمده‌فروش یا خرده‌فروش با تقاضاهای متفاوت برای هر محصول توزیع کند.
-محصولات فسادپذیری ناچیزی دارند که در اینجا صفر در نظر گرفته می‌شود.

-اگر تقاضای هر مشتری در پنجره‌ی زمانی از پیش تعیین‌شده‌ای تأمین نگردد، تأمین‌کننده موظف است جریمه‌ی دیرکرد یا زود کرد زیادی را به آنها بپردازد.

۳-۱- مفروضات مدل

فرضیات مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مسیریابی حرکت خودرو تحت شرایط عدم قطعیت با تأکید بر اقدامات سبز-تاب و رضایت مشتری به صورت زیر تعریف می‌گردد:

S_k هزینه دستمزد در ساعات عادی کار راننده و کمک‌راننده
 V_{ijk} سرعت وسیله نقلیه k ام در مسیر i ام و j ام
 A_{ik} زمان رسیدن به مشتری i توسط وسیله نقلیه k
 B_{ik} زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i توسط وسیله نقلیه k
 S_{ik} مدت زمان سرویس‌دهی به مشتری i (ثانیه) توسط وسیله
 نقلیه k

e_i بازه پایینی پنجره زمانی مشتری i

l_i بازه بالایی پنجره زمانی مشتری i

E تعداد انواع محصولات

CE_{ik} جریمه زود کرد در گره i توسط خودرو k

در حمل و نقل، میزان بار حمل شده از یک مکان به مکان دیگر با مصرف سوخت رابطه‌ی مستقیم دارد. ترافیک، راننده، شرایط آب و هوایی یکسان در نظر گرفته شده است. هنگامی که سرعت وسیله نقلیه کم است مصرف سوخت به علت استفاده نامناسب از سوخت، بسیار زیاد است. با افزایش سرعت تا سطح مشخصی، مصرف سوخت کاهش می‌یابد؛ اما در سرعت‌های بالاتر مصرف سوخت به دلیل کشش ایرودینامیکی، دوباره افزایش می‌یابد. علاوه بر این همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش بار وسیله نقلیه مصرف سوخت نیز افزایش می‌یابد (فتحیان و همکاران، ۱۳۹۶).

۳-۳- مدل ریاضی پیشنهادی مسئله

در ادامه مدل‌سازی مربوط به پژوهش حاضر ارائه می‌گردد. بیس اصلی این مدل برگرفته از تحقیقات توکلی مقدم و همکاران در سال ۱۳۹۶ هست.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} x_{ijk} \\ \text{Min } Z_2 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ijk} \\ \text{Min } Z_3 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n CE_{ik} (B_{ik} - A_{ik}) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n CL_{ik} (B_{ik} - l_i) \\ \text{Min } Z_4 &= \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n \sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K (h_0 + h_{1k} w_{ijke}) d_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^K h_0 d_{i0} x_{i0k} \\ \text{Min } Z_5 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} \cdot t_{ijk} \cdot s_k + \sum_{k=1}^K O_k \cdot s_{xk} \cdot (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} \cdot t_{ijk} - T t_k) \end{aligned}$$

Subject to

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ink} - \sum_{j=1}^n x_{nik} = 0 \quad ; \quad n = 1, 2, \dots, n \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{j=0}^n x_{j0k} \leq 1 \quad ; \quad k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} \leq 1 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

پنجره زمانی هر مشتری مستقل از دیگری است و به صورت یک طرفه است. این پنجره از نوع نرم هست؛ یعنی در صورت تأخیر وسیله نقلیه در تحویل کالا، کالا مرجوع یا دور ریخته نمی‌شود. بلکه مشتری آن را می‌پذیرد.

طول افق برنامه‌ریزی محدود و فقط برای یک دوره زمانی است.

جهت حمل تقاضای محصولات مختلف می‌توان آن‌ها را در یک وسیله نقلیه گذاشت و الزامی جهت حمل جداگانه‌ی هر محصول وجود ندارد.

وسایل حمل و نقل به لحاظ ظرفیت حمل و سایر مشخصات ناهمگن می‌باشند.

خرابی وسایل نقلیه و یا هرگونه اتفاقات پیش‌بینی نشده مجاز نیست. به همین ترتیب سایر پارامترها در مسئله ثابت، قطعی و معین هستند.

مبدأ و مقصد (گره صفر) همه وسایل نقلیه یکسان است یعنی یک انبار مرکزی وجود دارد.

هدف تعیین وسایل نقلیه سرویس‌دهنده به هر مشتری و ترتیب این سرویس‌دهی است به شکلی که هر مشتری تنها یک بار مورد بازدید قرار بگیرد و محدودیت‌های ذکر شده رعایت گردد و مجموع مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه، میزان سوخت مصرفی و همچنین میزان هزینه‌ی دستمزد و زمان سرویس‌دهی کمینه شود. در جدول زیر به بیان شاخص‌ها و پارامترهای مدل مربوط به پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. تمام پارامترها و شاخص‌های مورداستفاده در مدل به صورت جزء به جزء تعریف می‌گردند.

۳-۲- شاخص‌ها و پارامترهای مدل

n تعداد نقاط (مشتری‌ها) است و گره ۰ نشان‌دهنده دپو هست
 K تعداد خودروهای در دسترس

O_k متغیر صفر و یک مربوط به اضافه‌کاری وسیله نقلیه k ام
 E اندیس نوع محصول ($e=1, 2, \dots, E$)

\tilde{q}_{ie} تقاضای محصول نوع e به مشتری i
 d_{ij} فاصله میان گره i به j

t_{ijk} زمان موردنیاز جهت طی مسیر (i, j) توسط وسیله نقلیه k
 T حداکثر زمان، جهت خدمت‌دهی وسیله نقلیه

$T t_k$ مدت زمان عادی کار وسیله نقلیه k ام

T_{max}^k حداکثر زمانی که خودرو k ام قادر است طی مسیر کند.
 C_k ظرفیت وسیله نقلیه k

M مقدار بزرگ

h_0 میزان سوخت مصرفی در واحد فاصله بدون بار

h_{1k} میزان اضافی سوخت مصرفی در واحد فاصله برای واحد بار توسط وسیله نقلیه k

Sx_k اضافه پرداخت در ساعات اضافه‌کاری علاوه بر پرداخت در ساعات عادی

پیمودن مسیرهای طولانی تر افزایش می دهد) را نشان می دهد (علیقیان و بهروزی، ۱۳۸۵). همچنین محدودیت ۱ باعث می شود که هر گره تقاضا فقط از یک وسیله نقلیه توزیع کننده، خدمت دریافت کند که برگرفته از تحقیقات (تاجیک و همکاران، ۲۰۱۴) است. محدودیت ۲ بیان می کند که اگر وسیله نقلیه ای به گرهی وارد شود بایستی از آن خارج گردد و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار است؛ که این محدودیت برگرفته از تحقیقات (تاجیک و همکاران، ۲۰۱۴)، (دگردي و مرندي، ۱۳۹۵) است. محدودیت ۳ و ۴ بیانگر آن است که تمامی وسایل نقلیه از دپو شروع به حرکت می کنند و در انتها به دپو بازمی گردند که برگرفته از تحقیقات (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۲)، (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۶) است. محدودیت ۵ تا ۷ به بار وسیله نقلیه مربوط می گردد که هرچه بار حمل شده بیشتر باشد مصرف سوخت هم بیشتر است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۲). محدودیت ۵ تضمین می کند، میزان بار حمل شده از نقطه i به نقطه j از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نکند. محدودیت ۶ بیان می دارد که بار وسیله نقلیه هنگام ترک دپو برابر با مجموع بارهایی است که در نقاط مکان مشتریان بازدید شده، تحویل داده خواهد شد. همچنین محدودیت ۷ میزان بار جدید وسیله نقلیه را بعد از بازدید مشتریان (گره ها) محاسبه می کند. این محدودیت بیان می کند که اگر $x_{ij} = 1$ باشد بار حمل شده به گره j (Q_j) برابر با بار حمل شده به گره i (Q_i) منهای تقاضای فازی گره i به ازای هر محصول است. شکل ۳-۳ نشان دهنده این موضوع است. محدودیت ۸ نشان دهنده آن است که زمان طی مسیرها و سرویس دهی نباید از میزان مشخص شده بیشتر شود. همچنین محدودیت ۹ تا ۱۲ مربوط به اعمال پنجره زمانی و محاسبه زمان انتظار در گره مشتری و انتخاب زمان ترک گره است. در این حالت برای مشتری i تنها در بازه زمانی (e_i, l_i) امکان ارائه سرویس وجود دارد، به این بازه زمانی اصطلاحاً پنجره زمانی گفته می شود، به طوری که اگر وسیله نقلیه در این بازه در دسترس نباشد، برای مشتری مشکلات و هزینه های زیادی را ایجاد می کند و موجب نارضایتی مشتری می گردد.

لحظه شروع حرکت از انبار مرکزی، زمان سفر بین هر دو نقطه تقاضا و یک زمان خدمت اضافی به ازای هر مشتری به عنوان زمان ورود وسیله نقلیه در نظر گرفته می شود. سرویس دهی به هر مشتری باید در پنجره زمانی مربوط به او آغاز گردد و وسیله نقلیه باید به مدت مشخصی در مکان مشتری i سرویس نماید و در صورتی که وسیله نقلیه زودتر از پنجره زمانی مشتری در مکان حاضر شود مجاز است تا شروع پنجره زمانی او e_i منتظر بماند. محدودیت ۱۳ حداکثر زمانی که وسیله نقلیه می تواند تردد کند (علیقیان و بهروزی، ۱۳۸۵). ۱۴ استفاده یا عدم استفاده از اضافه کاری را نمایش می دهد

$$w_{ije}^k \leq c_k x_{ijk} \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad 5$$

$$e = 1, 2, \dots, E$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{e=1}^E \sum_{j=0}^n w_{ojke} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^K \sum_{e=1}^E \sum_{j=0}^n w_{ijke} x_{ijk} \quad 6$$

$$k = 1, 2, \dots, K, i = 0, 1, 2, \dots, n, e = 1, 2, \dots, E$$

$$(w_{ijke} - \tilde{q}_{ie} - w_{ijke}) x_{ijk} = 0 \quad 7$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n s_i x_{ijk} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ijk} x_{ijk} \leq TV \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad 8$$

$$(A_{jk} - B_{ik} - s_{ik} - t_{ijk}) x_{ijk} = 0 \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{n+1\}, j \in N \setminus \{0\}, i \neq j \quad 9$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

$$B_{ik} = \max\{A_{ik}, e_i\} \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad 10$$

$$B_{ik} + s_{ik} \leq l_i \quad ; \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad 11$$

$$B_{ik}^* \leq T_k \max \quad 12$$

$$T_k * x_{ij} < T_k \max \quad 13$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} (t_{ijk} + s_{ik} + (B_{ik} - A_{ik})) \leq T_k \quad \text{then } o = 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad 14$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} (t_{ijk} + s_{ik} + (B_{ik} - A_{ik})) \geq T_k \quad \text{then } o = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$t_{ij}^k = d_{ij} / v_{ijk} \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad 15$$

$$w_{ijke} \geq 0, K \geq 0, A_i, B_i \geq 0, \quad x_{ijk} \in S, x_{ijk} \in [0, 1] \quad 0 \in [0, 1] \quad 16$$

$$i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K$$

تابع هدف ۱ به کمینه کردن هزینه های حمل و نقل که برگرفته از تحقیقات (بکتاس^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۶)، (آرچتی^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۵) است می پردازد، تابع هدف ۲ بیانگر کمینه کردن مسافت است (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۶)، تابع هدف ۳ نارضایتی مشتریان در تخطی از بازه تعیین شده برای سرویس دهی را بیان می کند، تابع هدف ۴ هزینه های سوخت مصرفی توسط زمان بندی تحویل به موقع کالاهای سنگین تر را نشان می دهد (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۶) و در نهایت تابع هدف ۵ کاهش دستمزد رانندگان به صورت عادی و اضافه کار (باید در نظر داشت که مدت زمان اضافه کاری انعطاف مدل را برای

محدودیت ۱۵ رابطه زمان با مسافت و سرعت را بیان می‌کند و در نهایت محدودیت ۱۶ مربوط به متغیرهای مدل است.

۳-۴- عدم قطعیت در زمان

مسائل تصمیم‌گیری اغلب به دلیل عدم دقت، تغییرپذیری مستمر و عدم توانایی پیش‌بینی تغییرات آینده با عدم قطعیت مواجه هستند. نویسندگان بسیاری بحث استواری را مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند و نتیجه‌ی کار آن‌ها منجر به تحقیقات وسیعی شده است (هیئتس^{۱۹} و همکاران، ۲۰۰۶). در دنیای واقعی برنامه‌ریزی، نادیده گرفتن حتی یک عامل عدم قطعیت کوچک منجر به جواب بهینه‌ای می‌گردد که از مسئله‌ی اصلی دور است به همین جهت لازم است مدل‌هایی توسعه یابند که در خصوص عدم اطمینان داده‌ها، حفاظت و ایمنی ایجاد نمایند (بن تال و نمیروسکی، ۲۰۰۰). برتسیمس و سیم (۲۰۰۴) رویکردی متفاوت را برای کنترل عدم قطعیت معرفی نمودند؛ مزیت این رویکرد این است که منجر به یک مدل بهینه‌سازی خطی می‌شود و قابل کاربرد بر روی مدل‌های بهینه‌سازی گسسته نیز است و سطح محافظه‌کاری آن نیز قابل تنظیم است (ربیع، ۱۳۸۹). در نهایت دب^{۲۰} و گوپا^{۲۱} در سال ۲۰۰۶ رویکرد استواری مبنی بر مدل‌های چندهدفه با استفاده از اصل محدودیت- تسلط ارائه نمودند که رویکرد مورد استفاده در این پژوهش نیز هست.

۳-۵- تحلیل جواب استوار

در مطالعات بهینه‌سازی چندهدفه تمرکز اصلی پیدا کردن راه‌حل بهینه پارتو است، با این حال در عمل همیشه تمامی پارامترها دقیق و از پیش مشخص شده نیست و ناچار به استفاده از عدم قطعیت خواهیم بود. با توجه به حساسیتی که در انجام خدمات و سرویس‌دهی به موقع وجود دارد برای برخورد با عدم قطعیت موجود در زمان سرویس‌دهی از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. در این مدل مقادیر مربوط به پنجره زمانی یعنی (A_i, B_i, S_i) را تحت عدم قطعیت در نظر می‌گیریم و مدل را با استفاده از اصل محدودیت حل می‌نماییم. در این روش با توجه به توابع هدف چندگانه و تعارض میان آن‌ها به دنبال یک مرز بهینه قدرتمندتر از مرز بهینه پارتو هستیم. بدین منظور پارامتر محدودکننده η در یک اجرا

شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده نزدیکی به بدترین حالت هست. به سادگی می‌توان الگوریتم NSGA-II را برای حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از اصل محدودیت-تسلط، حل کرد (Deb, ۲۰۰۱؛ Deb et al., ۲۰۰۲). در این روش با اضافه کردن موارد ۱۷ و ۱۸ به مسئله باید پارامتر S_i را در بدترین حالت نسبت به پارامتر x با استفاده از الگوریتم NSGA محاسبه نموده و سپس جواب بهینه (f_p) را در این حالت محاسبه نمود (دب و گوپتا، ۲۰۰۶).

۴- مراحل اجرای تحقیق

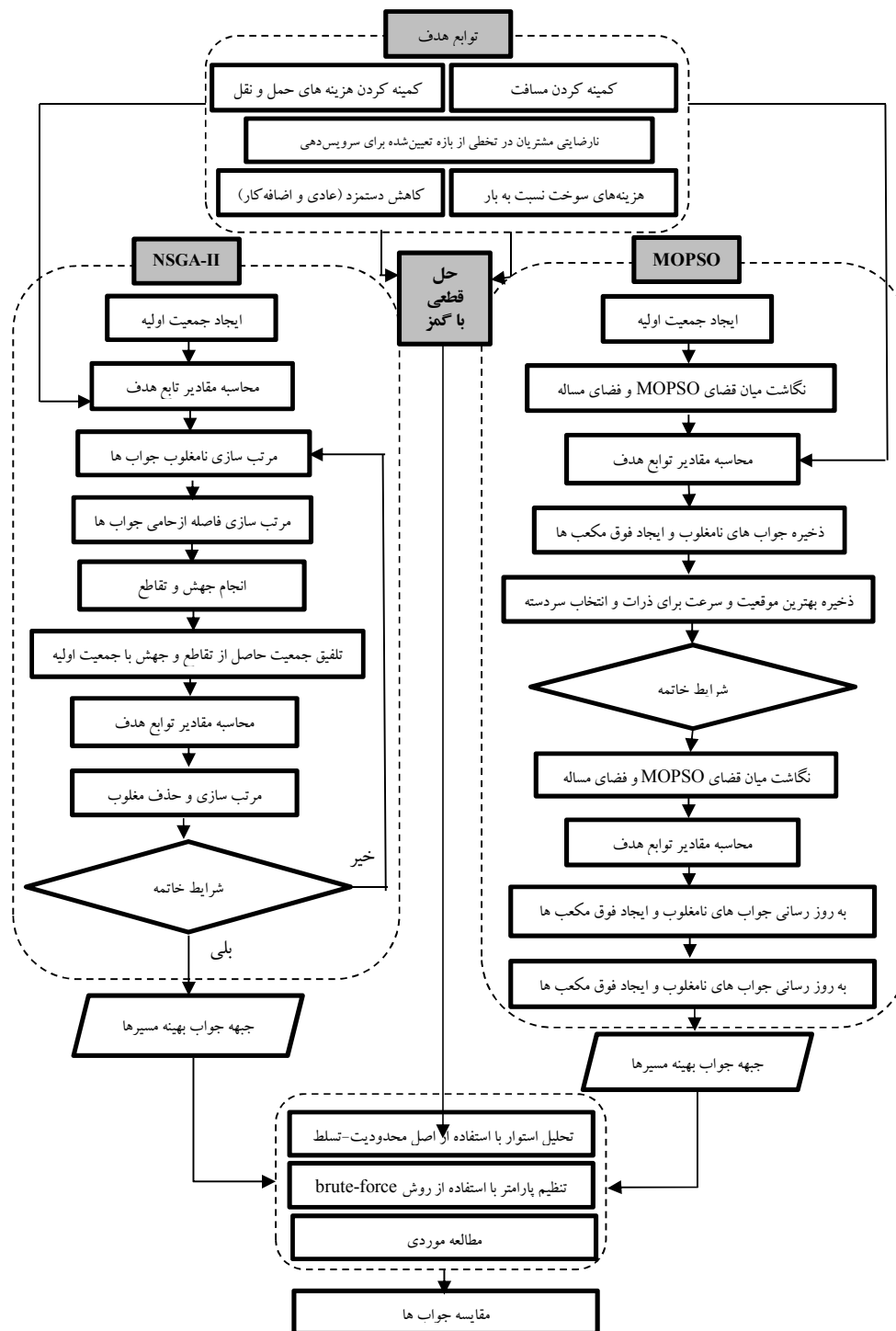
در قسمت قبل مدل مسیریابی حرکت خودرو تحت شرایط عدم قطعیت با تأکید بر اقدامات سبز-ناب و رضایت مشتری نشان داده شد. همچنین بیان شد که مسئله مسیریابی وسایل نقلیه جز مسائل NP-Hard است و روش‌های حل دقیق قادر به حل این مسائل در ابعاد بزرگ و حل مسائل دنیای واقعی نیستند. به همین جهت، برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌بایست استفاده شود. هنگامی که مسئله چندهدفه

$$\text{Minimize } f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$$

$$\text{Subject to } \frac{\|f^p(x) - f(x)\|}{\|f(x)\|} < \eta \quad (17)$$

$$x \in S_0 \quad (18)$$

از این رو این قابلیت را دارند که در هر اجرای الگوریتم، به جای یک پاسخ بهینه، تمام مجموعه جواب‌های بهینه (جبهه پارتو) را تخمین بزنند. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه باید به سه نکته اساسی توجه نمود: ۱. چگونگی تخصیص شایستگی و انتخاب، یعنی چگونگی جلوگیری از نابودی راه‌حل‌هایی که مغلوب نشده‌اند (زیتزلر^{۲۲} و تایل^{۲۳}، ۱۹۹۹)؛ که در اینجا از دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی در جهت هدایت الگوریتم به سوی مجموعه بهینه پارتو استفاده شده است؛ ۲. چگونگی حفظ تنوع، به منظور جلوگیری از همگرایی سریع و رسیدن به یک مجموعه مغلوب نشده با توزیع مناسب؛ ۳. نحوه‌گرایی؛ نامغلوب استفاده شد است. در شکل ۱ مراحل اجرای پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱. مراحل اجرای پژوهش

۴-۱- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAI)

روش NSGA یک رویکرد متداول جهت حل مسائل با چند تابع هدف بر مبنای الگوریتم ژنتیک است (سرینیواس^{۲۴} و دب^{۲۵}، ۱۹۹۴). این الگوریتم که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است، یک روش مؤثر جهت حل مسائل چندهدفه است، اما به دلیل پیچیدگی مدل، فقدان نخه‌گرایی و همچنین انتخاب ذرات غالب دارای ضعف است، جهت حل این مشکل سرینیواس و دب در سال ۲۰۰۲ نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی این الگوریتم یعنی NSGA-II را که یکی از سریع‌ترین و توانمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است، ارائه نمودند؛ که نسبت به نسخه‌ی قبلی و سایر روش‌ها از پیچیدگی عملیاتی کمتری برخوردار بوده و با استفاده از اصل عدم تسلط (عدم غلبه کردن) و محاسبه فاصله ازدحام نقاط بهینه پارتو را به دست می‌آورد که از گستردگی مطلوبی در حوزه تغییرات توابع اهداف برخوردارند (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). از دیگر دلایل استفاده از این الگوریتم می‌توان به جمعیتی بودن و سازگار بودن آن با مسائل چندهدفه، عملکرد سیستماتیک در مواجهه با جواب‌های نامغلوب هر نسل و پراکندگی خوب جواب‌ها در مرز بهینه پارتو اشاره کرد. به عبارتی به‌جای تابع برازندگی، مفهوم غالب بودن جواب‌ها در این الگوریتم، آورده شده است (عیدی و همکاران، ۱۳۹۲). در این الگوریتم راه‌حل‌ها به‌عنوان افراد یک جامعه در نظر گرفته می‌شوند و میزان بهینگی افراد، با توجه به اینکه تا چه حد می‌توانند مسئله را حل کنند تعیین می‌گردد. افراد جمعیت با یکدیگر تلفیق می‌گردند و فرزندان را ایجاد می‌کنند و سپس والدین و فرزندان برای ماندگاری در نسل بعدی رقابت می‌کنند؛ و از آنجایی که بهترین‌ها انتخاب می‌گردند بنابراین نسل به نسل شاهد پیشرفت خواهیم بود (ساحل‌گزین و علی‌محمدی، ۲۰۱۶).

روش کار الگوریتم رتبه‌بندی نامغلوب به‌صورت زیر هست:

۱. تولید جمعیت اولیه با اندازه N

۲. محاسبه‌ی معیارهای برازندگی

۳. رتبه‌بندی جمعیت بر اساس شروط غلبه کردن

۴. محاسبه فاصله‌ی ازدحامی^{۲۶}

۵. انتخاب: بلافاصله پس از رتبه‌بندی جمعیت اولیه، میزان فاصله‌ی ازدحامی از آن مشخص خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌گردد.

این انتخاب بر اساس دو آیتم صورت می‌پذیرد:

رتبه‌بندی جمعیت: جمعیت‌هایی که در رتبه‌های پایین‌تر هستند انتخاب می‌گردند.

محاسبه فاصله: با این فرض که p و q دو عضو دارای یک رتبه باشند، عضوی که دارای فاصله‌ی ازدحامی بیشتری است، انتخاب می‌گردد؛ بنابراین اولویت انتخاب ابتدا بر اساس رتبه و سپس بر اساس فاصله‌ی ازدحامی است.

۶. ایجاد تقاطع^{۲۷} و جهش^{۲۸} جهت تولید فرزندان جدید.

۷. ترکیب جمعیت اولیه و جمعیت حاصل از تقاطع و جهش.

۸. جایگزین نمودن جمعیت والدین با بهترین اعضای ترکیب‌شده‌ی مراحل قبل. در مرحله‌ی نخست ابتدا اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والدین قبلی می‌گردند و سپس بر اساس رتبه دسته‌بندی می‌گردند و آن بخشی که دارای رتبه‌های پایین‌تر است حذف می‌گردد. در مرحله‌ی بعد رتبه‌بندی بر اساس فاصله‌ی ازدحامی صورت می‌پذیرد.

تمامی مراحل با رسیدن به شرایط بهینگی تکرار می‌گردند. (کوئلو^{۲۹} و همکاران، ۲۰۰۷)

۴-۲- الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) اولین بار توسط چاپمن^{۳۰} در سال ۱۹۹۹ بر مبنای رویکرد پارتو بناشده است. تأکید اصلی الگوریتم آنان بر جست‌وجوی گروهی و فردی ذرات بود. با این حال این الگوریتم‌ها تا حد زیادی از انتخاب مؤلفه‌های تصادفی و در برخی مواقع بدون پشتوانه منطقی خودداری نموده و عملگرهای رایج در الگوریتم‌های تکاملی از جمله تقاطع و جهش را ندارد. (امیدیان و همکاران، ۱۳۹۳)

در روش جست‌وجوی پراکنده فضای حل مسئله را از طریق تولید جواب‌های بهتر، با ترکیب جواب‌های موجود که پتانسیل لازم جهت ترکیب را دارند جست‌جو می‌کند. این ساختار مشابه روشی است که پارسیپولوس^{۳۱} و همکاران در سال ۲۰۰۲ با نام بردار ارزیابی الگوریتم مجموعه ذرات ارائه نمودند. در نهایت مدل نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در سال ۲۰۰۴ توسط کوئلو معرفی شد که در واقع تعمیمی از الگوریتم

مطمئن شد الگوریتم همه جای فضا را تا حد مناسبی جستجو می‌کند، به همین دلیل در اوایل الگوریتم با یک نرخ نسبتاً بالایی جهشی اتفاق می‌افتد و بعد رفته‌رفته این نرخ کم می‌شود. پس از آنکه در هر ذره با یک نرخ مشخصی جهشی صورت پذیرفت موقعیت آن تغییر می‌کند باید موقعیت جدید ارزیابی شده و بهترین خاطره شخصی هر ذره به‌روزرسانی شود. با این کار ذرات جدیدی به وجود می‌آید که می‌توانند بر سایر ذرات غلبه داشته باشند، باید این ذرات را به آرشیو خارجی اضافه کرد و اعضای مغلوب از آرشیو خارجی حذف گردند و مجدداً فضای هدف مسئله جدول‌بندی شده و اندیس خانه‌هایی که اعضای آرشیو خارجی در آن‌ها قرار دارند شناسایی شود. در صورت پر شدن آرشیو، اعضای از آن حذف می‌گردد. این حال کاملاً برعکس حال انتخاب لیدر است، یعنی خانه‌هایی که حاوی تعداد اعضای بیشتری هستند نسبت به خانه‌های با جمعیت کمتر در اولویت برای حذف اعضایشان قرار دارند. در انتها شرط لازم برای پایان یافتن اجرای الگوریتم بررسی می‌گردد که در صورت محقق شدن آن، الگوریتم متوقف شده و در غیر این صورت مجدداً از میان اعضای آرشیو لیدر انتخاب کرده و الگوریتم تکرار می‌شود. در واقع می‌توان گفت روند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه به‌صورت زیر است:

۱. ایجاد جمعیت اولیه؛
۲. مقداردهی اولیه به‌سرعت هر ذره؛
۳. ارزیابی و سنجش هر یک از ذرات جمعیت؛
۴. جدا نمودن اعضا نامغلوب جمعیت و ذخیره آن‌ها در آرشیو خارجی،
۵. جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده؛
۶. هر یک از ذرات از میان اعضای آرشیو، رهبری انتخاب کرده و حرکت می‌کند؛
۷. بهترین خاطره شخصی هر یک از ذرات به‌روز می‌شود؛
۸. اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌گردد؛
۹. اعضای نامغلوب آرشیو حذف می‌گردد؛
۱۰. اگر تعداد اعضای آرشیو بیشتر از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی نیز حذف می‌شوند (اندازه آرشیو محدود است)؛

PSO است. در الگوریتم ازدحام ذرات برخلاف الگوریتم ژنتیک اولاً هر پاسخ به‌جای یک کروموزوم، با یک‌ذره شناسایی می‌شود. ثانیاً حرکتی که ذرات در فضا برای یافتن پاسخ‌های جدید انجام می‌دهند منجر به تبادل اطلاعات و همگرایی بین اعضای جمعی می‌شود که منشأ این حرکت‌ها سه عامل است:

۱. رفتاری که قبلاً این ذرات از خود نشان داده‌اند.
۲. بهترین موقعیتی که هر ذره در کل فضای جستجو تجربه کرده است. (p-best)
۳. بهترین مکانی که توسط کل اعضای جمعیت تجربه شده است. (g-best)

اولین گام در به‌کارگیری و پیاده‌سازی یک الگوریتم فرا ابتکاری، نمایش جواب‌های مسئله است سپس مجموعه‌های از ذرات به تعداد معین به‌عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شوند. برای هرکدام از p اعضای جمعیت یک بردار سرعت در نظر گرفته شده که در ابتدای الگوریتم برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در نهایت جواب‌ها ارزیابی می‌شود. در این مرحله بهترین موقعیتی که هر ذره تجربه کرده همین موقعیتی است که در آن واقع است. موقعیت کنونی ذرات به‌عنوان p-best هر یک از ذرات ثبت می‌شود. در مرحله بعد اعضای نامغلوب جمعیت تعیین می‌گردد و درون آرشیوی نگهداری می‌شود. سپس با توجه به اعضای آرشیو خارجی فضای هدف مسئله جدول‌بندی شده و اندیس خانه‌هایی که اعضای آرشیو خارجی در آن‌ها قرار دارند شناسایی می‌شود. هرکدام از اعضای جمعی برای حرکت خود از میان اعضای آرشیو خارجی، یک رهبر انتخاب می‌کند. در الگوریتم MOPSO انتخاب مبتنی بر فرد نیست و انتخاب بر اساس نواحی صورت می‌پذیرد؛ یعنی به‌جای اینکه تصمیم بگیرد کدام یک از اعضای آرشیو خارجی را انتخاب کند فضا را جدول‌بندی کرده و تصمیم می‌گیرد کدام خانه را انتخاب کند به‌نحوی که احتمال انتخاب خانه‌های با جمعیت کمتر، بیشتر باشد سپس یکی از اعضای آن خانه را به تصادف انتخاب می‌کند. در مرحله بعد با توجه به معادله فوق و سرعت حرکت ذرات و موقعیت آن‌ها بروز و ارزیابی می‌شود.

$$v(t+1) = wv(t) + c_1r_1(p(t) - x(t)) + c_2r_2(Leader(t) - x(t)) \quad (19)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (20)$$

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سرعت همگرایی بالایی دارد تا حدی که باید از این سرعت همگرایی کم کرد تا

First (P): ایجاد اولین نامزد برای حل P.

NSxt (P,c): ایجاد نامزد بعدی برای حل P پس از نامزد فعلی c.

Valid (P,c): بررسی مقبولیت نامزد c به عنوان یک راه حل برای P.

Output (P,c): استفاده از جواب c در برنامه P.

مرحله next می بایست زمانی که نامزد دیگری برای حل P وجود ندارد را تشخیص دهد. یک راه مناسب برای انجام این کار بازگرداندن «نامزد پوچ» به عنوان نامزد بعدی است، برخی از داده Λ به صورت معمول برای که تمایز از نامزدهای واقعی استفاده می شود. به همین ترتیب در صورتی که هیچ نامزدی برای حل P موجود نباشد مرحله first نیز باید داده Λ برگرداند (کریستوف و همکاران، ۲۰۱۰). قبل از حل مدل با استفاده از الگوریتمها پارامترهای هردو الگوریتم جهت اطمینان از نتایج دقیق و عملکرد رضایت بخش باید بهینه سازی شوند. جدول ۳ و جدول ۴ به ترتیب نمایانگر مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم MOPSO و NSGAI می باشند.

پارامترهای الگوریتم MOPSO طبق جدول ۲ تنظیم شده است. در این آزمایش اندازه ی جمعیت، میزان حد جهش، احتمال جهش، ضرایب C_1 و C_2 و ... توسط تنظیم پارامتر مشخص شده است. پارامترهای الگوریتم NSGAI طبق جدول ۳ تنظیم شده است.

جدول ۲. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم MOPSO

MOPSO				
epsilons	Mutation-perturbation	swarm size	leader size	Mutation-probability
0001/0	0.5	997	579	1/0
C_3	C_2	C_1	r_2	r_1
(1/0, 5/0)	(5/1, 2)	(2/1, 2)	(0,1)	(0,1)

جدول ۳. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم NSGAI

NSGA-II			
Mutation-Rate	MUTPB	population size	CXPB
5/0	2/0	983	7/0

۱۱. اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد، به مرحله ۵ بازمی گردیم و در غیر این صورت، کار پایان می یابد (رجبسی و خالوزاده، ۱۳۹۳).

۵- نتایج محاسباتی

در این مقاله جهت حل مسئله عنوان شده و ارزیابی الگوریتم های پیشنهادی، ابتدا مجموعه ای از مسائل نمونه ایجاد می شوند. پس از تنظیم پارامترها برای الگوریتمها، مسائل تولید شده توسط الگوریتم های معرفی شده حل خواهند شد و با معرفی چند شاخص مقایسه، عملکرد الگوریتمها ارزیابی می شود. الگوریتمها در نرم افزار python3 با استفاده از یک کامپیوتر شخصی با پردازنده ۸ هسته ای و ۲ گیگاهرتزی، تحت ویندوز ۷ برنامه نویسی شده اند. داده های به دست آمده در این تحقیق، مربوط به شرکت شهید پاک توس هست و از طریق مطالعه میدانی به دست آمده است.

۵-۱- تنظیم پارامتر

بدیهی است که کارایی یک الگوریتم به شدت به پارامترهای آن وابسته است به گونه ای که پارامترهای مختلف ممکن است جواب های کاملاً متفاوتی با کیفیت های متفاوت تولید کنند؛ بنابراین اگر پارامترها به طور صحیح تنظیم نشوند الگوریتم قادر به دستیابی به جواب هایی با کیفیت مطلوب نیست. جهت تنظیم کردن پارامترهای هر یک از الگوریتم های پیشنهادی، مسئله با سایز متوسط انتخاب شده و بهترین مجموعه پارامترها تخمین زده می شوند. روشی که در این پژوهش برای تنظیم پارامترها استفاده شده است brute-force است. این روش شامل شمارش نظام مند تمام نامزدهای ممکن برای حل و چک کردن اینکه آیا هر یک از نامزدها قادر به ارضا شرط مسئله است. جستجو به روش brute-force به عنوان روش «پایه» در هنگام تعیین معیار الگوریتم های دیگر یا metaheuristics مفید است و به سادگی قابل پیاده سازی است و همیشه جواب مسئله را در صورت وجود می یابد. به منظور استفاده از روش brute-force در یک کلاس خاص از مسائل، باید چهار زیر برنامه first, next, valid و output پیاده سازی شود. هر یک از این روش ها، داده P از یک مسئله را به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته و مراحل زیر را انجام می دهد:

۲-۵- شاخص های مقایسه الگوریتم ها

در رابطه مختصات نقطه ایده آل برابر با
است. پایین تر بودن مقدار این شاخص بیانگر بهتر بودن
الگوریتم است (برزین پور و همکاران، ۲۰۱۷)

در این پژوهش چهار شاخص جهت مقایسه الگوریتم ها
مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه معرفی می گردند.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{3i} - f_3^{best}}{f_{3,total}^{max} - f_{3,total}^{min}}\right)^2}}{n} \quad (22) \quad \text{شاخص کیفیت}^{32} \text{ (QM)}$$

شاخص فاصله^{۳۴} (SM): این شاخص یکنواختی مجموعه
نقاط نامغلوب را در فضای حل اندازه گیری می کند. نحوه
محاسبه این شاخص در رابطه ۲۳ ارائه شده است. در رابطه زیر
تعداد جواب های پارتو و d_i فاصله اقلیدسی بین دو جواب
پارتوی کناری در فضای حل و میانگین \bar{d} فواصل d_i ها است.
هر چه SM کمتر باشد الگوریتم دارای عملکرد بهتری است.

معیار کیفی، مهم ترین معیار مقایسه است که به سادگی در سه
مرحله به دست می آید. ابتدا مجموعه جواب های نامغلوب
حاصل شده الگوریتم ها برای یک مسئله مشخص، در یک آرشیو
جدید قرار داده می شوند و مجدد همه آن ها به منظور
به روز رسانی آرشیو دوبه دو مقایسه می شوند. سپس نسبت تعداد
جواب های نامغلوب که به هر الگوریتم تعلق دارد به کل
جواب های نامغلوب آرشیو بیانگر کیفیت آن الگوریتم خواهد
بود. هر چه این درصد بالاتر باشد، الگوریتم از کیفیت بیشتری
برخوردار است.

$$SM = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}}}{\bar{d}} \quad (23)$$

شاخص متوسط فاصله از ایده آل^{۳۳} (MID): این شاخص
به منظور محاسبه میانگین فاصله جواب های پارتو از مبدأ
مختصات استفاده می شود. در رابطه (۲۱) C_i میزان فاصله
جواب پارتو از نقطه ایده آل است. با توجه به این رابطه،
مشخص است که هر چه این شاخص کمتر باشد، کارایی
الگوریتم بیشتر خواهد بود.

$$MID = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \quad (21)$$

شاخص پراکندگی^{۳۵} (DM): این شاخص وسعت جواب های
پارتوی یک الگوریتم را نشان می دهد. مقادیر بزرگ تر این معیار
بیانگر پخش بودن بهتر جواب ها است. نحوه محاسبه این
شاخص به صورت رابطه زیر ارائه شده است.

از آن جایی که در مباحث چند هدفه مبتنی بر رویکرد پارتو،
یکی از اهداف، مرزهایی نزدیک تر به مرکز مختصات می باشند،
بنابراین این شاخص، فاصله جبهه ها را از بهترین مقدار
جمعیت محاسبه می کند.

$$DM = \sqrt{\left(\frac{Max\{f_{1i}\} - Min\{f_{1i}\}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{Max\{f_{2i}\} - Min\{f_{2i}\}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{Max\{f_{3i}\} - Min\{f_{3i}\}}{f_{3,total}^{max} - f_{3,total}^{min}}\right)^2} \quad (24)$$

مقادیر تابع هدف m ام دو جواب پارتوی i و j هستند. این
شاخص وسعت جواب های پارتوی یک الگوریتم را نشان
می دهد. مقادیر بزرگ تر این معیار بیانگر پخش بودن بهتر
جواب ها و عملکرد بهتر الگوریتم هست (برزین پور و
همکاران، ۲۰۱۷).

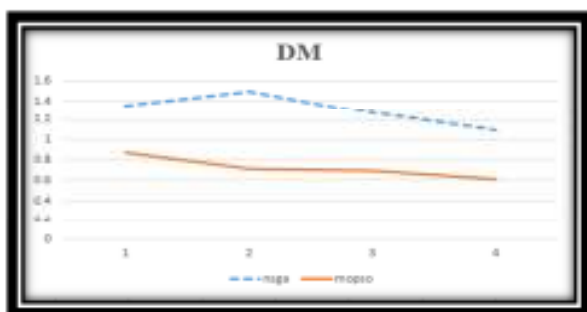
مقدار این شاخص برابر با فاصله نقاط پارتو الگوریتم
مورد بررسی از نقطه ایده آل هست. در این پژوهش با توجه به
اینکه توابع هدف همگی از نوع کمینه سازی اند در نتیجه نقطه
ایده آل برابر مینیمم توابع هدف در بین تمام الگوریتم ها در نظر
گرفته می شود که در آن n برابر تعداد نقاط پارتو و
همچنین $f_{i,total}^{min}$ به ترتیب بیشینه ترین و کمینه ترین
مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف الگوریتم های
مورد مقایسه است.

برای هر آزمایش شاخص های کارایی ذکر شده محاسبه گردیده
و در نهایت پارامترهای تنظیم شده برای هر الگوریتم به صورت
جدول زیر گزارش می شود.

جدول ۴ و شکل ۲ مربوط مقایسه کارایی دو الگوریتم توسط
شاخص SM است. تعدادی مسائل نمونه ایجاد شده است که در
آن n نشانگر تعداد مشتری، k تعداد ماشین و e نمایانگر تعداد
محصول هست.

جدول ۶. مقایسه کارایی دو الگوریتم از لحاظ شاخص MID

MID	n.k.e				میانگین
	3.4.4	4.4.3	4.4.4	4.3.4	
NSGAI	0.3265	0.6166	0.2734	0.5004	0.4292
MOPSO	0.2890	0.2422	0.5459	0.1830	0.3151

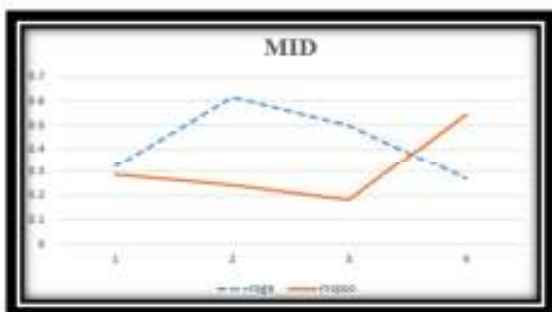


شکل ۳. نمودار مقادیر شاخص DM حاصل از حل مسائل نمونه

جدول ۶ و شکل ۴ مربوط مقایسه کارایی دو الگوریتم توسط شاخص MID است. تعدادی مسائل نمونه ایجاد شده است که در آن n نشانگر تعداد مشتری، k تعداد ماشین و e نمایانگر تعداد محصول هست.

$$f_1^{best}, f_2^{best}, f_3^{best}$$

مقادیر به دست آمده از جدول ۶ و همچنین نمودار ۳ شاخص فاصله از نقطه ایده آل را نشان می دهد و هر چه این شاخص کمتر باشد نشان دهنده این است که جواب ها به نقطه ایده آل نزدیک تر است بنابراین MOPSO نسبت به NSGAI عملکرد بهتری را نشان می دهد.



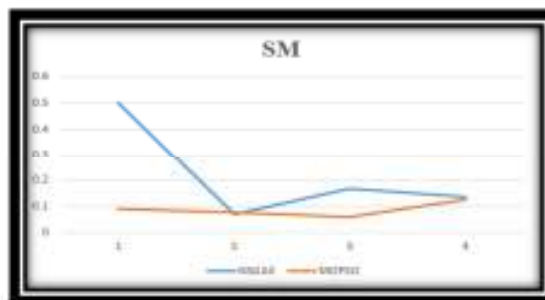
شکل ۴. نمودار مقادیر شاخص MID حاصل از حل مسائل نمونه

جدول ۷ و شکل ۴ مربوط مقایسه کارایی دو الگوریتم توسط شاخص QM هست. تعدادی مسائل نمونه ایجاد شده است که

جدول ۴. مقایسه کارایی دو الگوریتم از لحاظ شاخص SM

SM	n.k.e				میانگین
	3.4.4	4.4.3	4.4.4	4.3.4	
NSGAI	0.5	0.0707	0.1344	0.1666	0.2179
MOPSO	0.0909	0.0769	0.125	0.0602	0.0882

با توجه به مقادیر به دست آمده از جدول ۴ و نمودار ۲ مشاهده می شود که الگوریتم مقادیر MOPSO نسبت به NSGAI کمتر است و همچنین دارای نمودار یکنواخت تری است بنابراین کارایی الگوریتم MOPSO نسبت به شاخص یکنواختی از NSGAI بهتر است.



شکل ۲. نمودار مقادیر شاخص SM حاصل از حل مسائل نمونه

جدول ۵ و شکل ۳ مربوط مقایسه کارایی دو الگوریتم توسط شاخص DM است. تعدادی مسائل نمونه ایجاد شده است که در آن n نشانگر تعداد مشتری، k تعداد ماشین و e نمایانگر تعداد محصول هست.

جدول ۵. مقایسه کارایی دو الگوریتم از لحاظ شاخص DM

DM	n.k.e				میانگین
	3.4.4	4.4.3	4.4.4	4.3.4	
NSGAI	1.3595	1.4949	1.0974	1.2762	1.3070
MOPSO	0.8752	0.7156	0.6164	0.7014	0.7272

با توجه به مقادیر به دست آمده از جدول ۵ و همچنین نمودار ۳ مشاهده می شود که الگوریتم مقادیر MOPSO نسبت به NSGAI کمتر است بنابراین بزرگ تر بودن جواب ها در الگوریتم NSGAI بیانگر پخش بودن بهتر جواب ها هست؛ بنابراین کارایی الگوریتم NSGAI نسبت به شاخص پراکندگی از MOPSO بهتر است.

مقادیر مشاهده شده میانگین زمان حل و همچنین بررسی جواب‌های بهینه پارتو نمایانگر این موضوع است که الگوریتم MOPSO نسبت به NSGAII بسیار بهتر است بنابراین می‌توان گفت از عملکرد بهتری نیز برخوردار است. شکل ۵ نمودار مقایسه جواب بهینه دو الگوریتم را در حالت تک هدفه نشان می‌دهد.

۳-۵- تحلیل نتایج

در این بخش عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی از لحاظ جواب بهینه و زمان حل مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ به منظور بررسی توانایی مدل ارائه شده در بهبود مسائل در دنیای واقعی و همچنین توانایی الگوریتم‌های حل پیشنهادی، هایپرمارکت‌ها و مسیرهای دسترسی وسایل نقلیه به آن‌ها، در یک مقطع زمانی، از طریق مصاحبه با خبرگان سازمان در بخش لجستیک و مطالعات میدانی مورد بررسی قرار گرفت که در این مطالعه با ۴ محصول متفاوت به ۴ هایپرمارکت توسط ۴ وسیله نقلیه؛ در بازه زمانی ۸:۰۰ تا ۱۵:۰۰ سرویس‌دهی انجام می‌شود. همچنین تمامی رانندگان و صاحبان وسایل نقلیه با شرکت در طرف قرارداد بوده‌اند و علاوه بر حقوق ثابت در ازای میزان ساعت کاری بالاتر از معمول اضافه‌کار دریافت می‌کنند. لازم به ذکر است این پژوهش در بازه‌ی زمانی بهار و تابستان ۱۳۹۶ صورت گرفته است. با توجه به چندهدفه بودن مدل جهت به دست آوردن جواب بهینه پارتو از روش وزن‌دار یا مجموع وزن‌دار استفاده شده است.

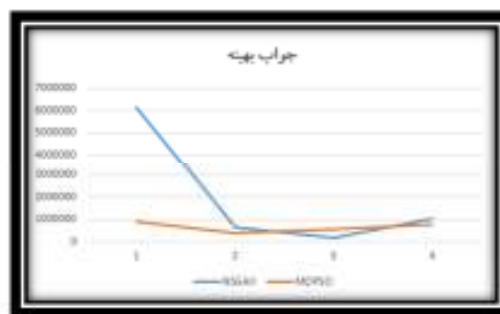
در این روش ضرایب مختلفی برای توابع هدف جهت تولید جواب‌های بهینه مجموعه پارتو استفاده می‌شود. از آنجایی که این توابع هدف مشخص دارای واحدها و مقیاس‌های مختلفی هستند نمی‌توان به راحتی آن‌ها را با ضرایب مختلف جمع کرد؛ بنابراین برای ایجاد تابع هدف ترکیبی بر اساس ضرایب وزنی، لازم است که هرکدام از این پنج تابع هدف نرمالیزه شود. با تغییر ضرایب به ازای مقادیر مختلف بین صفر و یک و با این شرط که همیشه مجموع ضرایب وزنی برابر یک باشد $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ خواهد آمد. این ضرایب نشان‌دهنده اهمیت تابع هدف در مقایسه با توابع هدف دیگر است (شفیعی نیک‌آبادی و نادری، ۲۰۱۶). در این مدل همه‌ی توابع هدف دارای وزن یکسانی

در آن n نشانگر تعداد مشتری، k تعداد ماشین و e نمایانگر تعداد محصول است.

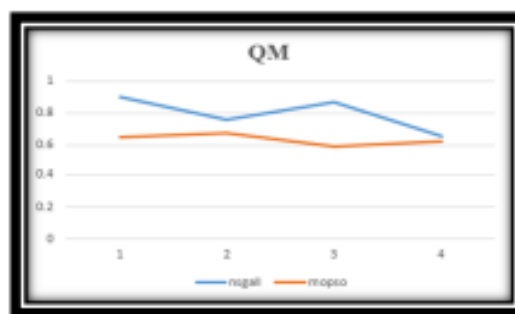
جدول ۷. مقایسه کارایی دو الگوریتم از لحاظ شاخص QM

QM	n.k.e				میانگین
	3.4.4	4.4.3	4.4.4	4.3.4	
NSGAII	0.8998	0.7621	0.6593	0.8701	0.7978
MOPSO	0.6508	0.6741	0.6243	0.5935	0.6356

مقادیر به دست آمده از جدول ۷ و همچنین نمودار ۴ شاخص کیفیت الگوریتم را نشان می‌دهد و هر چه این درصد بالاتر باشد، الگوریتم از کیفیت بیشتری برخوردار است؛ بنابراین NSGAII نسبت به MOPSO به عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار مقادیر شاخص QM حاصل از حل مسائل نمونه



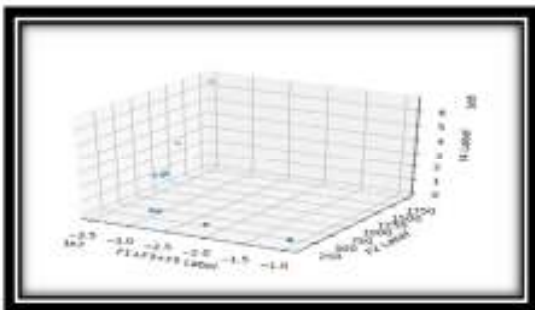
شکل ۵. نمودار مقایسه جواب بهینه الگوریتم‌های MOPSO و NSGAII در حالت تک هدفه

از آن جایی که الگوریتم MOPSO در شاخص‌های MID و SM و الگوریتم NSGAII در شاخص‌های QM و DM برتر بودند. می‌توان نتیجه گرفت که هر دو الگوریتم از کارایی مطلوبی برخوردارند؛ اما جهت تحلیل دقیق عملکرد در ادامه به بررسی جواب‌های بهینه و زمان حل پرداخته خواهد شد.

هستند و از اولویت یکسانی برخوردارند. با استفاده از معادله ۲۵ مسئله‌ی چندهدفه به تک هدفه تبدیل می‌گردد.

$$\text{Min } Z = 0.2Z_1 + 0.2Z_2 + 0.2Z_3 + 0.2Z_4 + 0.2Z_5 \quad (25)$$

شکل ۷ نشان‌دهنده نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم MOPSO در حالت تحلیل استوار هست.



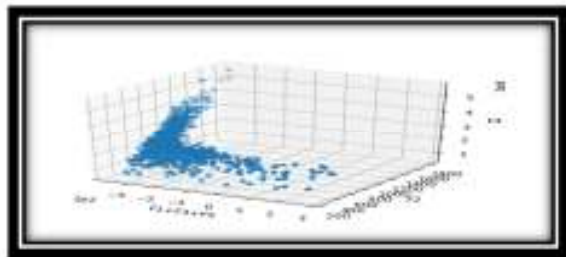
شکل ۶. نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم MOPSO را در حالت قطعی

جهت دستیابی به جواب بهینه، مقادیر تابع هدف به ازای هر یک از جواب‌های نهایی الگوریتم بررسی گردید. به دلیل اینکه مسئله دارای پنج تابع هدف است، جواب‌های بهینه در این مسئله دارای جواب پنج بعدی می‌باشند. از آنجایی که نمایش مسئله در فضای پنج بعدی ناممکن است بنابراین توابع هدف ۱,۳,۵ که همگی از جنس هزینه هستند را جمع نموده و نمودارها را در فضای سه بعدی یکبار در حالت قطعی و یکبار در حالت عدم قطعیت با دو الگوریتم MOPSO

جدول ۹. مقایسه روش‌های الگوریتم‌های پیشنهادی و مدل گمز در بهترین جواب و خطای به دست آمده

حل توسط NSGAI		حل توسط MOPSO		حل توسط GAMS		تعداد محصول	تعداد وسیله نقلیه	تعداد مشتریان	مسائل نمونه
زمان (ثانیه)	بهترین جواب	زمان (ثانیه)	بهترین جواب	زمان (ثانیه)	بهترین جواب				
۱۳۶,۳	۶۱۴۳۲۹	۱۰۰,۵	۹۱۳۴۰۴	۲۳۰,۶	۴۵۵۰۶۴۱	۴	۴	۴	۱
۱۱۰	۱۹۱۳۲۵	۸۷,۶	۵۷۵۳۱۶	۱۸۰,۲۳	۸۶۵۲۸۸	۴	۳	۴	۲
۱۰۲,۷	۶۴۶۳۲۲	۷۸,۸	۳۷۱۷۷۱	۱۵۹,۶۸	۱۰۰۹۵۰۹	۴	۴	۳	۳
۱۲۰,۷	۱۰۳۸۸۰۸	۹۸,۴	۷۷۷۶۷۴	۱۷۰,۸۱	۱۴۸۵۴۱۱	۳	۴	۴	۴
۱۱۷,۴۲۵	۲۰۰۴۹۲۱	۹۱,۳۲۵	۶۵۹۵۴۱,۲	۱۸۵,۳۳	۱۹۷۷۷۱۲	میانگین			

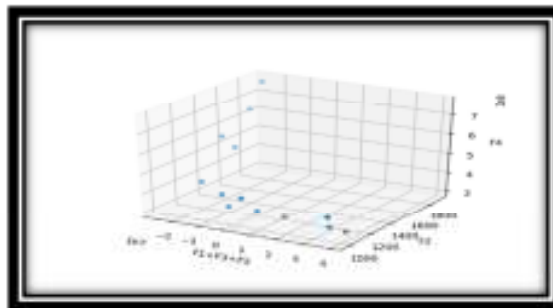
همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌گردد، نقاط جواب در هر دو حالت قطعیت و عدم قطعیت در الگوریتم MOPSO از همگرایی خوبی برخوردارند. حال مقادیر توابع هدف توسط الگوریتم NSGA-II بر روی نمودار بررسی می‌گردد. شکل ۸ نشان دهنده نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم NSGA-II در حالت قطعی است.



شکل ۸. نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم NSGAI در حالت قطعی

NSGA-II مقایسه نمودیم.

شکل ۶ نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم MOPSO را در حالت قطعی نشان می‌دهد.

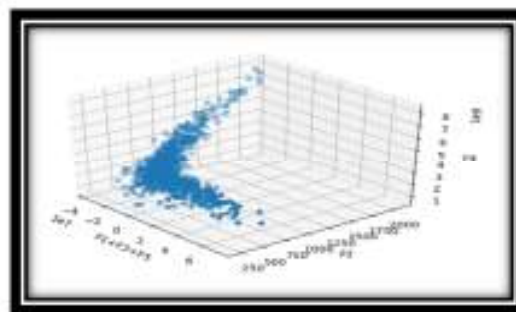


شکل ۷. نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱,۳,۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم MOPSO در حالت تحلیل استوار

هزینه‌ی تمام شده محصول که رضایت مشتریان را در پی دارد، موجب ناب‌سازی سیستم توزیع نیز می‌گردد. ویژگی دیگر این مدل استفاده از رویکرد سبز باهدف کمینه کردن سوخت مصرفی است که علاوه بر فراهم آوردن منافع اقتصادی، موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی، کاهش کربن‌دی‌اکسید و در نهایت آلودگی هوا می‌شود. از طرفی به دنبال آن است که با زمان‌بندی مناسب تحویل کالا به مشتری رضایت حداکثری او را جلب کند. مزیت دیگر الگوریتم حل استفاده شده در این مدل هست. با الگوریتم استفاده شده هر چه قدر هم که حجم اطلاعات بالا برود و محاسبات زیاد باشد، مشکلی در انجام محاسبات پیش نمی‌آید. به همین دلیل امکان برنامه‌ریزی برای دوره‌های زمانی مختلف و به صورت چند دوره‌ای به وجود می‌آید. مزیت بعدی که مهم‌ترین مزیت مدل پیشنهادی به حساب می‌آید، استواری مدل هست، مدل پیشنهادی با استفاده از تنظیم پارامتر به روش brute-force و در حالت یک هدفه و چندهدفه با الگوریتم MOPSO حل گردید و جواب‌های حاصل از آن با الگوریتم NSGAIII مقایسه شد.

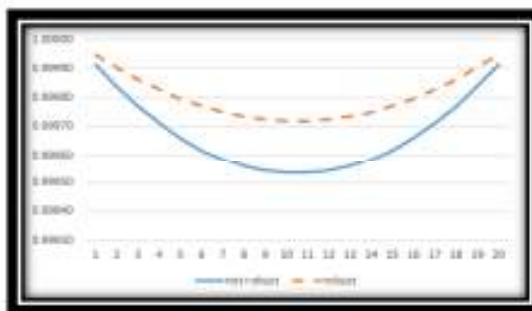
این نتایج نشان می‌دهد که زمان حل الگوریتم MOPSO کمتر است و از سرعت محاسباتی بالاتری برخوردار است، همچنین بهترین جواب بهینه در این الگوریتم کمینه‌تر است که نشان از کارایی مناسب این الگوریتم دارد. در شاخص‌های فاصله و متوسط فاصله از ایده آل نیز الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری را نشان می‌دهد اما در شاخص‌های کیفیت و پراکندگی عملکرد الگوریتم NSGA-II بهتر است؛ بنابراین می‌توان گفت الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم NSGAIII دارد. همچنین جهت مقایسه کارایی مدل در حالت قطعیت و عدم قطعیت، نمودار مجموع توابع هدف ۱،۳،۵ که دارای پارامترهای عدم قطعیت است، نسبت به پارامتر دارای عدم قطعیت یعنی مدت زمان در نظر گرفته شد؛ که با توجه به تغییرات و نوسانات کمتر در حالت تحلیل استوار، نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل در حالت عدم قطعیت هست. در بحث مطالعه موردی با بررسی نتایج مشخص می‌شود که در صورت ثابت بودن تعداد مشتریان و محصول هرچه تعداد وسیله‌ی نقلیه کمتر باشد به جواب بهینه‌ی بهتری خواهیم رسید. همچنین در صورت ثابت بودن تعداد وسایل نقلیه و محصول هرچه تعداد مشتریان کمتر باشد نیز جواب بهینه بهتر خواهد بود.

شکل ۹ نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱،۳،۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم MOPSO را در حالت قطعی نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار مقایسه مقادیر مجموع توابع هدف ۱،۳،۵ نسبت تابع هدف ۲ و ۴ توسط الگوریتم NSGAIII در حالت تحلیل استوار

همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌گردد، نقاط جواب در عدم قطعیت در هر دو الگوریتم از همگرایی خوبی برخوردارند. جهت اثبات این قضیه، نمودار مجموع توابع هدف ۱،۳،۵ که دارای پارامترهای عدم قطعیت است، نسبت به تغییرات مدت زمان پاسخ‌دهی در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که مدل در حالت عدم قطعیت دارای عملکرد بهتری است.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه حالت استوار و قطعی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل ۵ هدفه جدید به صورت اختصاصی جهت شرکت شهید پاک طراحی گردید. این مدل نسبت به مدلی که پیش‌ازین در شهید پاک برای برنامه‌ریزی روزانه استفاده می‌شد چندین برتری دارد. اول اینکه علاوه بر کاهش هزینه‌ها و فاصله که هدف هر مسئله مسیریابی است، هزینه‌ی رانندگان در دو حالت عادی و اضافه‌کاری نیز در نظر گرفته شده است که کمینه نمودن این تابع علاوه بر کاهش

سال ۲۰۰۷ انجام گرفت همخوانی دارد، در این پژوهش، مدل یکپارچه مسیریابی و انتشار کربن دی‌اکسید برای وسایل نقلیه حمل کالا توسعه داده شد و نقش سرعت را در کاهش گازهای گلخانه‌ای تحت سناریوهای تراکم و پنجره زمانی بررسی کرد و صرفه‌جویی را در حدود ۵٪ را گزارش نموده است. در همین راستا برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود برای هر چه کاربردی‌تر شدن این موضوع، ملاحظاتی مانند غیرقطعی بودن تقاضا، چند دوره‌ای بودن و موارد مشابه به موضوع مسیریابی به این پژوهش اضافه گردد. به‌جز مدل مسئله، روش حل آن نیز می‌تواند گسترش یابد به عنوان مثال از سایر الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود این کار با روش‌های بهینه‌سازی مثل الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)، الگوریتم زنبورعسل (BA) و (NSGA-III) انجام گردد تا از لحاظ سرعت، تکرارپذیری، همگرایی و دقت الگوریتم‌ها مقایسه شود. همچنین توسعه الگوریتم‌های بهبوددهنده برای این موضوع به کمک روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری نیز می‌تواند موضوع‌های مناسبی پیشروی محققان باشد. مورد دیگری که می‌توان در نظر گرفت مسئله انتخاب نوع وسیله نقلیه بر اساس معیارهایی نظیر سبز بودن یا تکنولوژی است. همچنین در تحقیقات آتی می‌توان از سایر رویکردهای مدل‌سازی احتمالی استفاده کرد یا این رویکرد را با سیستم‌های فازی و یا هوش مصنوعی ترکیب و نتایج حاصل را باهم مقایسه نمود.

۷-پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem
2. Brute-Force
3. Dantzig
4. Ramser
5. Clarke
6. Wright
7. Banos
8. Bell
9. McMullen
10. Green supply chain management
11. Andelmin
12. Bartolini
13. Green vehicle routing problem
14. partitioning
15. Zhu
16. Zhai
17. Subramanyam
18. Berkoune
19. Lee
20. Michael
21. Talarico
22. Barkaoui
23. Diabat

در نهایت با بررسی مقادیر به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بهترین ترکیب جهت حمل و نقل، خدمت‌دهی به ۴ مشتری با ۴ محصول متفاوت و ۳ وسیله نقلیه هست؛ که با افزایش تعداد مشتریان به علت پیچیدگی مسئله فاصله با جواب بهینه بیشتر می‌گردد. همچنین با توجه به اطلاعات به دست آمده از شرکت شاهد پاک جواب بهینه، در حالت قبل از اجرای مدل در حالت جمع وزنی ۳,۷۱۱,۱۱۵ است که نسبت به بهترین جواب بهینه بعد از اجرای مدل با مقدار ۱۹۱,۳۲۵ بسیار بدتر است و با توجه به مرز پارتوی مشخص شده جواب به دست آمده در حالت واقعی خارج از مرز پارتو است و پس از اجرای مدل پیشنهادی، شاهد کاهش محسوس هزینه‌ها، زمان و مسافت طی شده خواهیم بود. همچنین در بحث سبز بودن به جای استفاده از تابع معمول انتشار از تاثیر مستقیم وزن بر مصرف سوخت استفاده است که با افزایش وزن، مصرف سوخت و در نتیجه هزینه آن نیز افزایش می‌یابد.

مدل فوق منجر به کاهش هزینه‌ای حدود ۵۰۰۰۰۰۰ ریال (معادل پنجاه هزار تومان) در هر روز آن‌هم فقط از جنس کاهش هزینه مصرف سوخت خودروها (بدون در نظر گرفتن کاهش هزینه استهلاک) در انبار شده است، به‌طور متوسط ماهانه حدود ۱۵۰۰۰۰۰۰ ریال (معادل یک و نیم میلیون تومان، با احتساب کاهش ۱۵۰۰۰ کیلومتر طی مسافت خودروها در طول یک ماه و نرخ بنزین ۱۰۰۰۰ ریالی) در هزینه‌های توزیع صرفه‌جویی گردیده است. این عدد در بازه زمانی یک‌ساله برای کل شرکت حدود ۵۰۰۰۰۰۰۰۰ ریال (معادل پنجاه میلیون تومان) خواهد بود که عدد بسیار قابل توجهی است. البته با توجه به اینکه محصول مورد بررسی از نوع حجمی و سبک بوده است و همچنین خدمت‌دهی صرفاً در داخل شهر انجام می‌شده است برای مشاهده‌ی کارایی بیشتر مدل می‌توان برای محصولات سنگینتر و پوشش سرویس دهی بالاتر این مدل را به کار برد. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی، با نتایج حاصل از تحقیقات توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۱)، در مسئله مسیریابی آلودگی تحت عدم قطعیت گذاشت و برداشت که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل شده است، در مواردی نظیر تأثیرگذاری هم‌زمان مسائل زیست‌محیطی و مسیریابی و کاهش زمان تحویل کالا همخوانی دارد. همچنین نتایج حاصل از پژوهش با نتایج حاصل از پژوهشی که توسط پالمر^{۳۶} در

NSGA-II برای کاهش زمان سفر و افزایش کارایی اقتصادی و زیست محیطی سیستم"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل ۸(۱)، ص. ۲۹-۵۱.

-علیقیان، م. و بهروزی، م.، (۱۳۸۵)، "ارائه یک مدل برنامه ریزی ریاضی به منظور مکان یابی انبارها در مسیریابی وسایل نقلیه یک واحد تولیدی با ارائه حل مدل"، دومین کنفرانس لجستیک و زنجیره تامین، تهران، انجمن لجستیک ایران.

-عیدی، ع.ر.، قاسمی نژاد، ع.، محقق، حنیف، (۱۳۹۲)، "مسیریابی وسایل نقلیه چند هدفه با کالاهای مناسبتی"، نشریه مهندسی صنایع ۴۷ (۲)، ص. ۲۱۵-۲۲۸.

-مرندی، ف. ذگردی، س.ح.، (۱۳۹۶)، "یکپارچگی زمانبندی تولید و توزیع در زنجیره تامین فرآورده‌های لبنی با استفاده از الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل ۸(۴)، ص. ۵۴۵-۵۶۵.

-نوروزی، ن.، رزمی، ج.، عمل نیک، م.، (۲۰۱۳)، "مسئله مسیریابی وسایط نقلیه باهدف کاهش سوخت مصرفی و تعداد وسایط نقلیه توسط الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات"، نشریه مهندسی صنایع ۴۷ (۱)، ص. ۱۰۵-۱۲۲.

-Afshar-Bakeshloo, M., Mehrabi, A., Safari, H., Maleki, M., & Jolai, F., (2016), "A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria", Journal of Industrial Engineering International, 12(4), pp.529-544.

-Alinaghian, M., & Zamani, M., (2016), "Three New Heuristic Algorithms for the Fleet Size and Mix Green Vehicle Routing Problem", Journal of Industrial and Systems Engineering, 9(2), pp.88-101.

-Andelmin, J., & Bartolini, E., (2017), "An Exact algorithm for the green vehicle routing problem", Transportation Science, 51(4), pp.1288-1303.

-Archetti, C., Jabali, O., & Speranza, M. G., (2015), "Multi-period vehicle routing problem with due dates, Computers & Operations Research", 61, pp.122-134.

-Barkaoui M., Berger J., Boukhtouta A. (2015), "Customer satisfaction in dynamic

24. Bektas
25. Archety
26. Hites
27. Deb
28. Gupta
29. Zitzler
30. Thiele
31. Srinivas
32. Deb
33. Crowding Distance
34. Crossover
35. Mutation
36. Coello
37. R Chapman
38. Parsopoulos
39. Quality metric
40. Mean Ideal Distance
41. Spacing metric
42. Diversification metric
43. Palmer

۸-مراجع

-آذر، ع.، ربیعه، م.، مدرس یزدی، م.، فطانت فرد حقیقی، م.، (۱۳۸۹)، "مدل ریاضی منبع‌یابی چند هدفه استوار- فازی رویکردی در مدیریت ریسک زنجیره ایران خودرو"، پژوهش‌های مدیریت در ایران.

-پویا، ع.ر.، (۱۳۸۳)، "طراحی مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید و توزیع شرکت آزمایش (رویکرد زنجیره تامین)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدیریت، دانشگاه تربیت مدرس.

- توکلی مقدم، ر.، صالحیان، ف.، نوروزی، ن.، (۱۳۹۶)، "حل مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با در نظر گرفتن رضایتمندی مشتریان و کاهش انرژی مصرفی با الگوریتم زنبورعسل"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، دوره ۸، مهر ۹۶.

-رجبی، م.، خالوزاده، ح.، (۱۳۹۳)، "بهینه‌سازی و مقایسه سبد سهام در بورس اوراق بهادار تهران با بهره مندی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مالی ۱۶(۲)، ص. ۲۵۳-۲۷۰.

-زمانی، م.، علیقیان، م.، (۱۳۹۴)، "مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن، کنفرانس بین‌المللی انجمن ایرانی تحقیق در عملیات"، تهران.

-ساحل‌گزین، م.ر.، و علی محمدی، ع.، (۲۰۱۶)، "بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت و توقف قطارهای مترو با استفاده از الگوریتم

- Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. J. (2017), "A Multi-objective optimization model for project scheduling with time-varying resource requirements and capacities" *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10, pp.92-118.
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I., (2017), "A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products", *Journal of manufacturing systems*, 42, pp.93-103.
- Hites R., De Smet Y., Risse N., Salazar-Neumann M., Vincke P., (2006), "About the applicability of MCDA to some robustness problems", *European Journal of Operational Research* 174, pp.322-332.
- JohariM.HosseiniMotlag, M., Nematollahi M., (2016), "Coordinating pricing and periodic review replenishment decisions in a two-echelon supply chain using quantity discount contract, *Journal of Industrial Engineering and Management Studies* 3 (2), pp.58-87.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G., (2016), "Thirty years of heterogeneous vehicle routing", *European Journal of Operational Research*, 249(1), pp.1-21.
- Laskari, E. C., Parsopoulos, K. E., & Vrahatis, M. N., (2002), "Particle swarm optimization for integer programming", In *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on Vol. 2*, pp. 1582-1587.
- Milne, R., Salari, M., & Kattan, L., (2018), "Robust Optimization of Airplane Passenger Seating Assignments Aerospace", 5(3), pp.80-81.
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., & Syed, M. N., (2017), "Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, pp.146-172.
- Moore, J and R. Chapman, (1999), "Application of particle swarm to multiobjective optimization", Technical report, Department of Computer Science and Software Engineering, Auburn University.
- vehicle routing problem with time windows", *Appl Soft Comput* 35, pp.423-432.
- Bashiri, M., (2016), "Green Vehicle Routing Problem with Safety and Social Concerns", *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 10(21), pp.93-100.
- Bell, J. E., McMullen, P. R., (2004), "Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem", *Advanced Engineering informatics*, 1 (8), pp.41-48.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A., (2000), "Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*", 88(3), pp.411-424.
- Bertsimas, D., Sim, M., (2004), "The Price of Robustness. *Operations research*, 52(1), pp.35-53.
- Clarke G, Wright JW, (1964), "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Oper Res* 12, pp.568-81.
- Coello, C. A. C., Pulido, G. T., & Lechuga, M. S., (2004), "Handling multiple objectives with particle swarm optimization, *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8(3), pp.256-279.
- Dantzig, G. and Ramser, J. H., (1959), "The truck dispatching problem", *Management Science*, Vol.6, pp. 80-91.
- Deb, K., & Gupta, H., (2006), "Introducing robustness in multi-objective optimization", *Evolutionary computation*, 14(4), pp.463-494.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002), "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), pp.182-197.
- Dehghan Nasiri, Saeideh, (2014), "Vehicle routing on real road networks." Ph.D. diss., Lancaster University, 2014.
- Eshtehadi, R., Fathian, M., Pishvae, M. S., & Demir, E., (2018), "A hybrid metaheuristic algorithm for the robust pollution-routing problem", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(1).

- Stefan Bauer, Stefan Bauer, (2010), Christof Seiler, Thibaut Bardyn, Thibaut Bardyn, Philippe Buechler, Philippe Buechler, Mauricio Reyes and Mauricio Reyes. Atlas-Based Segmentation of Brain Tumor Images Using a Markov Random Field-Based Tumor Growth Model and NonRigid Registration. EMBC, Vol. 2010, pp. 4080–4083.
- Srinivas, N. and Deb, K., (1994), “Multiobjective Optimization Using Non-Dominated Sorting in Genetic Algorithms”, *Evolutionary Computation*, 2, pp.221-248.
- Subramanyam, A., Mufalli, F., Pinto, J. M., & Gounaris, C. E., (2017), “Robust Multi-Period Vehicle Routing under Customer Order Uncertainty”.
- Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2015), “Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 244(2), pp.457-470.
- Vahdani, B., M. Zandieh, and Reza Tavakkoli-Moghaddam, (2011), "Two novel FMCDM methods for alternative fuel buses selection", *Applied Mathematical Modelling* 35, No. 3, pp.139-1412.
- Zhu, Ruiqi and Zhai, Yunkai, (2017), "Research on the application of VRP theory in logistics transportation", *MATEC Web Conference article*.
- Zitzler, E. and L. Thiele, (1999), “Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3(4), pp.257–271.
- Nikabadi, M., & Naderi, R., (2016), “A hybrid algorithm for unrelated parallel machines scheduling”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(4), pp.681-702.
- Olfat, L., Amiri, M., & Jafarian, A. (2017), “Vehicle Routing Problem In Cross-Dock Using Genetic Algorithm”, Case: Iran Khodro Company.
- Palmer, A., (2007), “The Development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles”, Ph. D. Thesis, Cranfield University, School of Management.
- Saif, Y., Rizwan, M., Almansoori, A., & Elkamel, A., (2017), “A circular economy solid waste supply chain management based approach under uncertainty”, *Energy Procedia*, 142, pp.2971-2976.
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014), “The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations”, *Transportation Science*, 48(4), pp.500-520.
- Schutze, O., Talbi, E. G., Pulido, G. T., Coello, C. C., & Santana-Quintero, L. V. (2007), “A memetic PSO algorithm for scalar optimization problems. In *Swarm Intelligence Symposium*”, SIS 2007, IEEE, pp. 128-134.
- Shari, M., Salari, M., A., (2015), “GRASP algorithm for a humanitarian relief transportation problem”, *EN, Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume (41), pp. 259-269.

Optimization of Vehicle Routing Problem under The Uncertainty Conditions, with Emphasis on Green Practices - Lean and Customer Satisfaction (Case Study: Shahd Pak Co.)

Mohsen Shafiei Nikabad, Assistant Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Economics and Management, Semnan University, Semnan, Iran.

Ehsan Molayi, Head of Industrial Management Department, Binalood Higher Education Institute, Mashad, Iran.

Mahsa Akhavan Rad, M.Sc., Grad., Management Department, Binalood Higher Education Institute, Mashad, Iran.

E-mail: shafiei@semnan.ac.ir

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

Given the importance of distribution planning among the chain loops of a firm, in this research, the routing problem of cargo transport fleet is considered as the issue of transportation routing (VRP). Among the innovations of this model one can point, it is possible to define the penalty for violating the time window (delay and rush to delivery of the product) to ensure customer satisfaction, considering the direct relationship between weight and fuel consumption, which reducing weight, in addition to reducing costs, reduces the destructive effects of Greenhouse gas, air pollution and carbon dioxide. Reducing drivers costs, which eventually leads to lower total costs, in addition to make lean leads to Increase customer satisfaction, makes use of the concept of service time in a variety of multi product and variable conditions, taking into account the cost of product distribution .In this research, considering the Shahd-e-Pak as a case study, the distribution of product from warehouse to the consumer is modeled as a supply chain. Considering the NP-HARD problem in order to find the near optimal solutions, after setting the parameter in a comprehensive search method, the model is modeled in single-objective and multi-objective mode using Python software using heterogeneous genetic multi-objective algorithms, 2 (NSGAI) and Particle Swarm Optimization (MOPSO). At the end, these algorithms were compared with performance evaluation criteria such as runtime and the quality of the answers, and the highest algorithm was determined for each criterion. The results indicate the effectiveness of the proposed model and the superiority of using a steady-to-definitive analysis method that leads to optimization Transportation path, cost reduction and ultimately customer satisfaction. Also, by comparing the performance evaluation criteria and the duration of the implementation of the model, it was found that the MOPSO algorithm is more efficient than NSGAI.

Keywords: Optimizing Multi-Threading, Vehicle Routing, Customer Satisfaction, Green-Lean Approach, Strong Analysis