

مسیریابی پایدار وسایل نقلیه ناهمگن با تحویل و برداشت همزمان با لحاظ نمودن فاکتورهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی به صورت یکپارچه

مقاله پژوهشی

مهرداد میرزاباقی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فریبرز جولای^{*}، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

جعفر رزمی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: fjolai@ut.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۲۵۰-۲۲۷

چکیده

در این مقاله به معرفی مسئله مسیریابی پایدار وسایل نقلیه ناهمگن در یک شبکه با جریان های مستقیم و معکوس می پردازیم، جایی که فاکتورهای مختلف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در قالب یک مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی دو هدفه لحاظ می شوند. هدف مسئله طراحی مسیریابی سرویس دهی و تعیین سرعت بهینه وسایل حمل و نقل به گونه ای است که از یک سو میزان سوخت مصرفی و به تبع آن آلودگی های ناشی از فرایند حمل و نقل حداقل شود و از سوی دیگر و در جهت ایجاد رضایتمندی بین رانندگان، بار کاری وسایل حمل و نقل مختلف از نظر مدت زمان فعالیت بالانس باشد. برای تخمین میزان سوخت مصرفی از تابع جامعی استفاده شده است که در آن میزان سوخت مصرفی تابعی از مسافت طی شده همچنین سرعت، میزان بار و مشخصه های فنی وسیله نقلیه، می باشد. جهت حل مسئله به فرم دقیق از روش حدی تقویت شده استفاده می شود. همچنین برای حل مسئله در ابعاد بزرگ دو الگوریتم فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم آتش بازی توسعه داده شده است. برای افزایش کارایی الگوریتم های یاد شده از یک متد جستجوی محلی نیز در ساختار آنها استفاده شده است. نتایج حل مثال های مختلف نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم آتش بازی است. همچنین تحلیل نقاط پارتو نشان می دهد با افزایش حدودا یک درصدی در هزینه سوخت، می توان طولانی ترین تور را حتی تا بیش از ۲۰ درصد و پراکندگی بین مدت زمان کارکرد ماشین های مختلف را تا ۱۵ درصد کاهش داد. همچنین این پراکندگی با افزایش ۳ درصد در مصرف سوخت می تواند تا ۲۵ درصد کاهش یابد.

واژه های کلیدی: الگوریتم های فراابتکاری، بهینه سازی سرعت، بهینه سازی چند هدفه، پایداری، مسیریابی سبز

۱- مقدمه

فاکتورهای اقتصادی در تصمیم گیری هایشان شده است. فاکتورهای اجتماعی نظیر ایجاد فرصتهای شغلی، اجرای قوانین کار، رضایتمندی مشتریان و کارکنان و فاکتورهایی از این دست و فاکتورهای زیست محیطی از جمله کاهش آلودگی هوا و کاهش مصرف منابع طبیعی. کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه در سال ۱۹۸۷ اولین تعاریف را برای مفهوم توسعه

در جهان امروز، توسعه در عرصه های اقتصادی و صنعتی با سرعت بیشتری نسبت به گذشته در حال وقوع است. به موازات این پیشرفت ها در فضای اقتصادی، نگرانی ها در خصوص مسائل زیست محیطی و اجتماعی موجب توجه روز افزون دولتها و سازمانها به مفهوم "توسعه پایدار"^۱ در جهت لحاظ نمودن فاکتورهای اجتماعی و زیست محیطی در کنار

تحقیقات در سالهای اخیر به جای تمرکز بر روی اهداف کلاسیک مسائل حمل و نقل که بیشتر مبتنی بر هزینه های حمل و نقل هستند، حداقل شدن مصرف سوخت در فرایند حمل و نقل را هدف خود قرار داده اند چراکه از دیدگاه آنها آلودگیهای منتشر شده رابطه مستقیم با میزان سوخت مصرفی دارد (Cheng, Yang, Qi, & Rousseau, 2017). در همین راستا مطالعات زیادی در خصوص تعیین عوامل اثر گذار بر مصرف سوخت و تعریف روابط ریاضی جهت تخمین میزان سوخت مصرفی در طول فرایند حمل و نقل انجام شده است (Demir, Bektaş, & Laporte, 2014a). مسافت طی شده، بار وسیله حمل و نقل، سرعت وسیله و مشخصه های فیزیکی و موتوری وسیله حمل و نقل از جمله مهمترین عوامل اثر گذار در میزان سوخت مصرفی می باشد. بارت و همکاران (M Barth, Younglove, & Scora, 2005)، (Matthew Barth & Boriboonsomsin, 2009) در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ یکی از جامع ترین مدل های تخمین مصرف سوخت را ارائه نمودند که پس از آن توسط بسیاری از محققین در مدل های بهینه سازی حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفت. از جمله بکتاش و لاپورته (Bektaş & Laporte, 2011)، فرانچتی و همکاران (Anna Franceschetti et al., 2016)، (A Franceschetti, Honhon, Van Woensel, Bektaş, & Laporte, 2013)، دمیر و همکاران (Demir, Bektaş, & Laporte, 2012b). از این مدل جهت تخمین میزان سوخت مصرفی در مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل^۴ (VRP) استفاده نموده اند. مسئله VRP از جمله مسایل مهم و شناخته شده در بسیاری از سیستم های حمل و نقل و توزیع می باشد که کاربرد بسیاری در شبکه زنجیره تامین خصوصاً در لجستیک شهری دارد. یک مسئله VRP به طور خلاصه عبارتست از مسئله طراحی بهینه مسیرهای سرویس دهی توسط ناوگانی از وسایل حمل و نقل مستقر در یک یا چند قرارگاه به تعدادی مشتری با مکان های جغرافیایی معلوم و تحت شرایط مشخص.

علاوه بر آلودگی، جنبه دیگر نگرانی های زیست محیطی، استفاده بهینه از منابع مصرفی می باشد. همین موضوع موجب تمرکز بر روی جریان های معکوس در طول زنجیره تامین و برنامه ریزی برای جمع آوری کالاهای بازگشتی شده است. در

پایدار به شکل زیر ارائه نمود. طبق این تعریف، توسعه پایدار، توسعه ای است که «نیازهای حال حاضر را برآورده سازد، بدون اینکه توانایی نسل های آتی در برآورده ساختن نیازهایشان تهدید شود» (Pishvae, Razmi, & Torabi, 2014). در تعریفی دیگر و از دیدگاه عملیاتی، یکپارچه سازی جنبه های زیست محیطی و اجتماعی در کنار جنبه های اقتصادی در فرایند تصمیم گیری سازمانها، تحت عنوان ابعاد سه گانه پایداری سازمانی^۲ شناخته می شود (Jaehn, 2016).

در خصوص مفهوم پایداری در مدیریت زنجیره تامین، در مقابل دیدگاه کلاسیک در این حوزه که عموماً تمرکز اصلی آن بر اهداف اقتصادی و عملکرد مالی زنجیره است، در سالهای اخیر مفهومی تحت عنوان مدیریت زنجیره تامین پایدار^۳ تعریف شده است که هدف اصلی آن یکپارچه سازی جنبه های زیست محیطی و اجتماعی در کنار جنبه های اقتصادی در فرایند مدیریت زنجیره تامین می باشد (Eskandarpour, Dejax, & Miemczyk, & Péton, 2015).

یکی از مهمترین آثار زیست محیطی فعالیتهای زنجیره تامین، انتشار گازهای گلخانه ای خصوصاً گاز دی اکسید کربن (CO₂) می باشد. فعالیتهای از جمله تولید، حمل و نقل، بازیافت و به طور کلی اکثر فعالیتهای موجود در یک شبکه زنجیره تامین باعث انتشار گاز CO₂ می شوند. اما در این بین فعالیتهای حمل و نقل مهمترین تاثیر را در انتشار این گازها دارند (Dekker, Bloemhof, & Mallidis, 2012). از این رو در سالهای اخیر بسیاری از شرکتها در صدد اتخاذ راهکارهایی جهت کاهش آلودگیهای ناشی از فعالیتهای حمل و نقل برآمده اند. از جمله برخی شرکتهای تولیدی در آلمان و انگلیس در حال نوسازی و تغییر ناوگان حمل و نقل خود به خودروه های الکتریکی و هیبریدی می باشند (Browne, Allen, & Leonardi, 2011). اما از آنجا که چنین تغییراتی عموماً نیازمند هزینه های سرمایه گذاری بسیار بالایی می باشند، در رویکردی دیگر بسیاری از کمپانیها به جای تغییرات در ناوگان حمل و نقل خود، تصمیمات عملیاتی را با محوریت کاهش مصرف سوخت و آلاینده ها اتخاذ می نمایند. بن جعفر و همکاران (Benjaafar, Li, & Daskin, 2013) نشان دادند که رویکرد دوم به نسبت رویکرد بکارگیری تجهیزات کم مصرف، در برخی موارد با هزینه کمتر، تاثیر چشمگیری در کاهش آلاینده ها دارد. از این رو بسیاری از

طولانی ترین مسیر به طور متوسط دو برابر کوتاهترین مسیر است.

نکته حائز اهمیت اینکه حل مسئله مسیریابی صرفاً با لحاظ نمودن هدف بالانس بار کاری هم میتواند منجر به افزایش کل مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل شود. از این رو در این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با تحویل و برداشت همزمان در قالب یک مسئله دوهدفه میپردازیم که در آن با تعیین سرعت و توالی سرویس دهی بهینه برای هر یک از وسایل نقلیه، از یک سو به دنبال حداقل نمودن کل سوخت مصرفی میباشیم و از سوی دیگر به دنبال بالانس مدت زمان سفر بین ماشینهای مختلف با ظرفیتهای متفاوت میباشیم. همچنین به تحلیل تاثیر سرعت، مسافت طی شده، بار حمل شده و مشخصه‌های وسیله حمل و نقل (خصوصاً ظرفیت ماشین) بر هر یک از این اهداف میپردازیم.

در ادامه مقاله و در بخش ۲ مقالات مشابه سالهای اخیر بررسی شده و نوآوریهای مسئله پیشنهادی ارائه می‌شوند. در بخش ۳ مسئله مورد نظر تشریح شده و به صورت ریاضی مدل می‌شود. روش حل مدل ریاضی پیشنهادی همچنین دو الگوریتم فراابتکاری در بخش ۴ ارائه خواهند شد. جهت تحلیل مسئله مورد نظر همچنین بررسی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، چندین مثال عددی در بخش ۵ مورد بررسی قرار گرفته اند. در انتها و در بخش ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

بررسی‌های انجام شده توسط بریکر و همکاران (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuyse, 2015) در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که بیش از ۹۳ درصد مطالعات حوزه مسیریابی وسایل حمل و نقل، ابعاد اقتصادی مسیریابی از جمله هزینه مسیریابی (بر اساس زمان یا مسافت طی شده) را در تابع هدف خود منظور نموده‌اند، همچنین در حدود ۴۰ درصد از مقالات بررسی شده توسط آنها، هزینه‌های مربوط به وسیله نقلیه و حقوق راننده‌ها در تابع هدف مد نظر قرار گرفته است و اهداف زیست محیطی و خصوصاً اجتماعی به نسبت اهداف اقتصادی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

به طور کلی بحث آلاینده‌ها و مصرف سوخت در مسئله مسیریابی، تحت عنوان مسیریابی سبز^۷ برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط کارا و همکاران (Kara, Kara, & Yetis,

همین راستا بسیاری از شرکتهای تولیدی به برنامه‌ریزی یکپارچه برای جریانهای مستقیم و معکوس در جهت افزایش کارایی سیستم و استفاده از حداکثر ظرفیت زنجیره به خصوص در بخش حمل و نقل روی آورده‌اند. مواردی از جمله زنجیره توزیع خواربار (تحویل شیشه‌های نوشیدنی پر در جهت مستقیم و برداشت شیشه‌های خالی در جهت معکوس)، زنجیره محصولات لبنی (توزیع محصولات تازه و بازگشت محصولات تاریخ گذشته جهت استفاده در صنایع دیگر)، مثال‌هایی از چنین شبکه‌هایی هستند. از دیدگاه مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل، استفاده از پتانسیل یکپارچه‌سازی جریان‌ها منبع مهمی برای صرفه جویی در هزینه‌ها می‌باشد. یکپارچه‌سازی توزیع و جمع‌آوری به عنوان مثال می‌تواند مانع خالی برگشتن وسایل حمل و نقل شود. با پیاده‌سازی مدل‌هایی از جمله مدل‌های مسیریابی وسایل حمل و نقل با تحویل و برداشت همزمان^۸ (VRPSPD) این هدف قابل وصول است، جایی که پس از مراجعه به مشتری، تقاضای مشتری به او تحویل می‌شود و همزمان کالاهای مرجوعی او بارگیری می‌شوند.

یکی دیگر از ابعاد سه‌گانه پایداری در مدیریت زنجیره تامین، ابعاد اجتماعی میباشد که عموماً شامل مباحث مرتبط با عدالت اجتماعی است که تمرکز اصلی آنها بر فعالیتهایی از جمله تامین شرایط کاری مناسب، ایجاد فرصتهای شغلی، تبعیت کمپانیها از قوانین کار و رعایت عدالت اجتماعی و دوری از تبعیض است. از دیدگاه مسئله مسیریابی، برابری^۶ از جمله مهمترین جنبه‌های اجتماعی میباشد که به عنوان نمونه به بالانس بودن بار کاری ماشینهای مختلف (از نظر طول مسیر و زمان سفر و...) که مرتبط با بحث پرداختهای عادلانه و رضایتمندی راننده‌ها می‌باشد، می‌پردازد. بالانس نمودن بارکاری بین رانندگان مختلف از یک سو موجب پذیرش هرچه بیشتر برنامه‌های سرویس دهی از سوی رانندگان، رضایتمندی و دلگرمی آنها و همچنین افزایش کیفیت سرویس دهی به مشتریان می‌شود و از سوی دیگر تا حد امکان از اضافه‌کاری‌های غیر ضروری برخی ماشینها و به تبع آن هزینه‌های اضافه‌کاری جلوگیری می‌نماید. طبق مطالعات انجام شده توسط متل و همکاران (Matl, Hartl, & Vidal, 2016)، در حل مسئله مسیریابی با اهداف اقتصادی، تفاوت بار کاری بین ماشینهای مختلف بسیار زیاد میباشد به گونه‌ای که

می کند سرعت وسیله نقلیه را در سطحی بالا نگه دارد تا سرویس دهی در کوتاهترین زمان ممکن انجام شود و هزینه‌هایی مثل حقوق راننده‌ها حداقل شود. اما تابع هدف هدف دوم سعی میکند سرعت را در سطحی بهینه با حداقل آلودگی حفظ نماید. همچنین ربانی و همکاران (Rabbani, Navazi, Farrokhi-asl, & Balali, 2018) در سال ۲۰۱۸ یک مدل چندهدفه با اهداف حداقل شدن هزینه‌های توزیع و سوخت مصرفی همچنین بالانس بار کاری بین راننده‌ها را ارائه نموده و از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل آن استفاده کرده اند اما در مدلسازی ارائه شده بحث بهینه سازی سرعت وجود ندارد و وسایل حمل و نقل همگن فرض شده‌اند. یکی از نوآوری های این مقاله، بررسی مسئله آلودگی- مسیریابی در قالب یک مسئله دوهدفه می باشد که در هدف دیگر آن سعی می‌شود تا حد امکان بین بار کاری ماشین‌های مختلف (از نظر زمانی) بالانس ایجاد شود. یک فاکتور اثر گذار بر روی زمان سفر و میزان مصرف سوخت، سرعت می‌باشد حال آنکه طبق مطالعات انجام تا کنون مدلی در زمینه بهینه سازی سرعت در چنین مسئله ارائه نشده است. در نوع دیگری از مسائل مسیریابی سبز، استفاده از وسایل حمل و نقل ناهمگن مد نظر قرار گرفته است. جایی که مسیریابی برای چندین نوع وسیله نقلیه متفاوت با ظرفیت متفاوت همچنین میزان مصرف سوخت متفاوت انجام می‌شود. از جمله کک و همکاران (Koç, Bektaş, Jabali, & Laporte, 2014) در سال ۲۰۱۴ توسعه‌ای از مسئله آلودگی- مسیریابی با وسایل حمل و نقل ناهمگن ارائه نمودند که هدف آن حداقل نمودن هزینه‌های ثابت استفاده از وسایل نقلیه و هزینه‌های مسیریابی بود. در مسئله آنها هزینه‌های مسیریابی شامل حقوق راننده‌ها، هزینه سوخت و هزینه میزان گازهای آلاینده منتشر شده می‌شد. از جمله نتایج مهم آن مقاله اینکه استفاده از وسایل حمل و نقل ناهمگن بدون تعیین سرعت بهینه برای آنها، در کاهش کل هزینه‌ها موثرتر از استفاده از وسایل همگن با تعیین سرعت بهینه برای آنها می‌باشد. کک و همکاران (Koç, Bektaş, Jabali, & Laporte, 2016) در سال ۲۰۱۶ مسئله مکانیابی- مسیریابی با وسایل ناهمگن را مورد بررسی قرار دادند و از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی برای حل آن استفاده نموده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر در

(2007) توسعه پیدا کرد. پس از آنها و با ارائه مدل جامع تخمین مصرف سوخت توسط بارت و همکاران (Matthew Barth & Boriboonsomsin, 2009) در سال ۲۰۱۱ و بر مبنای همین مدل بکتاش و لاپورته (Bektaş & Laporte, 2011) نوع جدیدی از مسئله مسیریابی تحت عنوان آلودگی- مسیریابی^۱ را ارائه نمودند که در آن از یک تابع هدف جامع برای حداقل شدن هزینه های ناشی از آلودگی، هزینه های عملیاتی و حقوق راننده ها و هزینه سوخت استفاده شده است. از جمله اهداف اصلی مقاله آنها، تعیین مسیر، سرعت و میزان بار بهینه وسایل نقلیه جهت ایجاد کمترین آلودگی و کمترین هزینه با توجه به مفروضات مسئله بود. در ادامه همان تحقیق، دمیر و همکاران (Demir et al., 2012) الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی را برای حل این مسئله در ابعاد بزرگ ارائه نمودند. کرامر و همکاران (Kramer, Subramanian, Vidal, & Cabral, 2015) در سال ۲۰۱۵ از ترکیب روشهای حل دقیق و یک روش فراابتکاری جستجوی محلی برای حل این مسئله استفاده نمودند. همچنین در سال ۲۰۱۶ دابیا و همکاران (Dabia, Demir, & Woensel, 2016) یک روش حل دقیق مبتنی بر الگوریتم شاخه و قیمت برای حل مسئله فوق ارائه نموده‌اند. با وجود اینکه یکی از عوامل اثر گذار بر میزان سوخت مصرفی میزان بار وسیله نقلیه است و یکی از موضوعات مهم در مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با تحویل و برداشت همزمان میزان بار وسیله نقلیه است، مطالعات کمی در حوزه ترکیب این مسئله با مسئله آلودگی- مسیریابی انجام شده است. از جمله مجیدی و همکاران (Majidi, Hosseini-motlagh, & Ignatius, 2018) که در سال ۲۰۱۸ توسعه ای از این مسئله با لحاظ کردن پنجره زمانی ارائه کردند. اما در مطالعه آنها یکی از مفروضات موجود در دنیای واقعی یعنی وجود وسایل حمل و نقل ناهمگن لحاظ نشده است. همچنین مسئله آنها تنها به بررسی کاهش مصرف سوخت پرداخته است. در کنار تحقیقات فوق، در سالهای اخیر برخی از مقالات به بررسی مسئله آلودگی- مسیریابی در حالت چند هدفه پرداخته اند. از جمله دمیر و همکاران (Demir et al., 2014b) این مسئله را در حالت دو هدفه و با در نظر گرفتن مجموع زمان سفر ماشینهای مختلف و همچنین میزان سوخت مصرفی بررسی نموده‌اند. در مدل ارائه شده توسط آنها هدف اول سعی

سیستم ناهمگن بوده و مجموعاً $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ ماشین در سیستم حضور دارند و هر کدام یکی از $H = \{1, 2, \dots, |H|\}$ نوع ماشین مختلف می‌باشند. در سرویس‌دهی به مشتریان کمبود مجاز نیست و محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه در طول سرویس‌دهی باید ارضا شود. هدف اصلی مسئله تعیین سرعت بهینه وسایل نقلیه در طول سفر همچنین تخصیص ماشین‌ها به مشتریان و تعیین توالی سرویس‌دهی به آنها به گونه‌ای می‌باشد که از یک سو مجموع سوخت مصرفی و به تبع آن انتشار گازهای آلاینده حداقل شود و از سوی دیگر بین ماشین‌های مختلف که بعضاً ظرفیت‌های متفاوتی نیز دارند، از نظر مدت زمان کارکرد تعادل برقرار باشد. نکته حائز اهمیت اینکه همانطور که در بخش بعد خواهیم دید، متغیر سرعت از یک سو بر روی میزان مصرف سوخت تأثیر مستقیم دارد و از سوی دیگر بر روی مدت زمان سفر. همچنین میزان مصرف سوخت علاوه بر سرعت و مسافت، به وزن وسیله نقلیه نیز بستگی دارد به گونه‌ای که هر چه مشتریان با تقاضای بیشتر سریعتر سرویس‌دهی شوند، امکان سبکتر شدن وسیله نقلیه و به تبع آن کاهش مصرف سوخت وجود دارد اما ممکن است این موضوع موجب افزایش مسافت طی شده شود. از این رو این مسئله در قالب یک مسئله دو هدفه مورد بررسی قرار می‌گیرد که هدف اول آن حداقل شدن میزان سوخت مصرفی و هدف دوم آن بالانس بار کاری (طول سفر) بین ماشین‌های مختلف می‌باشد. در چنین شرایطی، اولین قدم تعریف یک رابطه ریاضی جهت تخمین میزان سوخت مصرفی به صورت تابعی از مسافت، سرعت، بار و همینطور مشخصه‌های فیزیکی وسیله نقلیه می‌باشد.

۳-۲- محاسبه میزان سوخت مصرفی

در ادبیات موضوع مدل‌های ریاضی کمی جهت تخمین میزان سوخت مصرفی در فرایند حمل و نقل وجود دارد. یکی از جامع‌ترین این مدل‌ها که در سال‌های اخیر کاربردهای موفقی در مسئله مسیریابی داشته است مدل ارائه شده توسط بارت و همکاران (Matthew, M Barth et al., 2005) (Barth & Boriboonsomsin, 2009) می‌باشد. بر طبق این مدل میزان سوخت مصرفی (F^m) (بر حسب لیتر) وسیله نقلیه نوع m ($m \in H$) پس از طی مسافتی به طول d (بر حسب متر) با سرعت v (بر حسب متر بر ثانیه) و با وزن M^m

سال ۲۰۱۷، چنگ و همکاران (Cheng et al., 2017) توسعه‌ای از مسئله آلودگی- مسیریابی با در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی، فاکتورهای زیست محیطی و وسایل نقلیه ناهمگن را مورد بررسی قرار دادند که هدف آن حداقل نمودن مجموع هزینه‌های موجودی، دستمزد رانندگان، هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه و هزینه سوخت بود. به طور کلی نوآوری‌های این مقاله در چند دسته قابل تقسیم بندی هستند: (۱) بررسی تأثیر سرعت وسیله نقلیه در قالب یک مسئله دوهدفه که در یک هدف سرعت بر روی میزان سوخت مصرفی اثرگذار است و در هدف دیگر بر مدت زمان سفر و بالانس بارکاری ماشین‌های مختلف. (۲) بررسی تأثیر بار وسایل نقلیه بر میزان مصرف سوخت در مسئله مسیریابی با تحویل و برداشت همزمان با بکارگیری یک تابع جامع جهت تخمین مصرف سوخت که در آن مصرف تابعی از مسافت، بار، سرعت و مشخصه‌های وسیله حمل و نقل است. (۳) بررسی تأثیر هدف بالانس بارکاری (از نظر زمانی) بر روی میزان سوخت مصرفی در مسئله ای با وسایل ناهمگن که ظرفیت‌های متفاوتی نیز دارند و (۴) توسعه روش حل فراابتکاری چندهدفه بر مبنای الگوریتم آتش بازی^۹.

۳- تعریف مسئله و مدلسازی ریاضی

۳-۱- تعریف مسئله

همانطور که پیشتر گفتیم، در این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل ناهمگن با تحویل و برداشت همزمان می‌پردازیم. شبکه مورد بررسی در اینجا یک شبکه لجستیک با جریان مستقیم و معکوس با یک تامین کننده و تقاضای مشخصی از محصولات دارد که باید به او تحویل داده شود همچنین مقدار مشخصی محصول بازگشتی دارد که باید از او تحویل گرفته شود. افق زمانی روزانه می‌باشد و هر وسیله نقلیه سفر خود را از دپو آغاز می‌نماید و پس از سرویس‌دهی به مجموعه‌ای از مشتریان و پیش از پایان ساعت کاری به دپو باز می‌گردد. هر ماشین پس از رسیدن به هر مشتری محصولات مورد نیاز آن را تحویل داده و محصولات بازگشتی را در همان لحظه بارگیری می‌نماید. ماشین‌های مورد استفاده در این

جدول ۲. مقادیر پارامترهای وابسته به نوع وسیله نقلیه

نماد $\lambda = \varepsilon / (\kappa \psi)$	شرح	نوع وسیله		
		سبک	متوسط	سنگین
w^m	وزن بدون بار وسیله نقلیه (kg)	۴۶۷۲	۶۳۲۸	۱۳۱۵۴
Q^m	حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه (kg)	۲۵۸۵	۵۰۸۰	۱۷۲۳۶
k^m	ضریب اصطکاک موتور (kj/rev/L)	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵
N^m	دور موتور (rev/s)	۳۹	۳۳	۳۰/۲
V^m	حجم انتقال موتور (L)	۲/۷۷	۵	۶/۶۶
C_d^m	ضریب اصطکاک آیرودینامیک	۰/۶	۰/۶	۰/۷
A^m	سطح پیشانی ماشین (m^2)	۹	۹	۹/۸
n_{tf}^m	کارایی سیستم انتقال نیرو	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، با استفاده از تابع فوق، تاثیر سرعت و میزان بار وسایل نقلیه مختلف را بر میزان مصرف سوخت مورد بررسی قرار داده ایم. در قسمت (a) میزان بار وسایل نقلیه را برابر با ۷۵ درصد ظرفیت آنها قرار داده و میزان مصرف سوخت آنها در سرعتهای مختلف محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می شود کمترین میزان مصرف در سرعتهای بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت می باشد و در سرعتهای دیگر مصرف سوخت می تواند حتی تا دو برابر افزایش یابد که این نشان دهنده اهمیت لحاظ نمودن سرعت در فرایند برنامه ریزی حمل و نقل می باشد. همچنین در قسمت (b) سرعت وسایل نقلیه برابر با ۳۵ کیلومتر در ساعت قرار داده شده و تاثیر میزان بار وسیله نقلیه بر مصرف سوخت مورد تحلیل قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود در وسایل نقلیه مختلف، میزان مصرف سوخت زمانی که وسیله نقلیه پر می باشد نسبت به زمانی که خالی است، از ۲۰ تا ۶۰ درصد می تواند افزایش یابد. این موضوع خصوصا در مسائل با تحویل و برداشت همزمان اهمیت ویژه ای پیدا می کند چراکه در این نوع مسائل از آنجا که بحث برداشت محصولات از مشتریان نیز وجود دارد، بر خلاف مسئله کلاسیک مسیریابی، بار وسیله نقلیه در طول مسیر لزوما کاهش نمی آید و لحاظ کردن این فاکتور در مدلسازی مسئله موجب می شود توالی سرویس دهی به گونه ای انجام شود که تا حد ممکن وسیله نقلیه مسافت های کوتاهتری را با حداکثر ظرفیت طی کند.

(مجموع وزن ماشین و بار آن بر حسب کیلوگرم) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود که در آن:

$$\alpha = \tau + g \sin \theta + g C_r \cos \theta$$

$$\gamma^m = 1 / (1000 n_{tf}^m \eta)$$

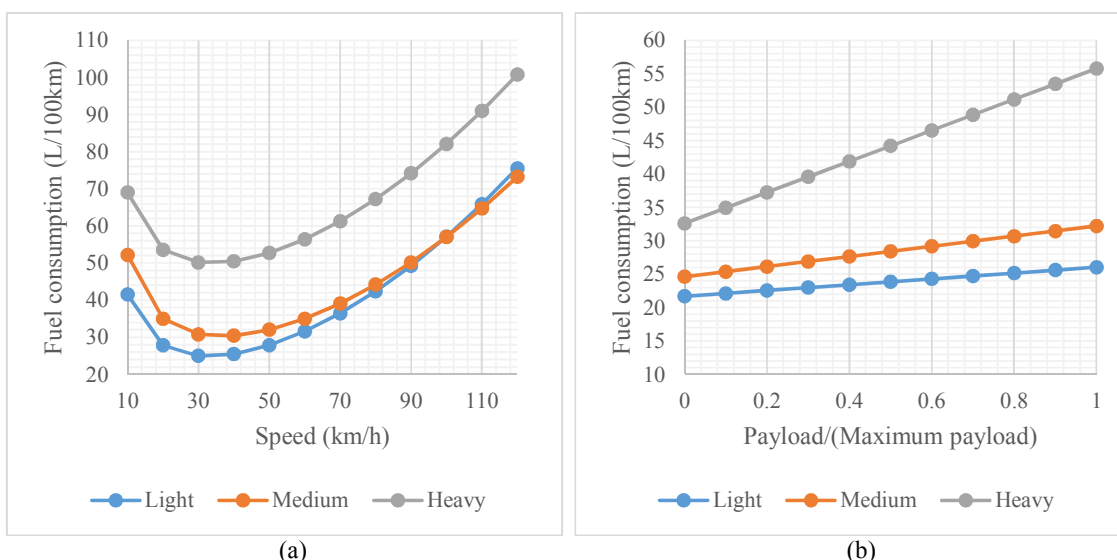
$$\beta^m = 0.5 C_d^m \rho A^m$$

$$F^m = \lambda \left(\frac{k^m N^m V^m d}{v} + M^m \gamma^m \alpha d + \beta^m \gamma^m d v^2 \right) \quad (1)$$

بر اساس مطالعات انجام شده توسط دمیر و همکاران (Demir et al., 2012)، سویسال و همکاران (Soysal, Bloemhof-Ruwaard, Haijema, & van der Vorst, 2016) و کک و همکاران (Haijema, & van der Vorst, 2015) مقادیر استفاده شده برای پارامترهای تابع فوق به صورت جدول ۱ و ۲ می باشد. پارامترهای مستقل از نوع وسیله نقلیه در جدول ۱ ارائه شده اند. همچنین در خصوص پارامترهایی که وابسته به نوع وسیله نقلیه هستند، وسایل نقلیه بر حسب وزن و ظرفیت آنها به دسته سبک، متوسط و سنگین تقسیم شده اند و مقادیر پارامترها برای هر یک از آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مستقل از نوع وسیله نقلیه

مقدار	شرح	نماد
۱	نسبت جرمی هوا به سوخت در ورودی موتور	ε
۹/۸۱	شتاب جاذبه (m/s^2)	g
۱/۲۰۴۱	چگالی هوا (kg/m^3)	ρ
۰/۰۱	ضریب اصطکاک	C_r
۰/۴۵	پارامتر کارایی موتورهای دیزلی	η
۴۴	ارزش گرمایی سوخت دیزل (kj/g)	κ
۷۳۷	ضریب تبدیل گرم به لیتر	ψ
۰	شیب جاده	θ
۰	شتاب (m/s^2)	τ



شکل ۱. تاثیر سرعت (a) و میزان بار وسیله نقلیه (b) بر میزان مصرف سوخت

۳-۳- مدل سازی ریاضی

مجموعه‌ها و اندیشه‌ها:

$$\begin{aligned}
 \text{مجموعه مشتریان} & C = \{1, 2, \dots, |C|\}, (i, j \in C) \\
 \text{مجموعه وسایل نقلیه} & K = \{1, 2, \dots, |K|\}, (k \in K) \\
 \text{مجموعه انواع وسایل نقلیه} & H = \{1, 2, \dots, |H|\}, (m \in H)
 \end{aligned}$$

پارامترها:

$$\begin{aligned}
 c'_j & \text{ مسافت سفر از دپو تا مشتری } j \\
 c''_{ij} & \text{ مسافت سفر از مشتری } i \text{ تا مشتری } j \\
 c'''_j & \text{ مسافت سفر از مشتری } j \text{ تا دپو} \\
 q_k & \text{ ظرفیت وسیله نقلیه } k \\
 d_j & \text{ تقاضای مشتری } j \text{ برای دریافت محصول} \\
 p_j & \text{ میزان کالای بازگشتی از مشتری } j \\
 r' & \text{ طول دوره} \\
 a'_{km} & \text{ پارامتر باینری، اگر ماشین } k \text{ از نوع } m \text{ باشد مقدار } 1 \text{ و در غیر اینصورت } 0 \text{ می‌گیرد} \\
 M & \text{ یک عدد به اندازه کافی بزرگ}
 \end{aligned}$$

متغیرهای تصمیم:

$$\begin{aligned}
 x_{ijk} & \text{ متغیر باینری، اگر از مشتری } i \text{ به مشتری } j \text{ با ماشین } k \text{ سفر انجام شود مقدار } 1 \text{ و در غیر اینصورت } 0 \text{ می‌گیرد.} \\
 y_{jk} & \text{ متغیر باینری، اگر از دپو به مشتری } j \text{ با ماشین } k \text{ سفر انجام شود مقدار } 1 \text{ و در غیر اینصورت } 0 \text{ می‌گیرد.} \\
 z_{jk} & \text{ متغیر باینری، اگر از مشتری } j \text{ به دپو با ماشین } k \text{ سفر انجام شود مقدار } 1 \text{ و در غیر اینصورت } 0 \text{ می‌گیرد.} \\
 v'_{jk} & \text{ سرعت وسیله نقلیه } k \text{ در سفر از دپو به مشتری } j \\
 v''_{ijk} & \text{ سرعت وسیله نقلیه } k \text{ در سفر از مشتری } i \text{ به مشتری } j \\
 v'''_{jk} & \text{ سرعت وسیله نقلیه } k \text{ در سفر از مشتری } j \text{ به دپو}
 \end{aligned}$$

t_k	مدت زمان سفر ماشین k از لحظه خروج از دپو تا لحظه بازگشت
O_{ki}	مقدار بار ماشین k پس از ترک مشتری i
l'_{ki}	مقدار بار ماشین k پس از خروج از دپو به سمت مشتری i در ابتدای دوره
l''_{ki}	مقدار بار ماشین k پس از ترک مشتری i به سمت مشتری j
l'''_{ki}	مقدار بار ماشین k پس از ترک مشتری i به سمت دپو
u_{ik}	متغیر مربوط به حذف زیرتور
a_{ki}	مقدار بار تخلیه شده توسط ماشین k در مشتری i
b_{ki}	مقدار بار بارگیری شده توسط ماشین k از مشتری i

۳-۳-۱- مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیر خطی

تابع هدف میزان سوخت مصرفی:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\frac{x_{ijk} k_m N_m V_m c''_{ij}}{v'_{ijk}} + (x_{ijk} W_m + l'_{kij}) \gamma_m \alpha c''_{ij} + x_{ijk} \beta_m \gamma_m c''_{ij} (v'_{ijk})^2 \right] \\ + \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\frac{y_{jk} k_m N_m V_m c'_j}{v'_{jk}} + (y_{jk} W_m + l'_{kj}) \gamma_m \alpha c'_j + y_{jk} \beta_m \gamma_m c'_j (v'_{jk})^2 \right] \\ + \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\frac{z_{jk} k_m N_m V_m c'''_j}{v'''_{jk}} + (z_{jk} W_m + l'''_{kj}) \gamma_m \alpha c'''_j + z_{jk} \beta_m \gamma_m c'''_j (v'''_{jk})^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

تابع هدف بالانس بار کاری:

$$\text{Min Max}\{t_k\} \quad (3)$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{k \in K} y_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in C, i \neq j} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in C \quad (4)$$

$$\sum_{j \in C} y_{jk} = \sum_{i \in C} z_{ik} \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in C} y_{jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_{jk} + \sum_{i \in C, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{i \in C, i \neq j} x_{jik} + z_{jk} \quad \forall k \in K, j \in C \quad (7)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in C, i \neq j} x_{ijk} \leq \left(\sum_{j \in C} y_{jk} \right) \cdot M \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + (|C| + 1) \cdot x_{ijk} \leq |C| \quad \forall i, j \in C (i \neq j), k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i \in C} l'_{ki} = \sum_{j \in C} a_{kj} \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$l'_{ki} \leq q_k y_{ik} \quad \forall k \in K, i \in C \quad (11)$$

$$O_{kj} \geq \left(\sum_{i \in C} l'_{ki} - a_{kj} + b_{kj} - M(1 - y_{jk}) \right) \quad \forall k \in K, j \in C \quad (12)$$

$$O_{kj} \geq (O_{ki} - a_{kj} + b_{kj} - M(1 - x_{ijk})) \quad \forall i, j \in C (i \neq j), k \in K \quad (13)$$

$$l''_{kij} \geq O_{ki} - M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in C (i \neq j), k \in K \quad (14)$$

$$l'''_{kj} \geq O_{kj} - M(1 - z_{jk}) \quad \forall k \in K, j \in C \quad (15)$$

$$l''_{kij} \leq q_k(x_{ijk}) \quad \forall i, j \in C (i \neq j), k \in K \quad (16)$$

$$l'''_{kj} \leq q_k(z_{jk}) \quad \forall k \in K, j \in C \quad (17)$$

$$a_{kj} + b_{kj} \leq \left(y_{jk} + \sum_{i \in C, i \neq j} x_{ijk} \right) \cdot M \quad \forall k \in K, j \in C \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} a_{kj} = d_j \quad \forall j \in C \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} b_{kj} = p_j \quad \forall j \in C \quad (20)$$

$$t_k \leq r' \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$t_k = \sum_{j \in C} \frac{y_{jk} c'_j}{v'_{jk}} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C, i \neq j} \frac{x_{ijk} c''_{ij}}{v''_{ijk}} + \sum_{j \in C} \frac{z_{jk} c'''_j}{v'''_{jk}} \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$1 \leq u_{ik} \leq |C| + 1 \quad \forall k \in K, i \in C \quad (23)$$

$$x_{ijk}, y_{jk}, z_{jk} \in \{0, 1\} \quad (24)$$

$$O_{ki}, a_{ki}, b_{ki}, t_k, v'_{jk}, v''_{ijk}, v'''_{jk}, l'_{ki}, l''_{kij}, l'''_{ki} \geq 0 \quad (25)$$

۳-۲-۳ خطی سازی مدل ریاضی

همانطور که مشاهده میشود در مدل ارائه شده، تابع هدف اول و دوم همچنین محدودیت (۲۲) غیر خطی می باشند. جهت خطی سازی تابع هدف اول و محدودیت (۲۲) از تکنیک پیشنهادی بکتاش و لاپورته (Bektaş & Laporte, 2011) که مبتنی بر گسسته سازی متغیر سرعت می باشد استفاده می کنیم. در این روش برای سرعت وسیله نقلیه یک حد پایین (l) و یک حد بالا (u) تعریف می شود. سپس بازه l تا u به R قسمت تقسیم می شود که $R = \{1, 2, \dots, |R|\}$ مجموعه سطوح سرعت می باشد و سطح سرعت $r \in R$ دارای حد پایین و بالای $[l^r, u^r]$ می باشد و $l^1 = l$ و $u^{|R|} = u$. سپس برای هر سطح $r \in R$ یک متوسط سرعت به صورت $\bar{v}^r = (l^r + u^r) / 2$ تعیین می شود. در مدل خطی شده وسیله نقلیه در هر کمان می تواند تنها یکی از سطوح سرعت را انتخاب می کند و با متوسط سرعت آن سطح حرکت کند. به عنوان مثال در سفر از مشتری i به مشتری j متغیر v''_{ijk} سرعت وسیله k در طول کمان می باشد. متغیر باینری جدیدی به نام $w''_{ijk r}$ تعریف می شود که اگر وسیله k در سفر از مشتری i به مشتری j با متوسط سرعت سطح r حرکت کند مقدار ۱ میگیرد و در غیر این صورت مقدار ۰. در این صورت پارامتر \bar{v}^r در مدل جایگزین متغیر سرعت می شود و متغیر $w''_{ijk r}$ و متغیر x_{ijk} به صورت رابطه (۲۶) با یکدیگر مرتبط می شوند. همچنین در خصوص سفر از دپو به مشتریان و سفر از مشتریان به دپو روابط (۲۷) و (۲۸) را خواهیم داشت.

در مدل ریاضی ارائه شده، تابع هدف زیست محیطی برابر است با مجموع سوخت مصرفی هر ماشین در طول سفر از دپو به سمت مشتریان، سفر بین مشتریان و سفر از مشتریان به دپو که تابعی از مسافت طی شده، سرعت، بار وسیله حمل و نقل و مشخصه های فیزیکی آن می باشد (معادله (۱)). تابع هدف دوم از طریق حداقل کردن مدت زمان طولانی ترین تور، تلاش می کند تا حد امکان بین مدت زمان سفر ماشین های مختلف بالانس ایجاد نماید (معادله (۲)). محدودیت (۴) تا (۸) محدودیتهای ایجاد تورها بر طبق مفروضات مسئله می باشند به گونه ای که هر ماشین حداکثر در یک تور مورد استفاده قرار می گیرد و هر مشتری تنها توسط یک ماشین و در یک بار مراجعه سرویس دهی می شود. محدودیت (۹) محدودیت حذف زیرتور می باشد. محدودیتهای (۱۰) تا (۱۷) جهت محاسبه میزان بار وسیله نقلیه پس از خروج از دپو و در طول مسیر طراحی شده اند. از آنجا که برداشت محصولات بازگشتی نیز در این مسئله وجود دارد، بار وسیله نقلیه در طول مسیر نیز باید چک شود تا از ظرفیت وسیله نقلیه فراتر نرود. محدودیتهای (۱۱)، (۱۶) و (۱۷) محدودیتهای بررسی ظرفیت وسیله نقلیه می باشند. محدودیت (۱۹) و (۲۰) محدودیتهای ارضاء تقاضای مشتریان هستند همچنین محدودیت (۲۱) تضمین می کند هر ماشین پیش از پایان دوره به دپو بازگردد. محدودیت (۲۲) جهت محاسبه طول سفر هر یک از ماشینها می باشد و علامت متغیرهای تصمیم مسئله در محدودیتهای (۲۳) تا (۲۵) تعیین شده است.

دپو متوسط سرعت سطح r را انتخاب کند مقدار ۱ و غیر اینصورت مقدار صفر میگیرد. در نهایت تابع هدف زیست محیطی و محدودیت (۲۲) به صورت روابط (۲۹) و (۳۲) بازنویسی می شوند.

همچنین برای خطی سازی تابع هدف دوم، معادله این تابع به شکل معادله (۳۰) اصلاح می شود و محدودیت (۳۱) به مسئله اضافه خواهد شد. در نهایت مدل برنامه ریزی عددصحیح مختلط خطی به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{r \in R} w''_{ijk} = x_{ijk} \quad \forall i, j \in C (i \neq j), k \in K \quad (26)$$

$$\sum_{r \in R} w'_{ikr} = y_{ik} \quad \forall i \in C, k \in K \quad (27)$$

$$\sum_{r \in R} w'''_{ikr} = z_{ik} \quad \forall i \in C, k \in K \quad (28)$$

که در آن متغیر باینری w'_{ikr} در صورتی که ماشین k در سفر از دپو به مشتری i متوسط سرعت سطح r را انتخاب کند مقدار ۱ و غیر اینصورت مقدار صفر میگیرد. همچنین متغیر باینری w'''_{ikr} در صورتی که ماشین k در سفر از مشتری i به

تابع هدف میزان سوخت مصرف:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\sum_{r \in R} \frac{w''_{ijk} k_m N_m V_m C''_{ij}}{\bar{v}^r} + (x_{ijk} W_m + l''_{kij}) \gamma_m \alpha C''_{ij} + \sum_{r \in R} w''_{ijk} \beta_m \gamma_m C''_{ij} (\bar{v}^r)^2 \right] \\ + \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\sum_{r \in R} \frac{w'_{jkr} k_m N_m V_m C'_j}{\bar{v}^r} + (y_{jkr} W_m + l'_{kjr}) \gamma_m \alpha C'_j + \sum_{r \in R} w'_{jkr} \beta_m \gamma_m C'_j (\bar{v}^r)^2 \right] \\ + \sum_{j \in C} \sum_{m \in H} \sum_{k \in K} a'_{km} \lambda \left[\sum_{r \in R} \frac{w'''_{jkr} k_m N_m V_m C'''_j}{\bar{v}^r} + (z_{jkr} W_m + l'''_{kjr}) \gamma_m \alpha C'''_j + \sum_{r \in R} w'''_{jkr} \beta_m \gamma_m C'''_j (\bar{v}^r)^2 \right] \end{aligned} \quad (29)$$

تابع هدف بالانس بار کاری:

$$\text{Min } T \quad (30)$$

محدودیت‌ها:

$$T \geq t_k \quad \forall k \in K \quad (31)$$

$$t_k = \sum_{j \in C} \sum_{r \in R} \frac{w'_{jkr} C'_j}{\bar{v}^r} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C, i \neq j} \sum_{r \in R} \frac{w''_{ijk} C''_{ij}}{\bar{v}^r} + \sum_{j \in C} \sum_{r \in R} \frac{w'''_{jkr} C'''_j}{\bar{v}^r} \quad \forall k \in K \quad (32)$$

محدودیت‌های (۴) تا (۲۸) به جز محدودیت (۲۲).

۴- روش حل

داشته باشد. از این رو هدف هر سه الگوریتم مورد استفاده، دستیابی به مجموعه جواب‌های غیر مغلوب^{۱۱} (مرز پارتو^{۱۲}) برای مسئله دو هدفه مورد نظر می‌باشد. مفهوم غلبه^{۱۳} به عنوان مثال در یک مسئله دو هدفه به صورت زیر قابل بیان است. فرض کنید دو نقطه i و j دو نقطه مفروض در فضای حل مسئله هستند. اگر هر دو هدف به صورت مینیمم سازی باشند، نقطه i نقطه j را مغلوب می‌کند اگر به ازای هر هدف، مقدار تابع هدف در نقطه i کمتر مساوی مقدار تابع هدف در نقطه j باشد و به ازای حداقل یک هدف، مقدار تابع هدف در نقطه i کمتر از مقدار تابع هدف در نقطه j باشد. در مسائل چند هدفه،

در این بخش روش حدی تقویت شده به عنوان یک الگوریتم حل دقیق برای حل مدل ریاضی ارائه شده است. همچنین دو الگوریتم فراابتکاری چند هدفه مبتنی بر الگوریتمهای ژنتیک و آتش بازی جهت حل مسئله در ابعاد بزرگ به کارگرفته می شوند. همچنین جهت افزایش کارایی دو الگوریتم فراابتکاری در فرایند جستجوی فضای حل، از یک الگوریتم ابتکاری جستجوی محلی^{۱۴} در هر تکرار آنها استفاده شده است. از آنجا که اهداف مورد نظر این مقاله با یکدیگر در تناقض هستند. نمی‌توان نقطه ای را در فضای حل مسئله یافت که توأمآ هر دو هدف را بهینه کند و به تمامی نقاط دیگر ارجحیت

$$OF_2 + s_2 = \varepsilon_2$$

$$s_2 > 0$$

محدودیت‌های مدل خطی

در روابط فوق δ یک مقدار کوچک (معمولاً بین ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۰۰۱) می‌باشد. متد حدی تقویت شده تضمین می‌کند در صورت وجود جواب‌های بهینه چندگانه برای مسئله حدی تک هدفه، جوابی از میان آنها انتخاب شود که بهترین مقادیر سایر اهداف را نتیجه دهد.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب^{۲۰}

(NSGA-II)

الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری جمعیت محور میباشد که در واقع توسعه‌ای از الگوریتم ژنتیک کلاسیک جهت حل مسائل چندهدفه است و اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002) ارائه شد. به طور کلی الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه که عموماً به صورت تصادفی ایجاد می‌شود، فرایند جستجو را آغاز می‌کند. اصطلاحاً به هر یک از اعضا یک کروموزوم گفته می‌شود و هر کروموزوم معادل با یک نقطه از فضای حل می‌باشد. پس از آن و در هر تکرار با انتخاب برخی از اعضای جمعیت فعلی (والدین) و استفاده از اپراتورهای تقاطع و جهش و اعمال آنها بر روی والدین انتخابی، تعدادی کروموزوم دیگر در فضای حل ایجاد می‌شوند (فرزندان). پس از ارزیابی تمامی کروموزومها و بررسی مقادیر توابع هدف آنها مهمترین قدم انتخاب اعضای نسل بعدی می‌باشد. عمده ترین تفاوت الگوریتم NSGA-II با الگوریتم ژنتیک تک هدفه، در فرایند انتخاب می باشد که در الگوریتم NSGA-II با استفاده از دو مفهوم مرتب سازی نامغلوب و مرتب سازی بر اساس فاصله ازدحامی^{۲۱} انجام می‌شود که در ادامه به توضیح هر یک می‌پردازیم. در انتهای هر تکرار و پس از انتخاب اعضای نسل بعدی از یک الگوریتم جستجوی محلی جهت جستجوی دقیق‌تر فضای حل استفاده می‌شود و این فرایند تا رسیدن به شرایط توقف ادامه می یابد. رویه ۱ شبه کد الگوریتم NSGA-II پیشنهادی در این مقاله را نمایش می‌دهد.

مجموعه جواب‌های غیر مغلوب، مجموعه‌ای از نقاط هستند که هیچ نقطه دیگری در فضای حل توانایی غلبه بر آن را نداشته باشد. اصطلاحاً به این نقاط، مجموعه نقاط کارا^{۱۴} نیز گفته می‌شود.

۴-۱- روش حدی تقویت شده^{۱۵}

این روش توسعه ای از روش حدی^{۱۶} می‌باشد که در سال ۲۰۰۹ توسط ماورتس (Mavrotas, 2009) ارائه شده است. در هر دو این روش‌ها با نگهداشتن هدف مهمتر در تابع هدف و انتقال سایر توابع هدف به محدودیتها، مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه معادل تبدیل می‌شود. فرمولاسیون روش حدی معمولی در مسئله دوهدفه ما به صورت رابطه (۳۳) می‌باشد. که در آن OF_1 تابع هدف اول است (مقدار کل سوخت مصرفی) و OF_2 تابع هدف دوم می باشد (طولانی ترین تور).

$$\begin{aligned} & \text{Min } OF_1 \\ & \text{s.t.} \\ & OF_2 \leq \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (33)$$

محدودیت‌های مدل خطی

با تغییرات هدفمند مقادیر ε_2 و حل مدل تک هدفه، مجموعه نقاط پاراتو بدست می‌آیند. بازه تغییرات ε_2 با دو بار حل مسئله اصلی به صورت تک هدفه (با هر هدف به صورت جداگانه) و محاسبه بهترین^{۱۷} و بدترین^{۱۸} مقدار ممکن برای تابع هدف دوم (OF_2^{max}, OF_2^{min}) با استفاده از جدول موازنه^{۱۹} قابل تعیین می‌باشد. پس از آن مقادیر مختلف ε_2 با تقسیم بازه بدست آمده به q قسمت مساوی به صورت زیر مشخص می‌شوند.

$$\begin{aligned} r_2 &= OF_2^{max} - OF_2^{min} \\ \varepsilon_2^l &= OF_2^{max} - \frac{r_2}{q} \times l, l = 0, \dots, q \end{aligned} \quad (34)$$

علی رغم مزایای متعدد روش حدی معمولی، این روش با نقاط وضعی روبروست. به عنوان نمونه این روش تضمین کننده دستیابی به نقاط کارا نیست (دستیابی به نقاط کارای ضعیف را تضمین نمیکند). جهت پوشش این نقطه ضعف، ماورتس (Mavrotas, 2009) توسعه ای از این روش تحت عنوان روش حدی تقویت شده ارائه نمود. فرمولاسیون این روش برای مسئله دوهدفه ما به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} & \text{Min } OF_1 - \delta \times S_2 \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (35)$$

رویه ۱. شبه کد الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

شروع

تعیین پارامترهای الگوریتم: حداکثر تعداد تکرارها (I_{max})، اندازه جمعیت ($PopSize$)، احتمال تقاطع (P_c)، احتمال جهش (P_m)، نرخ جهش (R_m)، تعداد حل همسایگی (N_{ls}) جمعیت اولیه را به صورت تصادفی ایجاد کنید.

تا هنگامی که شرایط خاتمه محقق نشده است مراحل زیر را انجام دهید.

انتخاب P_C در صد از کروموزومها و ایجاد فرزندان با استفاده از عملگر تقاطع

انتخاب P_m در صد از کروموزومها و ایجاد فرزندان با استفاده از عملگر جهش

ارزیابی کل کروموزومها و استفاده از تابع جریمه برای کروموزومهای نشدنی

مرتب سازی نامغلوب و مرتب سازی بر اساس فاصله ازدحامی و انتخاب اعضای نسل بعد

استفاده از الگوریتم جستجوی محلی جهت بهبود کروموزومهای انتخابی

پایان (تا هنگامی که)

پایان

۴-۲-۱ نحوه نمایش جواب و ایجاد جمعیت اولیه

نحوه نمایش جواب یکی از مهمترین بخشهای یک الگوریتم فراابتکاری می باشد که تاثیر به سزایی بر کارایی الگوریتم دارد. از آنجا که این الگوریتم جمعیت محور می باشد، نحوه نمایش جواب باید به گونه ای باشد که علاوه بر سادگی، حجم زیادی از حافظه کامپیوتر در حین اجرای الگوریتم را اشغال ننماید. شکل ۲ نحوه نمایش یک جواب را نشان می دهد که از دو بخش تشکیل می شود. بخش اول سرعت هر وسیله نقلیه در طول سفر را نشان می دهد که تعداد ژنهای آن برابر با تعداد وسایل نقلیه (N_V) میباشد، هر ژن متناظر با یک ماشین است و اعداد درون هر ژن نشانگر سرعت ماشین در طول سفر میباشد. بخش دوم نشان دهنده نحوه تخصیص وسایل نقلیه به مشتریان و توالی سرویس دهی به آنها است. این بخش دارای $(N_C + N_V - I)$ ژن است که (N_C) نشان دهنده تعداد مشتریان میباشد و اعداد درون هر ژن نشان دهنده مشتریان هستند. همچنین عدد ۰ به معنی پایان سفر یک ماشین و شروع سفر ماشین بعدی میباشد. به عنوان مثال برای یک مسئله با ۳ وسیله نقلیه و ۱۰ مشتری، دو نقطه از فضای میتوانند به صورت کروموزومهای ارائه شده در شکل ۲ نمایش داده شوند. در کروموزوم ارائه شده در قسمت (a) شکل ۲، ماشین ۱ در ابتدای دوره تقاضای مشتریان ۱، ۵ و ۱۰ را بارگیری می نماید و به سمت مشتری ۱ حرکت می کند و پس از رسیدن به آن تقاضای آن را تحویل می دهد و همزمان محصولات بازگشتی

آن را بارگیری می نماید و به همین ترتیب به مشتریان ۵ و ۱۰ سرویس دهی می کند و در نهایت با محصولات بارگیری شده به دپو باز می گردد. همچنین سرعت این ماشین در کل سفر ۵۵ کیلومتر بر ساعت می باشد. ماشین ۲ به ترتیب به مشتریان ۲ و ۳ و ۴ سرویس دهی می کند و سرعت آن در طول سفر ۳۵ کیلومتر بر ساعت است و در آخر ماشین ۳ به ترتیب به مشتریان ۶ و ۹ و ۸ و ۷ سرویس دهی می کند و سرعت آن در کل سفر برابر با ۴۵ کیلومتر بر ساعت است. در کروموزومی دیگر در قسمت (b)، قرار گرفتن دو صفر کنار یکدیگر نشاندهنده بیکار بودن ماشین ۲ در این حل می باشد.

همانطور که مشخص است طبق این نوع طراحی برای کروموزوم، سرعت هر وسیله نقلیه از لحظه شروع تا لحظه اتمام سفر و در طی کمانهای مختلف ثابت میماند. حال آنکه طبق مدل ریاضی ارائه شده سرعت وسیله نقلیه از یک کمان به کمان دیگر میتواند تغییر کند. بررسی های انجام شده بر روی حل مسائل مختلف با استفاده از روش حدی تقویت شده نشان میدهد در جواب بهینه سرعت وسیله نقلیه معمولاً در طول کمانهای مختلف ثابت می ماند. نتایج پژوهش چنگ و همکاران (Cheng et al., 2017) نیز این ادعا را ثابت می کند. از این رو جهت سادگی، طراحی کروموزوم به نحوی انجام می شود که سرعت وسیله نقلیه از یک کمان به کمان های دیگر تغییر نکند و بنابراین هدف الگوریتم در بخش اول کروموزوم تعیین سرعت هر وسیله نقلیه در کل طول سفر می باشد.

می‌باشد، با این تفاوت که در قدم اول به جای یک زیر رشته، تعدادی ژن به تصادف انتخاب می‌شوند. همچنین در شکل ۳ مثالی از هر یک از این دو عملگر در مسئله ای با سه ماشین و ۱۰ مشتری ارائه شده است. در مثالهای ارائه شده، ژنهای قرمز رنگ فرزند از والد ۱ گرفته شده و ژنهای سبز رنگ از والد ۲ رویه ۲. قدمهای عملگر تقاطع ترتیبی

- قدم ۱. یک زیررشته به تصادف از بخش ۲ در کروموزوم والد ۱ انتخاب کنید
- قدم ۲. زیر رشته مورد نظر، صفرهای موجود در بخش ۲ والد همینطور بخش ۱ والد ۱ را در ژنهای متناظر در فرزند کپی کنید.
- قدم ۳. مشتریان باقی مانده را به ترتیب حضورشان در والد ۲ وارد فرزند کنید.

با تکرار همین قدمها یک فرزند دیگر نیز از این دووالد می‌توان ایجاد کرد با این تفاوت که جای والد ۱ و ۲ در قدمها عوض می‌شود.

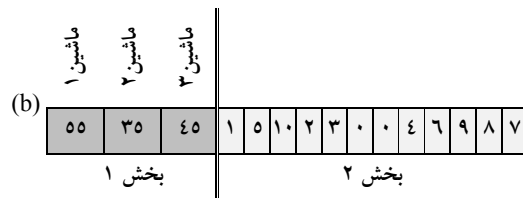
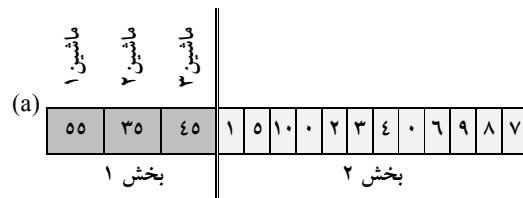


شکل ۳. عملگر تقاطع ترتیبی (a) و موقعیت محور (b)

• عملگر جهش

در الگوریتم ژنتیک از اپراتور جهش جهت ایجاد جوابهای جدید در راستای جستجوی دقیق‌تر فضای حل استفاده می‌شود. نکته مهم اینکه بر خلاف عملگر تقاطع که از دو والد دو فرزند ایجاد می‌شود، در عملگر جهش از یک والد یک فرزند ایجاد می‌شود. در هر تکرار و پس از انتخاب P_m درصد از کروموزومها برای اعمال عملگر جهش، در کروموزوم انتخابی،

جمعیت اولیه در این الگوریتم به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. در هر کروموزوم و در بخش ۱، جهت تعیین سرعت هر یک از ماشینها یکی از سطوح سرعت تعریف شده در بخش مدلسازی ریاضی به تصادف انتخاب می‌شود و سرعت وسیله نقلیه برابر با متوسط سرعت آن سطح تعیین می‌گردد. در بخش ۲ ابتدا از بین $(N_c + N_v - I)$ ژن موجود، $(N_v - I)$ عدد از آنها به تصادف انتخاب شده و مقدار صفر می‌گیرند. سپس سایر ژنهای خالی توسط جایگشتی تصادفی از مشتریان (از ۱ تا N_c) پر می‌شوند.



شکل ۲. نحوه طراحی کروموزوم

۴-۲-۲ عملگرهای تقاطع و جهش

همانطور که پیشتر گفته شد، در هر تکرار تعدادی از کروموزومها به تصادف انتخاب شده (والدین) و از دو عملگر تقاطع و جهش جهت ایجاد نقاط جدیدی در فضای حل (فرزندان) استفاده می‌شود. نکته مهم اینکه عملگرهای تقاطع صرفاً در بخش دوم کروموزومها اعمال می‌شوند.

• عملگر تقاطع

عملگرهای تقاطع مورد استفاده در این مقاله، با استفاده از دو والد انتخابی، دو فرزند جدید ایجاد مینمایند. در این تحقیق از دو عملگر تقاطع ترتیبی^{۲۲} و موقعیت محور^{۳۳} استفاده می‌شود. در هر تکرار و پس از انتخاب P_c درصد از کروموزومها، از ابتدا دوتا دوتا انتخاب می‌شوند و به احتمال برابر یکی از این دو اپراتور جهت ایجاد فرزندان مورد استفاده قرار می‌گیرد. قدمهای عملگر تقاطع ترتیبی در رویه ۲ تشریح شده است. قدمهای عملگر موقعیت محور کاملاً مشابه عملگر ترتیبی

میزان بار یک وسیله نقلیه در طول مسیر، از ظرفیت آن فراتر رود و حالت دوم زمانی که مدت زمان سفر یک ماشین از طول دوره بیشتر شود. یکی از رویکردهای رایج در مواجهه با جوابهای نشدنی، استفاده از یک تابع جریمه می باشد. در این حالت کروموزومهای نشدنی حذف میشوند بلکه با استفاده از یک تابع جریمه و بسته به میزان انحراف آنها از محدودیتها، مقدار تابع هدف آنها بدتر می شود و شانس حضور آنها در نسلهای بعدی کاهش میابد. علت حذف نشدن این کروموزومها به این دلیل است که یک کروموزوم نشدنی ممکن است با تغییری کوچک بر اثر عملگر جهش و یا تقاطع، به یک کروموزوم با تابع هدف بسیار عالی تبدیل شود. بر همین اساس در حالت اول اگر در یک کروموزوم محدودیت ظرفیت وسیله ای در طول مسیر نقض نشده باشد، مقدار تابع هدف اول آن برابر با OF_1 منظور می شود در غیر اینصورت مقدار این تابع هدف از رابطه (۳۶) محاسبه خواهد شد. که در آن P_1 ضریب پنالتی میباشد و K' مجموعه ماشینهایی میباشد که ظرفیت آنها نقض شده است، MP_k نیز بیشترین بار وسیله k نقلیه در طول سفر هست. همچنین در حالت دوم اگر در یک کروموزوم محدودیت حداکثر طول سفر نقض نشده باشد، مقدار تابع هدف دوم آن برابر با OF_2 منظور می شود در غیر اینصورت مقدار این تابع هدف از رابطه (۳۷) محاسبه خواهد شد. که در آن P_2 ضریب پنالتی می باشد و K'' مجموعه ماشینهایی میباشد که محدودیت حداکثر طول سفر را نقض کرده اند.

$$POF_1 = P_1 \times \left(\sum_{k \in K'} \frac{MP_k}{q_k} \right) \times OF_1 \quad (36)$$

$$POF_2 = P_2 \times \left(\sum_{k \in K''} \frac{t_k}{r'} \right) \times OF_2 \quad (37)$$

۴-۲-۴ انتخاب نسل بعد

در الگوریتم ژنتیک اندازه جمعیت در هر نسل ($PopSize$) ثابت می باشد، از این رو در هر تکرار و پس از ایجاد کروموزومهای جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش، به تعداد $PopSize$ از آنها برای حضور در نسل بعد انتخاب می شوند. اما همانطور که پیشتر گفته شد از آنجا که در مسائل چند هدفه اهداف با یکدیگر در تناقض می باشند، فرایند انتخاب با لحاظ کردن تمامی توابع هدف انجام می شود. رویه انتخاب در الگوریتم NSGA-II در شکل ۵ قابل مشاهده است. همانطور که می بینیم این فرایند شامل دو بخش اصلی است. اول مرتب سازی نامغلوب و دوم مرتب سازی بر اساس

بخش اول کروموزوم مورد عملگر جهش یکنواخت^{۲۴} قرار میگیرد و برای بخش دوم، به تصادف و با احتمال برابر یکی از عملگرهای اختلاط^{۲۵}، معکوس^{۲۶} و یا جانشین سازی^{۲۷} استفاده می شود. در عملگر جهش یکنواخت، در بخش اول کروموزوم والد که نشانگر سرعت وسایل نقلیه می باشد، R_m درصد از ژنها به تصادف انتخاب میشوند و هر یک از آنها مقداری تصادفی از مقادیر ممکن برای سرعت وسیله نقلیه می گیرد. در عملگر اختلاط در بخش دوم کروموزوم والد، R_m درصد از ژنها به تصادف انتخاب میشوند و مکان آنها با یکدیگر جابجا می شود. در عملگر معکوس، یک زیر رشته از بخش دوم کروموزوم والد انتخاب میشود و ژن های آن در جهت عکس مرتب می شوند. در عملگر جانشین سازی، یک زیر رشته از بخش دوم کروموزوم والد انتخاب می شود و به یک مکان تصادفی دیگر در طول کروموزوم منتقل می گردد. همانطور که در شکل ۴ زیر نیز مشاهده می شود هر یک از این اپراتورها توانایی ایجاد تغییرات متفاوتی در کروموزومهای والد دارند و قابلیت بالایی برای جستجوی فضای جواب در الگوریتم مورد نظر ایجاد می نمایند.

والد	۵۵	۳۵	۴۵	۱۵	۱۰	۰	۲	۳	۴	۰	۶	۹	۸	۷
فرزند ۱	۵۵	۳۵	۴۵	۱۵	۳	۰	۲	۴	۹	۰	۶	۱۰	۸	۷
فرزند ۲	۵۵	۳۵	۴۵	۱	۳	۲	۰	۱۰	۵	۴	۰	۶	۹	۸
فرزند ۳	۵۵	۳۵	۴۵	۱۵	۱۰	۰	۲	۶	۹	۸	۳	۴	۰	۷

شکل ۴. عملگر جهش اختلاط (۱)، معکوس (۲)، جانشین سازی (۳)

۴-۲-۳ ارزیابی کروموزومها و تابع جریمه

در هر کروموزوم، با توجه به مشتریان تخصیص داده شده به هر ماشین، مسافت طی شده توسط ماشین و همینطور بار وسیله نقلیه در طول سفر به سادگی قابل محاسبه می باشد. با توجه به این موارد و همچنین سرعت ماشین در طول سفر، میزان سوخت مصرفی (OF_1) همچنین طولانی ترین تور (OF_2) قابل محاسبه هستند. نکته مهم در این بخش، نحوه مواجه شدن با کروموزومهای نشدنی می باشد. یک کروموزوم در دو حالت ممکن است نشدنی باشد. حالت اول زمانی که

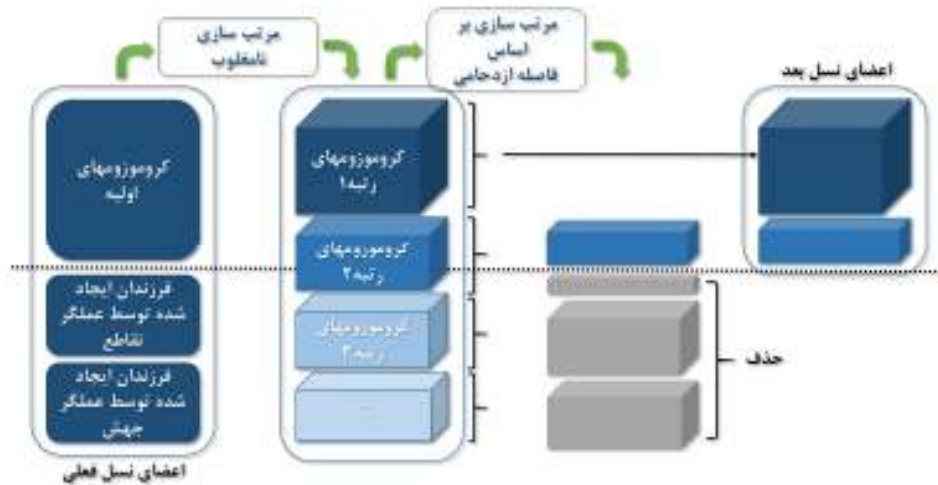
در نهایت در بین کروموزومهایی با رتبه یکسان، کروموزومی بهتر است که شاخص CD برای آن بیشتر باشد. این موضوع نشان می دهد ناحیه اطراف آن کروموزوم کم ازدحام تر است، در نتیجه در صورتی که بخواهیم از کروموزومهای موجود در یک مرز، تعدادی را انتخاب کنیم، آنهایی انتخاب می شوند که بیشترین فاصله را از یکدیگر داشته باشند و در نتیجه تنوع کروموزومهای انتخابی زیاد می شود. در نهایت و پس از مرتب سازی، به تعداد $PopSize$ از بهترین کروموزومها را برای حضور در نسل بعد انتخاب می کنیم.

۴-۲-۵ روش جستجوی محلی

همانطور که پیشتر گفتیم، در انتهای هر تکرار و پس از انتخاب اعضای نسل بعد، در جهت جستجوی دقیقتر فضای حل، از یک متد جستجوی محلی برای بهبود کروموزومهای دارای رتبه ۱ استفاده می شود. این متد با ایجاد تغییرات کوچک در هر کروموزوم، نقاط همسایگی آن کروموزوم را جهت یافتن نقطه ای بهتر بررسی می کند. در هر کروموزوم، R_m درصد از ماشین ها به تصادف انتخاب شده، سرعت این وسایل نقلیه با استفاده از عملگر جهش یکنواخت تغییر می کند. همچنین در بین مشتریان تخصیص داده شده به هر ماشین انتخابی، دو مشتری به تصادف انتخاب شده و با یکدیگر جابجا می شوند، اصطلاحاً به این نوع جهش، معاوضه^{۲۸} گفته می شود. این فرایند برای هر کروموزوم حداکثر N_{ls} دفعه تکرار می شود و در صورتی که در طول فرایند نقطه ای پیدا شود که بر کروموزوم اصلی غلبه نماید، فرایند متوقف شده و به سراغ کروموزوم بعدی می رویم.

فاصله ازدحامی. پس از ایجاد فرزندان و ارزیابی تمامی کروموزومها، در فرایند مرتب سازی نامغلوب، بر اساس مقدار تابع هدف هر کروموزوم و مفهوم غلبه، یک رتبه به هر کروموزوم تخصیص داده می شود. به این ترتیب که از میان تمامی کروموزومها، کروموزومهای نامغلوب انتخاب می شوند و رتبه ۱ به آنها تخصیص داده می شود. سپس با حذف کروموزومهای رتبه ۱، به کروموزومهای نامغلوب در جمعیت باقیمانده رتبه ۲ تخصیص داده می شود و این کار تا جایی ادامه می یابد که به تمام کروموزومها یک رتبه تخصیص داده شود. کروموزومها با رتبه یکسان تشکیل یک مرز پارتو می دهند و هر مرز پارتو، مرزها با رتبه های بدتر را مغلوب میکند. علاوه بر این، در بین کروموزومها با رتبه یکسان نوعی مرتب سازی دیگر نیز بر اساس فاصله کروموزوم با نزدیکترین کروموزوم (از نظر توابع هدف) انجام می شود. با معیاری تحت عنوان فاصله ازدحامی. بر این اساس در هر یک از مرزهای بدست آمده، بین کروموزومهایی با رتبه یکسان، شاخص CD_i برای کروموزوم i با استفاده از رابطه (۳۸) محاسبه می شود. که در آن x_{i-1} و x_i و x_{i+1} سه نقطه متوالی در مرز پارتو مورد نظر می باشند، $f_1(x_i)$ و $f_2(x_i)$ مقادیر تابع هدف اول و دوم متناظر با نقطه x_i می باشند. f_1^{max} و f_2^{max} بیشترین مقادیر موجود برای تابع هدف اول و دوم در مرز پارتوی مورد نظر هستند همچنین f_1^{min} و f_2^{min} کمترین مقادیر موجود برای تابع هدف اول و دوم در مرز پارتوی مورد نظر هستند.

$$CD_i = \frac{|f_1(x_{i+1}) - f_1(x_{i-1})|}{f_1^{max} - f_1^{min}} + \frac{|f_2(x_{i+1}) - f_2(x_{i-1})|}{f_2^{max} - f_2^{min}} \quad (38)$$



شکل ۵. فرایند انتخاب در الگوریتم NSGA-II

۳-۴ الگوریتم آتش بازی چندهدفه^{۲۹} (MOFA)

الگوریتم آتش بازی از جمله الگوریتم های هوش جمعی میباشد که برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ توسط تن و ژو (Tan & Zhu, 2010) ارائه شد و در سالهای اخیر کاربردهای موفقی در حل مسائل ترکیبی داشته است (Rezaei-Malek, Razmi, Tavakkoli-Moghaddam, & Taheri-Moghaddam, 2016). ایده اصلی این الگوریتم از فرایند انفجار در نورافشانیها الهام گرفته شده است. هر آتش^{۳۰} پس از انفجار در آسمان تعداد زیادی جرقه حول آن ایجاد می شود. در این الگوریتم فرایند جستجوی همسایگی حول یک نقطه، معادل با فرایند انفجار یک آتش در آسمان فرض شده است. همانطور که در دنیای واقعی نورفشانان موفق است که تعداد زیادی جرقه در شعاع کم حول یک نقطه مرکزی ایجاد شود، در این الگوریتم نیز در فرایند جستجوی همسایگی حول یک نقطه، هر چه آن نقطه از دیدگاه تابع هدف بهتر باشد، تعداد

نقاط بیشتر با فاصله ای کوتاه حول آن ایجاد می شود، و هرچه آن نقطه از نظر تابع هدف بدتر باشد، در فرایند جستجوی همسایگی، تعداد نقاط کمتر با فاصله ای زیاد حول آن نقطه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بنابراین مهمترین بخش این الگوریتم طراحی فرایند انفجار می باشد که در طی آن در ابتدا و با توجه به مقدار تابع هدف هر نقطه، شعاع انفجار (شعاع جستجوی همسایگی) و تعداد جرقه ها (تعداد حل های همسایگی) حول هر نقطه مشخص می شوند سپس با توجه به این دو، حل های همسایگی حول هر نقطه ایجاد می شود. الگوریتم اصلی آتش بازی برای حل مسائل تک هدفه طراحی شده است، در اینجا توسعه ای از این الگوریتم برای حل مسئله چند هدفه مورد نظر ما ارائه می شود. شبه کد الگوریتم آتش بازی چند هدفه در رویه ۳ ارائه شده است. جهت سادگی، در این الگوریتم نیز هر نقطه را یک کروموزوم می نامیم.

رویه ۳. شبه کد الگوریتم MOFA پیشنهادی

شروع

- تعیین پارامترهای الگوریتم: حداکثر تعداد تکرارها (I_{max})، اندازه جمعیت ($PopSize$)، پارامترهای کنترلی شعاع انفجار و تعداد جرقه ها $\{(a < b < I), (a_f, b_f)\}$ ، نرخ جهش (R_m)، تعداد حل همسایگی در الگوریتم جستجوی محلی (N_{ls})
- جمعیت اولیه را به صورت تصادفی ایجاد کنید

تا هنگامی که شرایط خاتمه محقق نشده است مراحل زیر را انجام دهید

- ارزیابی کل جمعیت و مرتب سازی نامغلوب آنها
- فرایند انفجار
- تعیین شعاع همسایگی برای هر عضو جمعیت
- تعیین تعداد حل همسایگی حول هر نقطه
- جستجوی همسایگی و تعیین نقاط همسایگی هر نقطه
- ارزیابی کل نقاط اولیه و نقاط جدید ایجاد شده و استفاده از تابع جریمه برای حل های نشدنی
- مرتب سازی نامغلوب و مرتب سازی بر اساس فاصله ازدحامی و انتخاب اعضای نسل بعد
- استفاده از الگوریتم جستجوی محلی جهت بهبود کروموزومهای انتخابی

پایان (تا هنگامی که)

پایان

بر اساس متد مرتب سازی نامغلوب رتبه بندی می شوند و در طی فرایند انفجار حلهای همسایگی حول هر نقطه ایجاد می شود. سپس با ارزیابی تمامی نقاط جدید بدست آمده و نقاط

همانطور که در شبه کد این الگوریتم مشاهده می شود، پس از ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی، جهت تعیین شعاع جستجو و تعداد حلهای همسایگی حول هر نقطه، تمامی نقاط

به این جهت مقدار می گیرد که برای نقاط با رتبه ۱ شعاع برابر با صفر نشده و از مقدار مشخص شده کمتر نباشد.

- تعیین تعداد حل های همسایگی حول هر نقطه: با توجه به رتبه نقطه i ، شعاع همسایگی آن (S_i) مطابق با رابطه (۴۰) محاسبه می شود. هرچه رتبه یک نقطه کمتر باشد (بهتر باشد)، این پارامتر مقدار بیشتری به خود می گیرد. همچنین پارامترهای کنترلی (a_f, b_f) به این دلیل طراحی شده اند که تعداد همسایگی های هر نقطه از یک حد کمتر و از یک حد بیشتر نشود (Rezaei-Malek et al., 2016).

- تعیین حل های همسایگی: پس از تعیین شعاع همسایگی و تعداد حلهای همسایگی برای هر نقطه، جهت تعیین یک نقطه همسایگی حول کروموزوم i ، قسمت اول کروموزوم با استفاده از عملگر جهش یکنواخت با پارامتر ($R_m = A_i$) تغییر می کند. در خصوص قسمت دوم کروموزوم i ، با توجه به رتبه این کروموزوم (r_i) یکی از سه عملگر رابطه (۴۱) جهت تغییر قسمت دوم و ایجاد یک حل همسایگی استفاده می شود. همانطور که مشاهده می شود، هر چه رتبه یک کروموزوم بهتر باشد، جهت ایجاد حلهای همسایگی از روشی استفاده می شود که تغییرات کمتری در ساختار آن به وجود آورد.

اولیه، از میان همگی به تعداد $PopSize$ نقطه برای حضور در نسل بعد انتخاب می شوند. فرایند ارزیابی و انتخاب مشابه الگوریتم NSGA-II می باشد. همچنین در انتهای هر تکرار همچون الگوریتم NSGA-II پیشنهادی، از الگوریتم جستجوی محلی ارائه شده در بخش قبل جهت بهبود نقاط با رتبه ۱ استفاده می شود.

۴-۳-۱ فرایند انفجار

همانطور که پیشتر گفتیم، مهمترین قسمت الگوریتم آتش یازی، فرایند انفجار می باشد که در طی آن و با توجه به رتبه هر یک از نقاط، شعاع جستجو و تعداد حلهای همسایگی حول هر نقطه مشخص می شوند و در نهایت حلهای همسایگی حول هر نقطه ایجاد می شوند.

- تعیین شعاع همسایگی: با توجه به رتبه نقطه i ، شعاع همسایگی آن (A_i) با استفاده از رابطه (۳۹) محاسبه میشود که در آن r_i رتبه نقطه i می باشد (Rezaei-Malek et al., 2016).

$$A_i = \max \left\{ \frac{r_i - \min(r_i)}{\max(r_i) - \min(r_i) + \text{eps}}, a_f \right\} \quad (39)$$

همانطور که مشخص است هرچه یک نقطه رتبه بهتری (کمتری) داشته باشد، شعاع جستجو حول آن نقطه نیز کوتاهتر خواهد بود. پارامتر a_f که پارامتر کنترلی این الگوریتم می باشد،

$$S_i = \text{round} \left(\frac{\max(r_i) - r_i}{\max(r_i) - \min(r_i) + \text{eps}} \times (b_f \cdot \text{PopSize} - a_f \cdot \text{PopSize}) + a_f \cdot \text{PopSize} \right) \quad (40)$$

$$\text{if} \begin{cases} r_i < \frac{\max(r_i)}{3} + 1 \rightarrow & \text{استفاده از عملگر جهش اختلاط با پارامتر } (R_m = A_i) \\ \frac{\max(r_i)}{3} + 1 \leq r_i < \frac{2 \cdot \max(r_i)}{3} + 1 \rightarrow & \text{استفاده از عملگر جهش معکوس} \\ \frac{2 \cdot \max(r_i)}{3} + 1 \leq r_i \rightarrow & \text{استفاده از عملگر جهش جانشین سازی} \end{cases} \quad (41)$$

شاخص متناسب با این نوع مسائل جهت تحلیل کارایی الگوریتمها معرفی می شود. علاوه بر این با انجام آنالیز حساسیت، رفتار مسئله تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار میگیرد تا از این طریق به راهکارهای مدیریتی در چنین سیستمهایی دست یابیم.

۵. نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت

در این بخش، با طراحی و حل مثالهایی با ابعاد مختلف، مدل ریاضی و الگوریتم های فراابتکاری پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار میگیرند. همچنین به علت دوهدفه بودن مسئله، چندین

۱-۵- تولید مثال عددی

جهت تولید مثالهای عددی برای ارزیابی الگوریتمهای ارائه شده، مختصات (x, y) مشتریان به صورت تصادفی از بازه $(20000, 0)$ انتخاب می شود و واحد آن بر حسب متر می باشد. همینطور مختصات دپو در تمامی مسائل $(10000, 10000)$ می باشد. فاصله بین دو نقطه با مختصات (x_i, y_i) و (x_j, y_j) با استفاده از رابطه

$$\left(\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + 0.5 \right) \quad (42)$$

محاسبه می شود. تقاضای مشتری i برای دریافت محصولات جدید (d_i) و همینطور مقدار کالای بازگشتی آن (p_i) به صورت تصادفی در بازه $(1000, 2000)$ بر حسب کیلوگرم ایجاد می شود. ماشین های در دسترس به صورت تصادفی از بین ماشین های سبک و متوسط به گونه ای انتخاب می شوند که مجموع ظرفیت آنها از مقدار $\sum_{i \in C} \max(d_i, p_i)$ بیشتر شود. دوره نیز ۸ ساعت در نظر گرفته می شود. در نهایت هر مسئله با یک برچسب نمایش داده می شود. به عنوان نمونه برچسب ۲-۳-۱۰ نشان دهنده مسئله ای با ۱۰ مشتری، ۳ ماشین نوع سبک و ۲ ماشین نوع متوسط می باشد.

همچنین داده های مورد استفاده در تابع مصرف سوخت بر اساس داده استفاده شده در مقاله چنگ و همکاران (Cheng et al., 2017) می باشد. همچنین مطابق با همین مقاله و در خصوص سرعت وسایل نقلیه، حد پایین و بالای ۲۰ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت برای سرعت وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است. با تقسیم این بازه به ۵ بازه برابر با هم، متغیر سرعت (\bar{v}^r) یکی از مقادیر (۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۵) را می تواند اختیار کند.

۲-۵- معرفی شاخص های کارایی

به طور کلی شاخصهای کارایی الگوریتمها در مسائل تک هدفه با مسائل چندهدفه متفاوت می باشد. از این رو در این قسمت پنج معیار کارایی مورد استفاده در این مقاله معرفی می شوند (Asefi, Jolai, (Rezaei-Malek et al., 2016), Rabiee, & Araghi, 2014). در محاسبه شاخص های زیر، n تعداد نقاط پارتو است، (f_1^{best}, f_2^{best}) مختصات نقطه ایده آل می باشد (بهترین مقادیر بدست آمد برای هر یک از توابع هدف در همه الگوریتمها) و $(f_{i,total}^{min}, f_{i,total}^{max})$ بیشترین و کمترین مقادیر بدست آمده برای تابع هدف i در

همه الگوریتمها می باشد. (f_1^i, f_2^i) نیز مقادیر تابع هدف متناظر با نقطه i هستند.

- متوسط فاصله از نقطه ایده آل $(MID)^{31}$

مقدار این شاخص برای هر الگوریتم برابر با متوسط فاصله نقاط پارتو آن الگوریتم با نقطه ایده آل می باشد و از طریق رابطه زیر محاسبه می شود. طبیعتاً هر چه این شاخص کمتر باشد بهتر است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_1^i - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}} \right)^2 + \left(\frac{f_2^i - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2}}{n} \quad (42)$$

- شاخص کیفیت $(QM)^{32}$

این شاخص مهمترین شاخص در مقایسه عملکرد الگوریتم ها می باشد. در یک مسئله تمامی نقاط غیر مغلوب بدست آمده از الگوریتمهای مختلف در یک آرشو قرار میگیرند، سپس دو به دو مقایسه شده و مجموعه جوابهای نامغلوب نهایی بدست می آید. سهم هر یک از الگوریتمها در مجموعه جواب نهایی برابر است با شاخص کیفیت متناظر با آن الگوریتم که طبیعتاً هر چه بیشتر باشد بهتر است.

- تعداد نقاط پارتو $(NPS)^{33}$

این شاخص برای هر الگوریتم برابر است با تعداد نقاط غیر مغلوب نهایی بدست آمده از الگوریتم، که هر چه بیشتر باشد نشانگر عملکرد بهتر الگوریتم است.

- شاخص فاصله $(SM)^{34}$

این شاخص برای هر الگوریتم، یکنواختی توزیع نقاط نامغلوب بدست آمده در مرز پارتو را نشان می دهد و هر چه مقدار آن کمتر باشد بهتر است. و از طریق رابطه (۴۳) محاسبه می شود.

$$SM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (43)$$

$$d_i = \min_{i \neq j} \left\{ \left| \frac{f_1^i - f_1^j}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}} \right| + \left| \frac{f_2^i - f_2^j}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right| \right\}$$

- شاخص پراکندگی $(DM)^{35}$

این شاخص وسعت جوابهای پارتو بدست آمده را نشان می دهد و مقادیر بزرگ آن نشان دهنده تنوع بیشتر جوابهای بدست آمده است و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$DM = \sqrt{\left(\frac{\max(f_1^i) - \min(f_1^i)}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}} \right)^2 + \left(\frac{\max(f_2^i) - \min(f_2^i)}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2} \quad (44)$$

۳-۵- تحلیل الگوریتم‌ها

به جای تعداد تکرار، زمان حل را معیار توقف لحاظ میکنیم و هر دو الگوریتم را در مدت زمان یکسان اجرا میکنیم. مسائل ۱ تا ۴ هر کدام ۲۰ مرتبه و مسائل ۵ و ۶ و ۷ هر یک ۱۰ مرتبه توسط الگوریتمهای فراابتکاری پیشنهادی حل شده اند و میانگین شاخص های بدست آمده در جداول ارائه شده است. همچنین به علت ماهیت NP-hard مسئله، تنها ۴ مثال توسط روش حل دقیق قابل حل می باشند. همانطور که مشاهده می شود با توجه به شاخصهای کارایی، الگوریتم MOFA به نسبت الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری در حل مسائل مختلف داشته است. با توجه به شاخص QM که مهمترین شاخص در ارزیابی کیفیت پاسخها می باشد و بررسی آن در ۴ مسئله اول که مرز پارتو دقیق آن نیز محاسبه شده است، بیش از ۸۰٪ پاسخ های ارائه شده توسط الگوریتم MOFA همواره در بهترین مرز پارتو بدست آمده حضور دارند. همچنین در شاخصهای دیگر الگوریتم MOFA نیز به طور متوسط عملکرد بهتری نسبت به NSGA-II دارد.

در این بخش ۷ مسئله در ابعاد متفاوت طرح شده و توسط سه الگوریتم پیشنهادی حل می شوند. الگوریتمهای فراابتکاری پیشنهادی با استفاده از نرم افزار Matlab-2014b کد نویسی شده اند و الگوریتم حدی تقویت شده پیشنهادی در نرم افزار GAMS 23-6-2 کد شده و با استفاده از حل کننده CPLEX حل شده است. هر دو این نرم افزارها تحت یک کامپیوتر با ۸ گیگابایت رم و CPU ۷ هسته ای ۱/۷۳ گیگاهرتز اجرا شده اند. جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری، با انجام یک سری آزمایشات مقدماتی و حل چندین مسئله مختلف، همچنین بررسی مقالات مشابه (Rezaei-Malek et al., 2016) مقادیر تجربی مناسبی برای پارامترها تعیین شده است که در جدول ۳ مشاهده می شود. همچنین مثالهای طراحی شده و نتایج حل به همراه شاخصهای کارایی در جدول ۴ و ۵ خلاصه شده است. از آنجا که الگوریتمهای فراابتکاری ارائه شده، ساختار متفاوتی دارند،

جدول ۳. تنظیم پارامتر الگوریتمهای فراابتکاری پیشنهادی

NSGA-II					MOFA				
PopSize	Pc	Pm	Rm	N _{is}	PopSize	a _f	b _f	R _m	N _{is}
۱۰۰	۰/۷	۰/۴	۰/۲	۲۰	۱۰۰	۰/۱	۰/۴	۰/۲	۲۰

جدول ۴. نتایج حل مسائل مختلف با الگوریتمهای فراابتکاری پیشنهادی

شماره	مثال	Time (sec)	NSGA-II					MOFA				
			MID	QM	NPS	SM	DM	MID	QM	NPS	SM	DM
۱	۶-۲-۱	۳۰۰	۰/۷۳	۱	۹	۰/۰۶۷	۱/۴۱	۰/۷۳	۱	۹	۰/۰۶۷	۱/۴۱
۲	۱۰-۲-۳	۵۰۰	۰/۶۴	۰/۷۳	۱۱	۰/۱	۱/۲۱	۰/۵۸	۰/۹۳	۱۶	۰/۰۹	۱/۴۱
۳	۱۵-۴-۳	۷۵۰	۰/۶۲	۰/۶۱	۱۲	۰/۰۲	۰/۶۴	۰/۵	۰/۸۳	۱۶	۰/۰۹	۱/۳۷
۴	۲۰-۵-۵	۱۰۰۰	۰/۵۹	۰/۷۶	۱۰	۰/۰۶	۰/۸	۰/۴	۰/۸۴	۹	۰/۱۳	۱/۳۱
۵	۲۵-۶-۶	۱۲۵۰	۰/۶۲	۰/۷۱	۱۵	۰/۰۵	۱/۲	۰/۵۷	۰/۷۶	۱۳	۰/۰۸	۱/۳۸
۶	۳۵-۱۰-۹	۱۷۵۰	۰/۶۷	۰/۵۱	۱۰	۰/۱۶	۱/۱	۱/۵۲	۱	۱۶	۰/۰۳	۱/۴۱
۷	۵۰-۱۰-۱۶	۲۵۰۰	۰/۸۳	۰/۶۶	۷	۰/۱	۰/۹۵	۱/۰۱	۱	۱۰	۰/۰۷	۱/۴۱

جدول ۵. نتایج حل مسائل مختلف با روش حدی تقویت شده

شماره	مثال	روش حدی تقویت شده					
		Time (sec)	MID	QM	NPS	SM	DM
۱	۶-۲-۱	۴۶۳	۰/۷۱	۰/۵۵	۵	۰/۲۶	۱/۴۱
۲	۱۰-۲-۳	۲۵۲۵	۰/۸	۰/۳۳	۵	۰/۱	۱/۴۱
۳	۱۵-۴-۳	۸۵۳۹	۰/۸۴	۰/۲۸	۵	۰/۱۷	۱/۴۱
۴	۲۰-۵-۵	۱۲۵۳۶	۰/۷۱	۰/۲۹	۵	۰/۰۵	۱/۴۱

۵-۴- تحلیل مرز پارتو

در این بخش جهت تحلیل نحوه تغییرات مرز پارتو، ۷ مسئله بررسی شده در بخش قبل، مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج این تحلیل در جداول ۷ تا ۹ ارائه شده است. در این جداول OF_1 و OF_2 به ترتیب نشان دهنده مقدار تابع هدف اول (مقدار سوخت مصرفی بر حسب لیتر) و تابع هدف دوم (زمان طولانی ترین تور بر حسب ثانیه) در نقطه مورد نظر هستند. همچنین AVR و STD نشانگر میانگین و انحراف معیار مدت زمان سفر ماشین های مختلف می باشند. در ستون TTD نیز مجموع مسافت طی شده توسط ماشینهای مختلف درج شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش ۱ درصدی مصرف سوخت می توان طولانی ترین تور را حتی تا بیش از ۲۰ درصد و پراکندگی بین مدت زمان کارکرد ماشین های مختلف را تا ۱۵ درصد کاهش داد. همچنین این پراکندگی با افزایش ۳ درصدی در مصرف سوخت می تواند تا ۲۵ درصد کاهش یابد. همچنین در صورتی که مسئله به صورت تک هدفه و با هدف بالانس بار کاری ماشینهای مختلف انجام شود، در مقایسه با زمانی که مسئله با هدف حداقل سوخت مصرفی

حل شود، کاهش حدودا پنجاه درصدی در مدت زمان طولانی ترین مسیر و کاهش هشتاد درصدی در پراکندگی زمان تورهای مختلف، افزایشی حدودا ۲۵ درصدی را در مصرف سوخت به دنبال دارد. این تحلیل نشان می دهد دستیابی به هدف بالانس بار کاری در قالب مسائل تک هدفه نمیتواند از نظر اقتصادی و زیست محیطی نتایج قابل قبولی برای سیستم بدنبال داشته باشد و موجب افزایش چشمگیری در مصرف سوخت می شود. اما با لحاظ نمودن این مسئله در قالب یک مسئله چندهدفه، با افزایش مقدار کمی مصرف سوخت، امکان دستیابی به هدف تعادل بار کاری تا حد زیادی فراهم می شود. همچنین با مقایسه ستون TTD و OF_1 متوجه می شویم در هر مسئله و با بهبود تابع هدف دوم، میزان افزایش سوخت مصرفی متناسب با میزان افزایش مسافت طی شده نمی باشد و این بدان معناست که مدل ابتدا تا حد امکان با بهینه سازی سرعت (و بدون تغییر مسیرها) به دنبال ایجاد بالانس کاری بین ماشینهای مختلف می باشد و تغییر توالی سرویس دهی و تغییر مشتریان تخصیص یافته به هر ماشین در اولویت دوم قرار دارند.

جدول ۶. تحلیل مرز پارتو (مشخصات نقطه با بهترین مقدار برای تابع هدف اول)

شماره	OF_1	$OF_2(sec)$	AVR	STD	TTD
۱	۱۹/۳۵	۲۶۸۵	۲۴۳۲	۳۴۷	۷۰۹۳۳
۲	۲۵/۹۷	۳۰۲۱	۱۸۵۲	۱۱۲۸	۹۰۰۴۴
۳	۳۵/۶	۳۲۵۸	۱۸۲۴	۹۶۵	۱۲۴۱۶۲
۴	۴۴/۲۵	۲۸۵۲	۱۵۶۸	۹۵۷	۱۵۱۲۷۷
۵	۵۳/۱	۲۵۵۰	۱۵۵۵	۸۲۹	۱۸۱۵۲۱
۶	۷۳/۴	۲۷۴۷	۱۳۷۳	۹۲۴	۲۵۳۶۶۱
۷	۱۱۸/۲	۲۶۸۷	۱۵۸۲	۸۰۷	۴۰۵۷۵۰

جدول ۷. تحلیل مرز پارتو (مشخصات نقطه با حدود ۱٪ افزایش مصرف سوخت نسبت به حالت بهینه)

شماره	OF_1		$OF_2(sec)$		AVR		STD		TTD	
	مقدار	$GAP (%)$	مقدار	$GAP (%)$	مقدار	$GAP (%)$	مقدار	$GAP (%)$	مقدار	$GAP (%)$
۱	۱۹/۵۴	۱	۲۵۷۴	-۴/۱	۲۲۳۳	-۸/۲	۲۹۷	-۱۴/۴	۷۰۹۳۳	۰
۲	۲۶/۴۲	۱/۷۳	۲۳۵۰	-۲۲/۲	۱۷۱۸	-۷/۲	۹۸۵	-۱۲/۷	۹۰۰۴۴	۰
۳	۳۶/۱۲	۱/۴۶	۲۵۳۴	-۲۲/۲	۱۸۲۰	-۰/۲	۸۴۷	-۱۲/۲	۱۲۴۴۵۴	۰/۲
۴	۴۴/۷۳	۱/۰۸	۲۰۷۷	-۲۷/۱	۱۴۳۱	-۸/۷	۶۳۶	-۳۳/۵	۱۵۱۵۷۹	۰/۲
۵	۵۳/۷۹	۱/۳	۲۰۴۷	-۱۹/۷	۱۳۷۹	-۱۱/۳	۶۶۰	-۲۰/۴	۱۸۱۵۲۱	۰
۶	۷۴/۶۷	۱/۷۳	۲۱۳۷	-۲۲/۲	۱۲۹۹	-۵/۴	۷۶۶	-۱۷/۱	۲۵۳۶۶۱	۰
۷	۱۱۹/۳	۰/۹۳	۲۲۴۳	-۱۶/۵	۱۵۱۷	-۴/۱	۷۳۸	-۸/۵	۴۰۶۷۵۷	۰/۲

جدول ۸. تحلیل مرز پارتو (مشخصات نقطه با حدود ۳٪ افزایش مصرف سوخت نسبت به حالت بهینه)

شماره	OF_1		$OF_2(sec)$		AVR		STD		TTD	
	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)
۱	۱۹/۹۲	-۲/۹۵	۲۰۸۸	-۲۲/۲	۲۰۴۲	-۱۶/۴	۲۱۰	-۳۹/۵	۷۰۹۳۳	۰
۲	۲۷/۱	۴/۳	۲۲۹۶	-۲۴	۱۶۳۲	-۱۱/۸	۹۳۴	-۱۷/۲	۹۰۰۴۴	۰
۳	۳۶/۵۷	۲/۷۹	۲۵۱۱	-۲۲/۹	۱۶۵۵	-۹/۳	۷۵۲	-۲۲/۰۷	۱۲۴۴۵۴	۰/۲
۴	۴۵/۶۲	۳/۱	۱۸۴۶	-۳۵/۲	۱۳۵۲	-۱۳/۹	۵۸۰	-۳۹/۴	۱۵۴۶۶۲	۲/۲
۵	۵۴/۶۵	۲/۹۲	۱۸۵۱	-۲۷/۴	۱۲۷۴	-۱۸/۱	۵۷۲	-۳۱	۱۸۱۵۲۱	۰
۶	۷۵/۶۹	۳/۱۲	۱۹۱۵	-۳۰/۲	۱۱۸۹	-۱۳/۴	۷۲۲	-۲۱/۹	۲۵۷۲۵۷	۱/۴
۷	۱۲۱/۵	۲/۷۷	۲۱۶۲	-۱۹/۵	۱۴۴۱	-۸/۹	۶۵۳	-۱۹	۴۱۲۰۵۴	۱/۷

جدول ۹. تحلیل مرز پارتو (مشخصات نقطه با بهترین مقدار تابع هدف دوم)

شماره	OF_1		$OF_2(sec)$		AVR		STD		TTD	
	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)	مقدار	GAP (%)
۱	۲۴/۲۳	۲۵	۱۴۴۶	-۴۶	۱۳۷۶	-۴۳/۴	۷۶	-۷۸/۱	۷۵۸۹۸	۶/۹
۲	۳۵/۲۱	۳۵	۱۳۲۱	-۵۶	۱۲۲۹	-۳۳/۶	۸۰	-۹۲/۹	۱۰۴۲۷۵	۱۵/۸
۳	۴۴/۵۸	۲۵	۱۳۵۲	-۵۸	۱۲۳۵	-۳۲/۳	۹۲	-۹۰	۱۳۳۳۰۳	۷/۳
۴	۵۶/۷۳	۲۸	۱۴۳۸	-۵۰	۱۲۹۹	-۱۷/۱	۱۷۳	-۸۱	۱۸۰۳۸۶	۱۹/۲
۵	۶۳/۸۸	۲۰	۱۴۰۷	-۴۵	۱۱۳۳	-۲۷/۱	۴۰۸	-۵۰/۱	۱۹۳۵۹۶	۶/۶
۶	۸۱/۴۳	۱۰	۱۴۸۰	-۴۶	۹۸۵	-۲۸/۲	۵۶۲	-۳۹/۱	۲۶۵۵۷۹	۴/۶
۷	۱۳۱/۲	۱۱	۱۷۷۳	-۳۴	۱۳۰۶	-۱۷/۴	۵۲۹	-۳۴/۶	۴۲۷۱۳۴	۵/۳

۶- نتیجه گیری

تقویت شده استفاده شده همچنین برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOFA پیشنهاد شده اند. نتایج حل عددی مسائل مختلف نشان دهنده برتری الگوریتم MOFA می باشد.

همچنین تحلیل مرز پارتو در مسائل مختلف نشان می دهد با افزایش مقادیر بسیار کمی در هزینه سوخت، تا حد زیادی می توان به هدف بالانس بار کاری بین ماشین های مختلف دست یافت. همچنین نتایج نشان می دهد حل این نوع مسائل تنها با هدف بالانس بار کاری، نتایج قابل قبولی از نظر میزان سوخت مصرفی ندارد.

مطالعات آتی بر مبنای این مقاله در سه حوزه قابل انجام هستند: (۱) بررسی های انجام شده در این مقاله نشان می دهد در حل بهینه، سرعت وسیله نقلیه در طول تور در کمانهای مختلف تغییر نمی کند. بررسی های آتی می تواند بر این موضوع متمرکز شود که آیا در صورت وجود پنجره زمانی سرویس دهی به مشتریان باز هم چنین اتفاقی رخ خواهد داد یا نه. (۲) بررسی تاثیر ترافیک بر سرعت وسایل نقلیه و توابع هدف مطرح شده. (۳) بررسی امکان چند بار بازگشت وسایل نقلیه

در این مقاله مسئله مسیریابی پایدار مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله ای که هدف اصلی آن مسیریابی وسایل نقلیه با نگاه ویژه به آلودگی های زیست محیطی و رضایتمندی رانندگان می باشد. نکته مهم در این مقاله تعیین سرعت بهینه وسایل نقلیه می باشد که از یک سو بر زمان سفر هر یک از ماشینها اثر گذار است و از سوی دیگر بر میزان مصرف سوخت آنها. علاوه بر سرعت، عوامل دیگر همچون مسافت طی شده، بار وسیله نقلیه و مشخصه های فنی وسایل نقلیه نیز بر روی میزان مصرف سوخت اثرگذار هستند. از این رو در مدل ارائه شده از یک تابع جامع جهت تخمین میزان سوخت مصرفی استفاده شده است. از سوی دیگر مسیریابی با هدف حداقل شدن مصرف سوخت، تضمینی برای ایجاد بالانس بار کاری بین ماشینهای مختلف ندارد. از این جهت مسئله در قالب یک مسئله دو هدفه مورد بررسی قرار گرفته است که یک هدف آن حداقل کردن سوخت مصرفی و هدف دیگر آن ایجاد بالانس بین بار کاری ماشین های مختلف می باشد. برای مسئله مورد نظر یک مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی ارائه شد و برای حل آن به صورت دقیق از روش حدی

- Barth, M., & Boriboonsomsin, K., (2009), "Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), pp.400–410.

به دیو در طول روز جهت بارگیری مجدد و تاثیر آن در بالانس بار کاری در قالب یک مسئله مسیر یابی چند سفره باشد.

۷- پی نوشت ها

- Barth, M., Younglove, T., & Scora, G. (2005). Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model. Development of A Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model.

1. Sustainable development
2. Triple-Bottom-Line (TBL) Dimensions of Organizational Sustainability
3. Sustainable Supply Chain Management
4. Vehicle Routing Problem
5. VRP with Simultaneous Pickup and Delivery
6. Equity
7. Green VRP
8. Pollution-Routing Problem
9. Fireworks Algorithm
10. Local search
11. Non-dominated solutions
12. Pareto frontier
13. Dominance
14. Efficient solutions
15. The augmented epsilon constraint method
16. The epsilon constraint method
17. Ideal point
18. Nadir
19. Payoff table
20. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
21. Crowding distance
22. Order crossover
23. Position-based crossover
24. Uniform mutation
25. Scramble mutation
26. Inverse mutation
27. Displacement mutation
28. Swap
29. Multi-objective Fireworks algorithm
30. Firework
31. Mean Ideal Distance
32. Quality Metric
33. Number of Pareto Solutions
34. Spacing Metric
35. Diversification Metric

- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250.

- Benjaafar, S., Li, Y., & Daskin, M. (2013). Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights From Simple Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), 99–116.

- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2015). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*.

- Browne, M., Allen, J., & Leonardi, J. (2011). Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. *IATSS Research*, 35(1), 1–6.

- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 38(5), 360–387.

- Cheng, C., Yang, P., Qi, M., & Rousseau, L. M. (2017). Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 97–112.

- Dabia, S., Demir, E., & Woensel, T. Van. (2016). An Exact Approach for a Variant of the Pollution-Routing Problem. *Transportation Science*, trsc.2015.0651.

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp.182–197.

۸- مراجع
- Asefi, H., Jolai, F., Rabiee, M., & Araghi, M. E. T., (2014), "A hybrid NSGA-II and VNS for solving a bi-objective no-wait flexible flowshop scheduling problem", *Int J Adv Manuf Technol*, 89, pp.139–144.

- Operational Research, 243(2), pp.523–539.
- Majidi, S., Hosseini-motlagh, S., & Ignatius, J., (2018), "Adaptive large neighborhood search heuristic for pollution-routing problem with simultaneous pickup and delivery", *Soft Computing*, 22(9), pp.2851–2865.
 - Matl, P., Hartl, R. F., & Vidal, T., (2016), "Equity Objectives in Vehicle Routing: A Survey and Analysis. arXiv Preprint arXiv:1605.08565".
 - Mavrotas, G., (2009), "Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*", 213(2), pp.455–465.
 - Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2014), "An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 67, pp.14–38.
 - Rabbani, M., Navazi, F., Farrokhi-asl, H., & Balali, M. H. (2018). A sustainable transportation-location-routing problem with soft time windows for distribution systems. *Uncertain Supply Chain Management*, 6, pp.229–254.
 - Rezaei-Malek, M., Razmi, J., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Taheri-Moghaddam, A. (2016), "Towards a psychologically consistent cellular manufacturing system", *International Journal of Production Research*, 55(3), pp.492–518.
 - Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J., (2015), "Modeling an Inventory Routing Problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty", *International Journal of Production Economics*, 164, pp.118–133.
 - Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J., (2016), "Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*", 89, pp.168–182.
 - Tan, Y., & Zhu, Y., (2010), "Fireworks Algorithm for Optimization", pp. 355–364. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13495-1_44.
 - Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), pp.671–679.
 - Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), pp.346–359.
 - Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014a). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), pp.775–793.
 - Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014b). The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3), pp.464–478.
 - Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015), "Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review, *Omega*, 45(8), pp.1232–1250.
 - Franceschetti, A., Demir, E., Honhon, D., Van Woensel, T., Laporte, G., & Stobbe, M. (2016). A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*. 46(3), 360–387.
 - Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T., & Laporte, G. (2013). The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, 265–293.
 - Jaehn, F. (2016). Sustainable Operations. *European Journal of Operational Research*. 36(2), 182–197.
 - Kara, İ., Kara, B. Y., & Yetis, M. K., (2007), "Energy minimizing vehicle routing problem", *Combinatorial Optimization and Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 46(1), pp.62–71.
 - Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014), "The fleet size and mix pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, pp.239–254.
 - Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G., (2016). The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 84, pp.81–102.
 - Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T., & Cabral, L. dos A. F. L. D. A. F., (2015), "A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem", *European Journal of*

Sustainable Routing of Heterogeneous Vehicles with Simultaneous Pickup and Delivery Considering Economic, Environmental and Social Factors

Mehrdad Mirzabaghi, Ph.D. Student, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Fariborz Jolai, Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Jafar Razmi, Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Reza Tavakkoli-Moghaddam, Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: fjolai@ut.ac.ir

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

In this paper, we introduce the sustainable routing problem in a network with forward and reverse flows, in which different economic, environmental and social factors are considered in a bi-objective mixed integer linear programming mathematical model. The purpose of the problem is to design the service routes and determine the optimal speed of vehicles in such a way that, on the one hand, the amount of fuel consumed and, consequently, pollution caused by the transportation process are minimized, and on the other hand, in order to create satisfaction among drivers, the workload of different vehicles in terms of the duration of tour is balanced. A comprehensive function is used to estimate the amount of fuel consumed, in which the amount of fuel consumed is a function of the distance traveled as well as the speed, load, and technical characteristics of the vehicle. In order to solve the problem optimally, the augmented epsilon constraint method is used. Also, for solving large-scale instances, two multi-objective meta-heuristic algorithms based on genetic algorithm and fireworks algorithm have been developed. In order to increase the efficiency of these algorithms, a local search method is also used in their structure. The results of solving various examples represent a better performance of the fireworks algorithm. Also analysis of the pareto-front shows that with a one percent increase in fuel cost, the longest tour can be reduced by more than 20% and the difference between the running times of different machines is reduced by 15%. This difference can also be reduced by up to 25% by increasing fuel consumption by 3%.

Keywords: Sustainability, Green VRP, Speed Optimization, Multi-Objective Optimization, Metaheuristics