

## مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار دو سطحی چند هدفه پایدار با تحویل و برداشت همزمان برای محصولات فسادپذیر

مقاله علمی - پژوهشی

رضا شکری بوسجین، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

حمید رضا کیا\*، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hr\_kia@azad.ac.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۲۸۹-۲۷۱

### چکیده

امروزه فشارهای اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی برای محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه در بخش حمل و نقل وجود دارد. این مقاله مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار دو سطحی با در نظر گرفتن تحویل و برداشت همزمان را بررسی می‌نماید. یک مدل چند هدفه به منظور حداقل سازی هزینه‌ها، عوامل مخرب زیست محیطی و نیز تعادل زمان سفر ناوگان حمل و نقل جهت دستیابی به پایداری، توسعه یافته است. برای حل این مسئله، دو الگوریتم فرا ابتکاری شامل *NSGA II* و *MOPSO* پیشنهاد گردید. برای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی، ۱۵ نمونه مسئله بطور تصادفی تولید گردید. نتایج حاصل از نمونه مسائل در ۸ شاخص شامل میانگین توابع هدف اول تا سوم، تعداد جواب کارا، بیشترین گسترش، فاصله از نقطه ایده‌آل و زمان محاسباتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم *NSGA II* در شاخص‌های تعداد جواب کارا، بیشترین گسترش، فاصله متریک به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم *MOPSO* رسیده است. در حالی که الگوریتم *MOPSO* در دستیابی به میانگین‌های توابع هدف اول تا سوم، فاصله از نقطه ایده‌آل و زمان محاسباتی از الگوریتم *NSGA II* کاراتر بوده است. در نهایت، الگوریتم *MOPSO* با استفاده از روش تاپسیس و با کسب وزن مطلوبیت ۰٫۷۰۶۱، به عنوان بهترین روش حل برگزیده شد. این مقاله می‌تواند به مدیران کمک کند تا با کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش اثرات مخرب زیست محیطی و لزوم توجه به معیارهای اجتماعی به منظور کسب امتیاز رقابتی در سراسر شبکه لجستیکی بهره‌مند گردند.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی، تحویل و برداشت همزمان، پایداری، الگوریتم‌های فرا ابتکاری

### ۱- مقدمه

سرویس دهی به مشتریان مورد توجه محققان و پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. (Gayialis, Konstantakopoulos and Tatsiopoulou, 2019) موضوع دیگری که در زمینه مسئله مسیریابی مورد توجه قرار گرفته است، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی می‌باشد. در مسائل مربوط به مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی، دریافت محصول از مرکز توزیع و ذخیره آن در انبارهای میانی در سطح اول صورت گرفته و در سطح دوم، تحویل آن به مشتریان توسط مسیریابی انجام می‌گیرد. این مسئله

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌ها و رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره برای مدل‌کردن مسائل بهینه‌سازی مورد توجه محققان قرار گرفته است. دلیل این امر شاید به این موضوع برگردد که اهمیت یک مسئله به میزان کاربرد و قابلیت آن در مدل کردن شرایط دنیای واقعی وابسته است. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه یکی از مسائل مهم و شناخته شده بهینه‌سازی ترکیبی در لجستیک و سیستم‌های توزیع کالا است که به دلیل اهمیت و کاربرد زیاد آن در زمینه بهینه‌سازی مسیریابی ناوگان حمل و نقل جهت

برخوردار است. زیرا نه تنها موجب عدالت اجتماعی بین رانندگان مختلف که بایستی روزهای کاری مشابه‌ای داشته باشند را نمایان می‌کند بلکه راه حل‌های مطلوب‌تری را نیز به‌همراه خواهد داشت.

## ۲- پیشینه تحقیق

برای انجام این پژوهش ادبیات مرتبط از سه منظر (۱) مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی (۲) تحویل و برداشت همزمان (۳) محصولات فسادپذیر مورد بررسی قرار گرفته است.

قطره سامانی و همکاران (Ghatreh Samani, et al., 2016) یک مدل احتمالی چند هدفه برای مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی با تحویل و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی ارائه دادند. آنها تقاضای مشتریان را در حالت غیر قطعی و در قالب سناریوهای مختلف با مقادیر گسسته در نظر گرفتند. فتحی و دهقانیان (Fathi and Dehghanian, 2019) یک مدل یکپارچه و روش حل برای زمانبندی تولید و مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی با هدف کاهش مصرف سوخت ارائه کردند. آنها با توجه به نمونه مسائل طراحی شده، با مقایسه نتایج حاصل از حل دقیق و ابتکاری مدل، به ارزیابی کارایی الگوریتم ابتکاری پرداختند. کرانیک و همکاران (Crainic, et al., 2013) یک روش جستجوی انطباقی تصادفی حریمانه واکنشی با مسیر مجدد را برای مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی طراحی کردند. آنها در این رویکرد کاهش هزینه‌های سیستم در راستای تامین تقاضای مشتریان و همچنین شبکه حمل و نقل و هزینه‌های مرتبط با ترافیک را به‌منظور کاهش آلودگی‌ها و عوامل مخرب بر محیط زیست مورد بررسی قرار دادند. کیتجاچارونچای و همکاران (Kitjacharoenchai, et al., 2020) یک مدل مسیریابی دو سطحی جدید برای سرویس‌دهی به چندین مشتری به وسیله هواپیمای بدون سرنشین را طراحی کردند. این مدل با هدف یافتن مسیرهای بهینه برای کامیون‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین به دنبال حداقل‌سازی زمان ورود هر دو آنها نیز می‌باشد. همچنین آنها برای حل مسئله در اندازه کوچک از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و در اندازه بزرگ از دو الگوریتم ابتکاری کارآمد استفاده کردند. لیو و همکاران (Liu, et al., 2020) بهینه‌سازی یک شبکه توزیع دو سطحی را برای تحویل کارآمد مواد غذایی بصورت الکترونیکی از طریق وسایل نقلیه مختلط با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و زیست محیطی انجام دادند. آنها برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر خوشه‌بندی دو مرحله‌ای و همچنین بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند.

مشکل از سیستم‌های توزیع چند سطحی است که بر اساس استفاده از امکانات و تسهیلات جریان بین سطوح تمرکز دارد و به منظور دور نگهداشتن وسایل نقلیه بزرگ از مرکز شهر و استفاده از وسایل نقلیه کوچک سازگار با محیط زیست مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع یکی از اهداف مطرح شدن مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی، کاهش اثرات زیست‌محیطی در طول مسیر انتقال محصول از توزیع کننده به مشتری است. (Wang, Shao and Zhou, 2017) مسئله تحویل و برداشت یکی از انواع مسائل مسیریابی وسیله نقلیه است. علاوه بر محدودیت‌های کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه، این مسئله بر یک مجموعه‌ای از مکان‌های تحویل و یک مجموعه‌ای از مکان‌های برداشت اشاره دارد. بنابراین در یک مسیر، وسیله نقلیه می‌تواند تحویل و برداشت محصولات را بطور همزمان انجام دهد. در میان تمام این انواع، تمرکز اکثر محققان بر مسئله تحویل و برداشت با در نظر گرفتن پنجره زمانی بوده است که دارای کاربرد قابل توجهی در زندگی واقعی دارد. از جمله کاربردهای این رویکردها را می‌توان در لجستیک، پشتیبانی نگهداری، زمانبندی خطوط هوایی، مسیریابی اتوبوس و مسائل ریلی و غیره یافت. (Al Chami, Manier and Manier, 2019)

در این پژوهش، به بررسی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پایدار با تحویل و برداشت همزمان و در نظر گرفتن فسادپذیری محصولات همراه با پنجره زمانی در یک زنجیره تامین چند دوره‌ای پرداخته می‌شود. هدف از بررسی پایداری در این تحقیق، پوشش مسائل مربوط به حوزه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی همراه با ابعاد اقتصادی بطور همزمان می‌باشد. مسیریابی وسایل نقلیه به‌منظور کاهش مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه در کنار کاهش زمان کل سفر آنها را در راستای تحقق ابعاد اقتصادی و کاهش هزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای بهبود ابعاد زیست‌محیطی، کوتاه شدن مسافتی که هر وسیله نقلیه بایستی طی کند به خودی خود منجر به کاهش مصرف سوخت می‌گردد. همچنین استفاده از وسایل نقلیه دوگانه‌سوز در سطح دوم در راستای کاهش آلودگی‌ها در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این اعمال جریمه برای تخطی از حداکثر سقف مجاز مشخص شده برای انتشار گاز CO<sub>2</sub> می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود شرایط زیست‌محیطی داشته باشد. حوزه اجتماعی یکی از بخش‌هایی است که در مقالاتی که به پایداری اشاره دارد کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و به ندرت ترکیبی از این سه چالش (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این پژوهش قصد داریم فاکتور اجتماعی را با ایجاد تعادل در حجم کاری روزانه رانندگان مورد بررسی قرار دهیم. توازن حجم کاری روزانه وسایل نقلیه از اهمیت زیادی در دنیای واقعی

مسائل اقتصادی، ابعاد زیست‌محیطی را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل مسئله چندین استراتژی مبتنی بر روش جستجوی انطباقی تصادفی حریشان و فرمول‌بندی برنامه ریزی ریاضی بکار بردند. جعفری نوذر و بهنامیان (Jafari Nozar and Behnamian, 2020) از الگوریتم ابتکاری برای زمانبندی یکپارچه مسیریابی وسیله نقلیه با توجه به کیفیت تولید برای محصولات فسادپذیر استفاده کردند. آنها در تحقیق خود هزینه‌ها را به حداقل و احتمال خرید مشتریان را به حداکثر رسانیدند.

وو و همکاران (Wu, et al., 2020) یک مدل بازیابی اختلال برای مسیریابی وسیله نقلیه وابسته به زمان در تحویل کالاهای فاسد شدنی ارائه کردند. در این تحقیق یک الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مسئله مسیریابی اولیه و همچنین توسعه بیشتر برای برنامه بازیابی اختلال ارائه شده است. هجد و همکاران (Hajad, et al., 2020) یک رویکرد برای به حداقل رسانیدن مسیریابی وسیله نقلیه و همچنین کاهش نرخ فسادپذیری محصول ارائه کردند. الگوریتم پیشنهادی بر اساس یک الگوریتم ممتیک با یک الگوریتم ژنتیک ساده و یک جستجوی محلی قدرتمند ساخته شده است. تلوکی و همکاران (Talouki, et al., 2021) با بهینه‌سازی استوار و استفاده از ترافیک سبب، یک مدل مسیریابی وسیله نقلیه پویا برای محصولات فسادپذیر را حل کردند. جدول ۱ علاوه بر نشان دادن مرور ادبیات مقالات اخیر در این حوزه، به مقایسه این پژوهش با سایر مقالات مرتبط می‌پردازد.

باتوجه به مرور ادبیات، نوآوری‌های مقاله به شرح زیر می‌باشد. - توسعه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط سه‌هدفه جدید برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی.

- در نظر گرفتن فسادپذیری محصولات علاوه بر فرض محدودیت ظرفیت انبارهای میانی.

- در نظر گرفتن جریمه جهت تحویل زودتر و یا دیرتر از حدود مشخص شده محصولات به مشتریان بصورت پنجره زمانی نرم علاوه بر فرض تحویل و برداشت همزمان.

- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دو سطح شبکه در راستای اهمیت مسائل زیست محیطی.

- ایجاد تعادل در حجم کاری روزانه رانندگان در راستای مسئولیت اجتماعی.

### ۳- تعریف مسئله

در این تحقیق، یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پایدار همراه با تحویل و برداشت همزمان با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی گذشته مورد بررسی قرار گرفته است.

رحیمی و همکاران (Rahimi, et al., 2020) برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و برداشت همزمان از یک الگوریتم ژنتیک در حال توسعه استفاده کردند. در این روش، الگوریتم ژنتیک با اصلاح پارامترهای ژنتیکی و ارائه عملیات کارآمد و مناسب، بهبود می‌یابد. همچنین برای ایجاد جمعیت اولیه از سه الگوریتم تصادفی، نزدیکترین همسایه و ارزان‌ترین درج استفاده شده است. دونگیانگ و همکاران (Dongyang, et al., 2020) یک مدل برنامه نویسی عدد صحیح مختلط و همچنین الگوریتم جستجوی محلی متغیر بهبود یافته برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و برداشت برای چندین محصول بصورت غیر جفت ارائه کردند. شی و همکاران (Shi, et al., 2020) یک الگوریتم دو مرحله‌ای مبتنی بر واژه نگاری را برای مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و برداشت همزمان و پنجره زمانی ارائه کردند. در مرحله اول یک جستجوی محله متغیر اصلاح شده با یک تابع هدف مبتنی بر یادگیری پیشنهاد شده است تا هدف اصلی را با حفظ ساختارهای بالقوه به حداقل برساند. در مرحله دوم، یک جستجوی ممنوعه مبتنی بر دو ساختار برای بهینه‌سازی بیشتر اهداف اولیه و ثانویه طراحی شده است. معماری و همکاران (Memari, et al., 2020) مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را با در نظر گرفتن چندین انبار و پنجره زمانی برای مشتریان مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم ژنتیک مرتب شده نامغلوب استفاده کردند. پائول و همکاران (Paul, et al., 2021) یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی دو هدفه با تحویل و برداشت همزمان تحت چندین پنجره زمانی ارائه کردند. با توجه به NP-hard بودن مسئله، به منظور بهینه‌سازی آن از جستجوی محله متغیر چند هدفه استفاده کردند. سیتک و همکاران (Sitek, et al., 2021) بهینه‌سازی مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل و برداشت متناوب و پنجره زمانی همراه یک رویکرد ترکیبی اصلاح شده ارائه کردند. آنها مدل مسئله را در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله کردند. علاوه بر این، روش ترکیبی اصلی، تلفیق برنامه‌ریزی محدودیت آپسیلون، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ریاضی برای پیاده‌سازی و بهینه‌سازی مدل پیشنهاد شده است. دوسی مارتینز و همکاران (do C. Martin, et al., 2021) بهینه‌سازی چابک را برای یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی همراه تحویل و برداشت ارائه کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در میلی ثانیه، نتایج رقابتی ایجاد کرده و می‌تواند از سایر ادعاهای علمی بهتر باشد.

آلکابنه و همکاران (Alkaabneh, et al., 2020) از روش تجزیه بندرز برای مسئله مسیریابی - موجودی با در نظر گرفتن محصولات فسادپذیر استفاده کردند. همچنین آنها علاوه بر

جدول ۱. مرور ادبیات موضوع بر اساس معیارهای استخراج شده

نام محقق	سال	ده سطح مسیریابی وسیله نقلیه	ابعاد اقتصادی	ایجاد زیست محیطی	ابعاد اجتماعی	پنجره زمانی همزمان	تحويل و برداشت همزمان	محصول فسادپذیر	چند محصولی
قطره سامانی و همکاران	۲۰۱۶	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
فتحی و همکاران	۲۰۱۹	✓	✓	✓		✓			
معماری و همکاران	۲۰۲۰					✓	✓		
کرانیک و همکاران	۲۰۱۳	✓	✓	✓					
الکابنه و همکاران	۲۰۲۰		✓	✓				✓	
دونگیانگ و همکاران	۲۰۲۰		✓				✓	✓	
هاجد و همکاران	۲۰۲۰		✓					✓	
جعفری نوذر و بهنامیان	۲۰۲۰		✓			✓		✓	✓
کیتجاچارونچای و همکاران	۲۰۲۰	✓				✓			
لیو و همکاران	۲۰۲۰	✓	✓	✓					
رحیمی و همکاران	۲۰۲۰		✓				✓		
شی و همکاران	۲۰۲۰		✓			✓	✓		
وو و همکاران	۲۰۲۰		✓			✓		✓	✓
مارتینز و همکاران	۲۰۲۱	✓	✓				✓		✓
پائول و همکاران	۲۰۲۱	✓	✓	✓		✓			
سیتک و همکاران	۲۰۲۱		✓			✓	✓		
تلوکی و همکاران	۲۰۲۱		✓	✓				✓	✓
این پژوهش	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

شکل ۱ تصویر کلی مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد. سطوح در نظر گرفته شده در این شبکه شامل سطوح انبار مرکزی، انبارهای میانی و مشتریان نهایی هستند. در این شکل انبارهای میانی پس از دریافت اطلاعات تقاضای مشتریان به انتقال محصولات فسادپذیر با توجه به عمر محصولات در پنجره زمانی از پیش تعریف شده، اقدام می‌کنند. وسایل نقلیه عملیات برداشت را همزمان با عملیات تحويل تقاضای مشتریان

انجام می‌دهند. در سطح دوم شبکه زنجیره تامین نیز، انبار مرکزی با توجه به تقاضای هر انبار میانی اقدام به ارسال محصولات بر اساس پنجره زمانی می‌کند. در این مسئله یک انبار مرکزی، چندین انبار میانی و چندین مشتری در یک افق زمانی با چندین دوره در نظر گرفته شده است. توزیع محصولات بر اساس مسیریابی وسیله نقلیه و در یک پنجره زمانی نرم می‌باشد. در صورتی که محصول فسادپذیر زودتر و یا

#### ۴- مدل سازی مسئله

برای مدل سازی، مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم گیری بصورت زیر تعریف می شوند.

##### ۴-۱- مجموعه ها

$N_0$	:	انبار مرکزی
$N_d$	:	مجموعه انبارهای میانی
$n_d = \{1, \dots, N_d\}$		
$N_c$	:	مجموعه مشتریان
$n_c = \{1, \dots, N_c\}$		
$P$	:	مجموعه محصولات
$p = \{1, \dots, P\}$		
$T$	:	مجموعه دوره زمانی
$t = \{1, \dots, T\}$		

##### ۴-۲- پارامترها

هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول بین گره  $i$  و  $j$ :

$$C_{ij} \quad i, j \in \{N_0 \cup N_d\}$$

هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول بین گره  $l$  و  $m$ :

$$C_{lm} \quad l, m \in \{N_d \cup N_c\}$$

فاصله بین گره  $i$  و  $j$   $i, j \in \{N_0 \cup N_d\}$ :

$$D_{ij}$$

فاصله بین گره  $l$  و  $m$   $l, m \in \{N_d \cup N_c\}$ :

$$D_{lm}$$

میزان انتشار گاز گلخانه ای به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه گازوئیلی در سطح اول زنجیره تامین:

$$\alpha$$

میزان انتشار گاز گلخانه ای به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه دوگانه سوز در سطح دوم زنجیره تامین:

$$\beta$$

زمان انتقال محصول توسط وسیله نقلیه بین گره  $i$  و  $j$ :

$$T_{ij} \quad i, j \in \{N_0 \cup N_d\}$$

زمان انتقال محصول توسط وسیله نقلیه بین گره  $l$  و  $m$ :

$$T_{lm} \quad l, m \in \{N_d \cup N_c\}$$

هزینه جریمه به ازای تخطی از انتقال محصولات در پنجره زمانی از پیش تعریف شده:

$$Tv$$

پنجره زمانی انتقال محصول به انبارهای میانی  $i \in N_d$  در دوره زمانی  $t$ :

$$[a_{it}, b_{it}]$$

پنجره زمانی انتقال محصول به مشتریان  $l \in N_c$  در دوره زمانی  $t$ :

$$[a_{lt}, b_{lt}]$$

زمان فسادپذیری محصول  $p$ :

$$u_p$$

دیرتر از حدود مشخص شده به دست مشتری برسد، مشمول جریمه خواهد شد. مدل اصلی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پایدار همراه با تحویل و برداشت همزمان با توجه به مفروضات زیر قابل مدل سازی می باشد:

- وسایل نقلیه همگن برای حمل و نقل محصولات استفاده شده است.

- ظرفیت وسایل نقلیه محدود بوده و وسایل نقلیه در سطح اول ظرفیت بیشتری نسبت به وسایل نقلیه در سطح دوم دارند.

- در سطح اول وسایل نقلیه با سوخت گازوئیلی و در سطح دوم به منظور کاهش اثرات زیست محیطی بصورت دوگانه سوز در نظر گرفته شده است.

- ظرفیت انبارهای میانی محدود است.

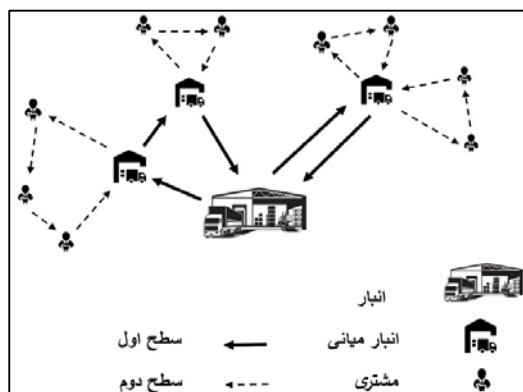
- مشتریان دارای پنجره زمانی نرم هستند.

- میزان تقاضا ثابت و مشخص است.

- مسئله چند محصولی است و چندین محصول فسادپذیر با عمر محدود و مشخص در نظر گرفته شده است.

- مسئله چند دوره ای است و افق برنامه ریزی ثابت و مشخص است.

با توجه به مفروضات بیان شده، هدف اصلی این تحقیق، کاهش هزینه های کل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه ای و ایجاد تعادل در حجم کار روزانه رانندگان ناوگان حمل و نقل در طول افق برنامه ریزی است. برای رسیدن به این سه تابع هدف، بایستی مسیریابی بهینه حمل و نقل در هر دو سطح شبکه زنجیره تامین مشخص گردد.



شکل ۱. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پایدار همراه با

تحویل و برداشت همزمان

مقدار زمان تجاوز یافته از پنجره زمانی برای انبار میانی $i \in N_d$	$E_{it}$	حداکثر ظرفیت انبار میانی $i \in N_d$ از محصول $p$	$Ca_{ip}$
	$N_d$	مقدار تحویل محصول $p$ به انبار میانی $i \in N_d$	$D_{ip}$
مقدار زمان تجاوز یافته از پنجره زمانی برای مشتری $l \in N_c$	$E1_{lt}$	مقدار برداشت محصول $p$ از انبار میانی $i \in N_d$	$P_{ip}$
مقدار بار انباشته وسیله نقلیه قبل از تحویل بار به انبار میانی	$U_{ipt}$	مقدار تحویل محصول $p$ به مشتری $l \in N_c$	$D1_{lp}$
	$i \in N_d$ در دوره زمانی $t$	مقدار برداشت محصول $p$ از مشتری $l \in N_c$	$P1_{lp}$
مقدار بار انباشته وسیله نقلیه بعد از برداشت بار از انبار میانی	$V_{ipt}$	ظرفیت وسیله نقلیه همگن از محصول $p$ در سطح اول	$CV1_p$
	$i \in N_d$ در دوره زمانی $t$	ظرفیت وسیله نقلیه همگن از محصول $p$ در سطح دوم	$CV2_p$
اگر مشتری $l \in N_c$ به انبار میانی $i \in N_d$ در دوره زمانی	$Z_{lit}$	کل میزان انتشار گازهای گلخانه ای مجاز در سطح اول	$\phi 1$
$t$ تخصیص یابد مقدار ۱ و در غیر این صورت ۰ میگیرد.		شبکه زنجیره تامین	
مقدار بار انباشته وسیله نقلیه قبل از تحویل بار به مشتری $l \in N_c$	$U1_{lpt}$	کل میزان انتشار گازهای گلخانه ای مجاز در سطح دوم	$\phi 2$
	$N_c$ در دوره زمانی $t$	شبکه زنجیره تامین	
مقدار بار انباشته وسیله نقلیه بعد از برداشت بار از مشتری	$V1_{lpt}$		
	$l \in N_c$ در دوره زمانی $t$		
زمان رسیدن وسیله نقلیه به انبار میانی $i \in N_d$ در دوره	$S_{it}$		
	زمانی $t$		
زمان رسیدن وسیله نقلیه به مشتری $m \in N_c$ و خارج شده	$S1_{imt}$		
	از انبار میانی $i \in N_d$ در دوره زمانی $t$		
کل زمان سفر وسیله نقلیه خارج شده از انبار میانی $l \in N_c$	$TW_{lt}$		
	در دوره زمانی $t$		

### ۳-۴- متغیرهای تصمیم

اگر وسیله نقلیه گره  $j$  را بعد از گره  $i$  در دوره زمانی  $t$  بازدید کند، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.  $X_{ijt}$

$$i, j \in \{N_0 \cup N_d\}$$

اگر وسیله نقلیه گره  $l$  را بعد از گره  $m$  در دوره زمانی  $t$  بازدید کند، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.  $Y_{lmt}$

$$l, m \in \{N_d \cup N_c\}$$

### ۴-۴- مدل ریاضی

$$\text{Min}\omega 1 = \sum_{i=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{t=1}^T C_{ij} X_{ijt} + \sum_{l=1}^{N_d \cup N_c} \sum_{m=1}^{N_d \cup N_m} \sum_{t=1}^T C_{lm} Y_{lmt} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{t=1}^T T v E_{it} + \sum_{l=1}^{N_c} \sum_{t=1}^T T v E1_{lt}$$

$$\text{Min}\omega 2 = \sum_{i=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{t=1}^T \alpha D_{ij} X_{ijt} + \sum_{l=1}^{N_d \cup N_c} \sum_{m=1}^{N_d \cup N_m} \sum_{t=1}^T \beta D_{lm} Y_{lmt} \quad (2)$$

$$\text{Min}\omega 3 = \max \{TW_{lt}, \forall l \in N_c, t \in T\} \quad (3)$$

s. t.:

$$\sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} X_{ijt} = 1, \quad \forall i \in N_d, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} X_{ijt} = \sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} X_{jit}, \quad \forall i \in \{N_0 \cup N_d\}, t \in T \quad (5)$$

$$U_{jpt} - U_{ipt} + CV1_p X_{ijt} = CV1_p - D_{ip}, \quad \forall i, j \in N_d, t \in T, p \in P \quad (6)$$

$$D_{ip} \leq U_{ipt} \leq CV1_p, \quad \forall i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (7)$$

$$V_{ipt} - V_{jpt} + CV1_p X_{ijt} = CV1_p - P_{jp}, \quad \forall i, j \in N_d, t \in T, p \in P \quad (8)$$

$$P_{ip} \leq V_{ipt} \leq CV1_p, \quad \forall i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (9)$$

$$V_{ipt} + U_{ipt} - D_{ip} \leq CV1_p, \quad \forall i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (10)$$

$$D_{ip} + P_{ip} \leq Ca_{ip}, \quad \forall i \in N_d, p \in P \quad (11)$$

$$P_{ip} = \sum_{l=1}^{N_c} Z_{lit} \cdot P1_{lp}, \quad \forall i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (12)$$

$$D_{ip} = \sum_{l=1}^{N_c} Z_{lit} \cdot D1_{lp}, \quad \forall i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^{N_d \cup N_c} Y_{lmt} = 1, \quad \forall l \in N_c, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^{N_d \cup N_c} Y_{lmt} = \sum_{m=1}^{N_d \cup N_c} Y_{mlt}, \quad \forall l \in N_c, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{N_d} Z_{iit} = 1, \quad \forall l \in N_c, t \in T \quad (16)$$

$$Y_{iit} \leq Z_{iit}, \quad \forall i \in N_d, l \in N_c, t \in T \quad (17)$$

$$Y_{iit} \leq Z_{iit}, \quad \forall i \in N_d, l \in N_c, t \in T \quad (18)$$

$$Y_{lmt} + Z_{iit} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_d} Z_{mjt} \leq 2, \quad \forall l, m \in N_c, i \in N_d, t \in T \quad (19)$$

$$U1_{mpt} - U1_{lpt} + CV2_p \cdot Y_{lmt} + (CV2_p - D1_{lp} - D1_{mp})Y_{lmt} \leq CV2_p - D1_{lp}, \quad \forall l, m \in N_c, p \in P, t \in T \quad (20)$$

$$U1_{lpt} \geq D1_{lp} + \sum_{m=1}^{N_c} Y_{lmt} \cdot D1_{mp}, \quad \forall l, m \in N_c, p \in P, t \in T \quad (21)$$

$$U1_{lpt} \leq CV2_p - (CV2_p - D1_{lp})Y_{iit}, \quad \forall l \in N_c, i \in N_d, t \in T, p \in P \quad (22)$$

$$V1_{lpt} - V1_{mpt} + CV2_p \cdot Y_{lmt} + (CV2_p - P1_{lp} - P1_{mp})Y_{lmt} \leq CV2_p - P1_{mp}, \quad \forall l, m \in N_c, p \in P, t \in T \quad (23)$$

$$V1_{lpt} \geq P1_{lp} + \sum_{m=1}^{N_c} Y_{mlt} \cdot P1_{mp}, \quad \forall l, m \in N_c, p \in P, t \in T \quad (24)$$

$$V1_{lpt} \leq CV2_p - (CV2_p - P1_{lp})Y_{ilt}, \quad \forall l \in N_c, i \in N_d, p \in P, t \in T \quad (25)$$

$$V1_{lpt} + U1_{lpt} - D1_{lp} \leq CV2_p \quad (26)$$

$$S_{jt} \geq Ti_{ij} - M \cdot (1 - X_{ijt}), \quad \forall j \in N_0, j \in N_d, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (27)$$

$$S_{jt} \geq S_{it} + Ti_{ij} - M \cdot (1 - X_{ijt}), \quad \forall i, j \in N_d, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (28)$$

$$E_{it} \geq \max\{a_{it} - S_{it}, S_{it} - b_{it}\}, \quad \forall i \in N_d, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (29)$$

$$S1_{imt} \geq Ti_{im} - M \cdot (1 - Y_{imt}), \quad \forall i \in N_d, m \in N_c, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (30)$$

$$S1_{imt} \geq S_{ilt} + Ti_{im} - M \cdot (2 - Y_{imt} - Z_{mit}), \quad \forall i \in N_d, \forall l, m \in N_c, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (31)$$

$$E1_{lt} \geq \max\{a_{lt}Z_{lit} - S1_{ilt}, S1_{ilt} - b_{lt}Z_{lit}\}, \quad \forall i \in N_d, \forall l \in N_c, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{j=1}^{N_0 \cup N_d} \sum_{t=1}^T \alpha D_{ij} X_{ijt} \leq \varphi 1 \quad (33)$$

$$\sum_{l=1}^{N_d \cup N_c} \sum_{m=1}^{N_d \cup N_m} \sum_{t=1}^T \beta D_{lm} Y_{lmt} \leq \varphi 2 \quad (34)$$

$$TW_{lt} \geq S1_{ilt} + Ti_{li} \cdot Y_{lit}, \quad \forall i \in N_d, \forall l \in N_c, t \in T, t \leq \max\{u_p\} \quad (35)$$

خروجی های هر گره با هم برابر باشد. محدودیت (۶) مانع از ایجاد زیرتورهای تحویل در سطح اول می گردد. محدودیت (۷) حد پایین و بالا بار تحویلی در وسیله نقلیه قبل از سرویس دهی به انبار میانی را نشان می دهد. محدودیت (۸) مانع از ایجاد زیرتورهای تحویل در سطح اول را نشان می دهد. محدودیت (۹) حد پایین و بالا بار برداشت شده در وسیله نقلیه قبل از سرویس دهی به انبار میانی را نشان می دهد. محدودیت (۱۰) ظرفیت وسیله نقلیه در سطح اول را نشان می دهد. محدودیت (۱۱) ظرفیت هر انبار میانی را نشان می دهد. محدودیت (۱۲) محاسبه تقاضای برداشت محصول از انبار میانی از طریق تخصیص مشتریان به آنها را نشان می دهد.

رابطه (۱) مقدار تابع هدف اول مسئله را نشان می دهد و شامل کمینه سازی هزینه های انتقال و همچنین هزینه های جریمه تجاوز از پنجره زمانی نرم در سطح اول و دوم شبکه زنجیره تامین است. رابطه (۲) به کمینه سازی میزان آلاینده ناشی از تردد وسایل نقلیه بین انبار و انبارهای میانی و همچنین انبارهای میانی به مشتری می پردازد. رابطه (۳) حداکثر زمان تردد وسیله نقلیه باری خارج شده از هر انبار میانی را کمینه می کند. این امر در راستای ارضای فاکتور اجتماعی منجر به ایجاد تعادل در تردد ناوگان باری می گردد. محدودیت (۴) تضمین می کند هر انبار میانی توسط هر وسیله نقلیه دقیقاً یکبار ملاقات شود. محدودیت (۵) تضمین می کند در سطح اول تعداد ورودی ها و

## روش حل و تحلیل نتایج

در این بخش، به تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها و بررسی مدل توسعه داده شده، پرداخته خواهد شد. برای بررسی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط سه‌هدفه جدید و همچنین تایید و اعتبارسنجی آن، یک مسئله در اندازه کوچک طراحی و با استفاده از نرم افزار تجاری GAMS و روش تصمیم‌گیری چندهدفه معیار جامع حل شده است. در ادامه و به منظور حل نمونه مسائل در اندازه‌های بزرگتر از الگوریتم فراابتکاری NSGA II و MOPSO استفاده شده است. بنابراین در این بخش از تحقیق، به طراحی کروموزوم اولیه الگوریتم ژنتیک و همچنین تنظیم پارامتر الگوریتم NSGA II و MOPSO با استفاده از روش تاگوچی نیز پرداخته شده است.

## حل نمونه مسئله در اندازه کوچک با روش تصمیم‌گیری

### معیار جامع

در این بخش از تحقیق، به حل نمونه مسئله در اندازه کوچک با فرض ۱ انبار مرکزی، ۳ انبار میانی، ۵ مشتری در نظر گرفته شده است که بایستی تقاضای مشتریان از ۲ محصول و در ۲ دوره زمانی برطرف گردد. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های دنیای واقعی و همچنین توسعه‌ای بودن مدل ریاضی، از داده‌های تصادفی بر اساس تابع توزیع یکنواخت به شرح جدول ۲ استفاده شده است. در روش تصمیم‌گیری معیار جامع، نیاز به کسب بهترین مقدار هر تابع هدف به روش بهینه‌سازی انفرادی می‌باشد. یعنی بایستی ابتدا مقدار هر تابع هدف بدون در نظر گرفتن تابع هدف دیگر توسط نرم افزار بدست آید تا در محاسبات از آن بهره گرفته شود. رابطه (۳۶) روش تصمیم‌گیری چند هدفه معیار جامع را نشان می‌دهد.

محدودیت (۱۳) محاسبه تقاضای تحویل محصول به انبار میانی از طریق تخصیص مشتریان به آنها را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند در سطح دوم هر مشتری توسط هر وسیله نقلیه دقیقاً یکبار ملاقات گردد. محدودیت (۱۵) نیز تضمین می‌کند در سطح دوم تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های هر نود با هم برابر باشند. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند هر مشتری فقط به یک انبار میانی اختصاص یابد. محدودیت (۱۷) تا (۱۹) شامل محدودیت‌های جلوگیری از مسیرهای غیر مجاز است. (شروع و پایان هر مسیر به انبار ختم شود) محدودیت (۲۰) حذف زیرتوره‌های تحویل در سطح دوم را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۱) و (۲۲) حد پایین و بالا بار تحویل در وسیله نقلیه قبل از سرویس‌دهی به مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۳) حذف زیرتورها برداشت در سطح دوم را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۴) و (۲۵) حد پایین و بالا بار برداشت در وسیله نقلیه قبل از سرویس‌دهی به مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۶) ظرفیت وسیله نقلیه در سطح دوم را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۷) زمان رسیدن وسیله نقلیه از انبار مرکزی به اولین انبار میانی را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۸) زمان رسیدن وسیله نقلیه خارج شده از انبار مرکزی را بین همه انبارهای میانی و بازگشت به انبار مرکزی محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۹) مقدار تجاوز زمانی از پنجره زمانی را در سطح اول شبکه زنجیره تامین نشان می‌دهد. محدودیت (۳۰) زمان رسیدن وسیله نقلیه از انبار میانی به اولین مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۱) زمان رسیدن وسیله نقلیه خارج شده از انبار میانی را بین همه مشتریان تخصیص یافته به آن انبار و بازگشت به انبار مرکزی محاسبه می‌کند. محدودیت (۳۲) مقدار تجاوز زمانی از پنجره زمانی را در سطح دوم شبکه زنجیره تامین نشان می‌دهد. محدودیت (۳۳) و (۳۴) به ترتیب محدودیت مربوط به میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تردد وسایل نقلیه در سطح اول شبکه زنجیره تامین و سطح دوم شبکه زنجیره تامین را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند میزان انتشار نبایستی از مقدار تایید شده توسط مرکز تجاوز پیدا کند. محدودیت (۳۵) کل زمان تردد وسایل نقلیه را نشان می‌دهد.

جدول ۲. حدود بازه‌ای پارامترهای مسئله

بر اساس تابع توزیع یکنواخت

پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
$C_{ij}$	$\sim U(10,20)$	$[a_{it}, b_{it}]$	$\sim U(5,35)$
$C_{im}$	$\sim U(10,20)$	$u_p$	1
$D_{ij}$	$\sim U(10,100)$	$Ca_{ip}$	$\sim U(50,70)$
$D_{im}$	$\sim U(10,100)$	$D_{ip}$	$\sim U(10,30)$
$\alpha$	0.4	$P_{ip}$	$\sim U(5,15)$
$\beta$	0.6	$D1_{ip}$	$\sim U(10,15)$
$T_{ij}$	$\sim U(10,20)$	$P1_{ip}$	$\sim U(5,10)$
$T_{im}$	$\sim U(10,20)$	$\varphi 1$	520
$T_v$	2	$\varphi 2$	840
$[a_{it}, b_{it}]$	$\sim U(5,35)$		

پس از حل مسئله فوق، مجموعه ای از جواب‌های کارای مسئله به شرح جدول ۴ و شکل ۲ پدید آمده است. در شکل ۲، جهت تشکیل جبهه پارتو، توابع هدف مسئله بصورت ۲ به ۲ با یکدیگر ترسیم شده است. در جدول ۴ تعداد ۶ جواب کارا در ۲۰ تکرار پیوسته روش مونت کارلو بدست آمده است.

بر اساس این جدول و شکل ۲ مشاهده می‌گردد با افزایش هزینه حمل و نقل، حداکثر زمان تردد وسیله نقلیه کاهش یافته است ولی هیچ روند خاصی بین هزینه‌های حمل و نقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای دیده نمی‌شود.

$$L_p = \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \left[ \frac{(f_i - f_i^*)}{(f_i^*)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, p \geq 1 \quad (36)$$

تحلیل حساسیت مسئله در اندازه کوچک

در این بخش به تحلیل حساسیت مسئله مورد بررسی و همچنین تاثیر تغییرات برخی از پارامترهای مسئله بر روی مقادیر توابع هدف پرداخته شده است. از این رو ابتدا مقدار میزان انتشار گاز گلخانه‌ای در سطح اول و دوم شبکه زنجیره تامین مورد بررسی قرار گرفته است و مقدار آن ۳۰٪، ۲۰٪ و ۱۰٪ کمتر و بیشتر از مقدار پایه آن در نظر گرفته شده است. جدول ۵ تغییرات مقادیر توابع هدف مسئله را به ازای تغییرات در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطوح اول و دوم شبکه زنجیره تامین نشان می‌دهد.

در رابطه فوق  $f_i$  تابع هدف  $i$ ام مسئله،  $f_i^*$  بهترین مقدار تابع هدف بدست آمده از روش بهینه‌سازی انفرادی و  $W_i$  وزن تخصیص یافته به هر تابع هدف است. همچنین در این تحقیق از نرم خطی یعنی  $p = 1$  و اوزان تصادفی بر اساس روش مونت کارلو استفاده شده است. جدول ۳ مقدار بهینه هر تابع هدف را به روش بهینه‌سازی انفرادی نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقدار بهینه توابع هدف به روش بهینه‌سازی انفرادی

تابع هدف	بهترین مقدار	زمان محاسباتی (ثانیه)
تابع هدف اول (هزینه)	۲۴۶,۹۸	۱۲,۳۶
تابع هدف دوم (میزان انتشار گاز گلخانه‌ای)	۵۱۲,۸۰	۱۰,۲۴
تابع هدف سوم (حداکثر زمان تردد وسیله نقلیه)	۴۰	۱۱,۳۵

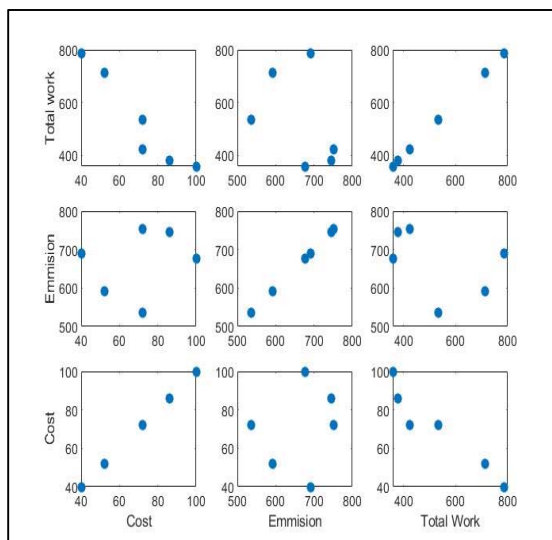
جدول ۴. مجموعه جواب کارای حاصل از حل مسئله اندازه کوچک

جواب کارا	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم
۱	۷۸۶,۷۱۳	۶۹۰,۸۰	۴۰
۲	۷۱۳,۱۶۳	۵۹۲,۴۰	۵۲
۳	۵۳۳,۲۵۸	۵۳۶,۴۰	۷۲
۴	۴۲۲,۸۱۸	۷۵۲,۴۰	۷۲
۵	۳۷۸,۰۸۶	۷۴۴,۴۰	۸۶
۶	۳۵۸,۶۶۷	۶۷۶,۴۰	۱۰۰

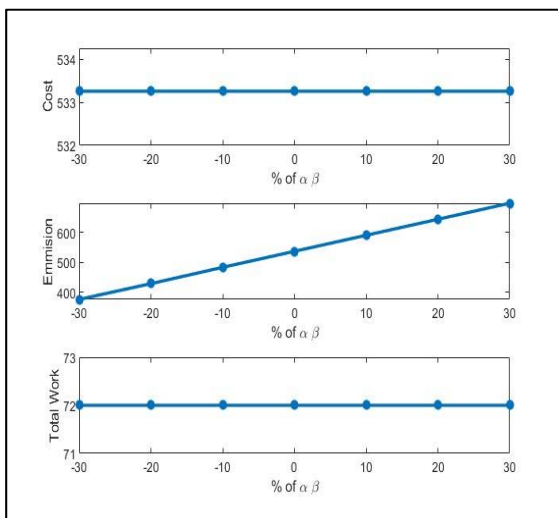
جدول ۵. اثر تغییرات میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

در توابع هدف

تغییرات ( $\alpha, \beta$ پارامتر)	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف سوم
-۳۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۳۷۵,۴۸۰	۷۲
-۲۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۴۲۸,۱۲۰	۷۲
-۱۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۴۸۲,۷۶۰	۷۲
پایه	۵۳۳,۲۵۸	۵۳۶,۴۰	۷۲
+۱۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۵۹۰,۰۴۰	۷۲
+۲۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۶۴۳,۶۸	۷۲
+۳۰٪	۵۳۳,۲۵۸	۶۹۷,۳۲۰	۷۲



شکل ۲. جبهه پارتو حاصل از حل مسئله اندازه کوچک



شکل ۳. روند تغییرات مقادیر توابع هدف به ازای تغییرات

در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

## ۵-۲- حل نمونه مسئله در اندازه کوچک با

### الگوریتم‌های NSGA II و MOPSO

در این بخش از تحقیق، تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی، طراحی نمونه مسائل و نتایج محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. شبه کد الگوریتم NSGA II و MOPSO در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

در این بخش به تحلیل حساسیت مسئله مورد بررسی و همچنین تاثیر تغییرات برخی از پارامترهای مسئله بر روی مقادیر توابع هدف پرداخته شده است. از این رو ابتدا مقدار میزان انتشار گاز گلخانه‌ای در سطح اول و دوم شبکه زنجیره تامین مورد بررسی قرار گرفته است و مقدار آن ۳۰٪، ۲۰٪ و ۱۰٪ کمتر و بیشتر از مقدار پایه آن در نظر گرفته شده است. جدول ۵ تغییرات مقادیر توابع هدف مسئله را به ازای تغییرات در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطوح اول و دوم شبکه زنجیره تامین نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۵ مشاهده می‌گردد با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، به دلیل تاثیر مستقیم این پارامتر در تابع هدف دوم مسئله، میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش و مقدار هزینه و حداکثر زمان تردد وسایل نقلیه ثابت باقی مانده است. شکل ۳ روند تغییرات مقادیر توابع هدف را به ازای تغییرات در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهد.

شبه کد MOPSO
قدم ۱: ایجاد جمعیت اولیه تصادفی.
قدم ۲: مقداردهی اولیه به سرعت هر ذره.
قدم ۳: محاسبه ارزیابی هر ذره از جمعیت.
قدم ۴: جدا کردن اعضای نامغلوب از جمعیت و ذخیره آنها در آرشیو خارجی.
قدم ۵: جدول یثدی فضای هدف کشف شده.
قدم ۶: هر ذره از میان اعضای آرشیو، یک رهبری فردی و یک رهبر جمعی انتخاب کرده و حرکت می‌کند.
قدم ۷: بهترین خاطره شخصی هر یک از ذرات به روز می‌شود.
قدم ۸: اعضای نامغلوب جمعیت قبلی به آرشیو اضافه می‌شوند.
قدم ۹: اعضای مغلوب آرشیو حذف می‌شوند.
قدم ۱۰: اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد تعدادی از اعضای آرشیو با استفاده از چرخ رولت حذف می‌شوند.
قدم ۱۱: اگر شرط خاتمه برقرار نیست به قدم ۵ پرو در غیر اینصورت به قدم بعدی پرو
قدم ۱۲: تهیه گزارش جبهه پاراتو

شبه کد NSGA II
قدم ۱: ایجاد جمعیت اولیه تصادفی.
قدم ۲: محاسبه تابع برازندگی برای هر یک از اعضای جمعیت
قدم ۳: انتخاب اعضا برای عملگرها
قدم ۴: انجام عملگر تقاطع بر روی اعضای انتخاب شده
قدم ۵: عملگر جهش بر روی اعضای انتخاب شده
قدم ۶: محاسبه تابع برازندگی
قدم ۷: ادغام جمعیت اصلی، جمعیت تقاطع یافته و جمعیت جهش یافته
قدم ۸: اعمال عملگرها مرتب‌سازی نامغلوب روی جمعیت ادغام شده
قدم ۹: انتقال اعضای برتر جمعیت به نسل بعدی به اندازه جمعیت فعلی
قدم ۱۱: اگر شرط خاتمه برقرار نیست به قدم ۳ پرو در غیر اینصورت به قدم بعدی پرو
قدم ۱۲: تهیه گزارش جبهه پاراتو

شکل ۴. شبه کد الگوریتم NSGA II

شکل ۵. شبه کد الگوریتم MOPSO

در این رابطه در صورت کسر شاخص‌های مورد استفاده در مقایسه الگوریتم‌ها فرا ابتکاری شامل میانگین تابع هدف اول تا سوم، تعداد جواب کارا (NPF)، شاخص بیشترین گسترش (MSI)، شاخص فاصله متریک (SM)، شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل (MID) و زمان محاسباتی (CPU-time) بکار برده شده است. پس از تعیین مقدار هر آزمایش، از رابطه (۳۸) مقدار بی‌مقیاس شده هر آزمایش (RPD) جهت تحلیل طراحی آزمایش تاگوچی محاسبه می‌گردد.

$$s_i = \left| \frac{\text{MeanZ1} + \text{MeanZ2} + \text{MeanZ3} + \text{NPF} + \text{MSI} + \text{SM} + \text{MID} + \text{CPU\_time}}{8} \right| \quad (37)$$

$$\text{RPD} = \frac{S_i - S_i^*}{S_i^*} \quad (38)$$

تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فرا ابتکاری با روش تاگوچی در روش تاگوچی، در ابتدا باید فاکتورهای مناسب را شناسایی و سپس سطوح هر یک از فاکتورها را انتخاب و در ادامه باید طرح آزمایش مناسب را برای این فاکتورهای کنترل مشخص شود. پس از مشخص شدن طرح آزمایش، آزمایش‌ها را انجام داده و با هدف پیدا کردن بهترین ترکیب پارامترها، آزمایش‌ها تحلیل می‌شود. در این تحقیق، برای هر فاکتور ۳ سطح مطابق با جدول ۶ در نظر گرفته شده است. برای هر الگوریتم، با توجه به تعداد فاکتورها و تعداد سطوح آن‌ها به تعیین طراحی آزمایش و اجرای آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به سه تابع هدفه بودن مدل پیشنهادی، بایستی ابتدا مقدار هر آزمایش از رابطه (۳۷) محاسبه شود.

همچنین مطابق با جدول ۸ با مقایسه اختلاف حداکثر و حداقل مقادیر بدست آمده در الگوریتم MOPSO برای شاخص SN، تأثیر قابل توجه پارامتر Max it (حداکثر تعداد تکرار) در بهبود فرآیند حل الگوریتم MOPSO، مشهود است. پارامترهای w (ضریب گرانش)، c1 (ضریب یادگیری فردی)، Nparticle (تعداد ذرات) و c2 (ضریب یادگیری جمعی) و به ترتیب در رتبه‌های بعدی تأثیرگذاری قرار دارند.

جدول ۷. نتایج تحلیل تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA II

سطح	حداکثر تعداد تکرار	تعداد جمعیت	نرخ ترکیب	نرخ جهش
۱	۰,۱۴۷۹۴	۰,۱۵۴۷۸	۰,۰۹۵۲۷	۰,۰۸۶۸۶
۲	۰,۱۹۲۴۹	۰,۱۱۱۳۵	۰,۱۶۸۰۱	۰,۱۱۵۱۲
۳	۰,۰۱۱۲۵	۰,۰۸۵۵۶	۰,۰۸۸۴۰	۰,۱۴۹۷۰
دلنا	۰,۱۸۱۴۶	۰,۰۶۹۲۲	۰,۰۷۹۶۱	۰,۰۶۲۸۴
رتبه	۱	۳	۲	۴

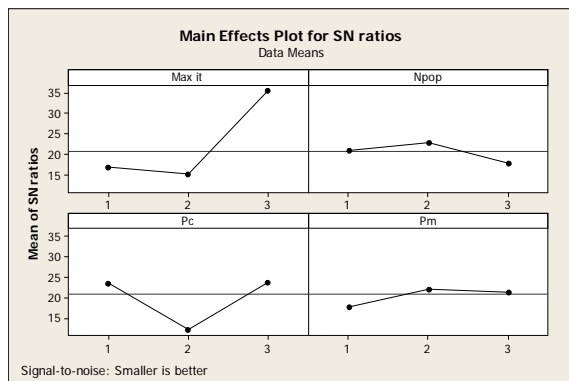
جدول ۶. سطوح پیشنهادی به ترتیب برای تنظیم پارامترهای

MOPSO و NSGA II به روش تاگوچی

الگوریتم	پارامتر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
NSGA II	حداکثر تعداد تکرار	Max it	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
	تعداد جمعیت	Npop	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
	نرخ ترکیب	Pc	۰,۳	۰,۵	۰,۷
	نرخ جهش	Pm	۰,۳	۰,۵	۰,۷
MOPSO	حداکثر تعداد تکرار	Max it	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
	تعداد ذرات	Nparticle	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
	ضریب یادگیری فردی	C1	۱	۱,۵	۲
	ضریب یادگیری جمعی	C2	۱	۱,۵	۲
	ضریب گرانشی	W	۰,۷	۰,۸	۰,۹

مطابق با جدول ۷ با مقایسه اختلاف حداکثر و حداقل مقادیر بدست آمده در الگوریتم NSGA II برای شاخص SN، تأثیر قابل توجه پارامتر Max it (حداکثر تعداد تکرار) در بهبود فرآیند حل الگوریتم NSGA II، مشهود است. پارامترهای Pc (نرخ ترکیب)، Npop (تعداد جمعیت) و Pm (نرخ جهش) به ترتیب در رتبه‌های بعدی تأثیرگذاری قرار دارند.

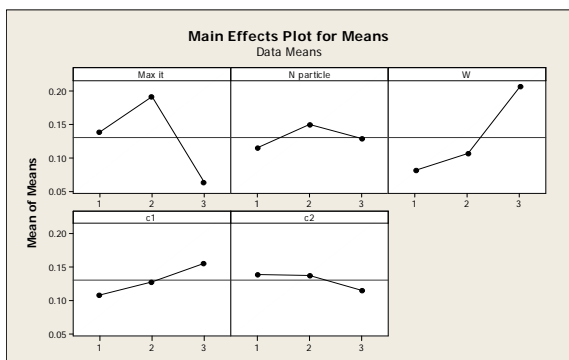
شکل ۶ و ۷ نمودار متوسط نسبت S/N و متوسط میانگین را برای الگوریتم NSGA II نشان می‌دهد. مطابق با آنچه بیان شد، بیشترین مقدار معیار SN، ملاک انتخاب مقادیر پارامترها می‌باشد. مطابق با نتایج قابل مشاهده از شکل ۷، در صورتی که مقدار حداکثر تعداد تکرار در سطح ۳، تعداد جمعیت در سطح ۲، نرخ ترکیب در سطح ۳ و نرخ جهش در سطح ۲ قرار بگیرد، الگوریتم NSGA II بیشترین کارایی را خواهد داشت.



شکل ۶. نمودار متوسط نسبت S/N در الگوریتم NSGA II

شکل ۸ و ۹ نمودار متوسط نسبت S/N و متوسط میانگین را برای الگوریتم MOPSO نشان می‌دهد. مطابق با آنچه بیان شد، بیشترین مقدار معیار SN، ملاک انتخاب مقادیر پارامترها می‌باشد.

نتایج در این بخش، علاوه بر تایید و اعتبارسنجی مدل ریاضی توسعه یافته مسئله، صحت نتایج حاصل از دو الگوریتم پیشنهادی را نیز نشان داد.



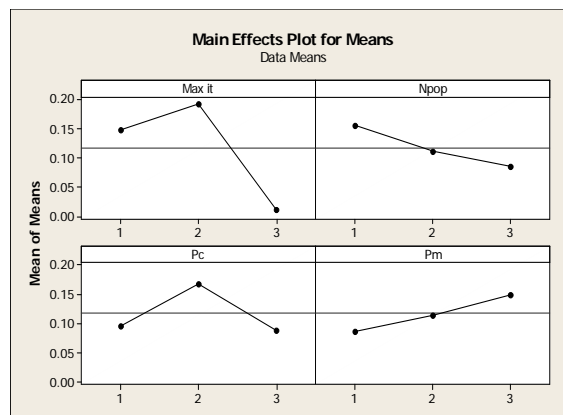
شکل ۹. نمودار متوسط میانگین‌ها در الگوریتم MOPSO

حل نمونه مسئله در اندازه متوسط و بزرگ

### با الگوریتم‌های NSGA II و MOPSO

به منظور حل نمونه مسائل در اندازه‌های بزرگتر، در این بخش ۱۵ نمونه مسئله طبق جدول ۹ و بر اساس داده‌های تصادفی تولید شده است. بر این اساس، میانگین‌های توابع هدف و میانگین زمان محاسباتی به دست آمده از هر نمونه مسئله در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

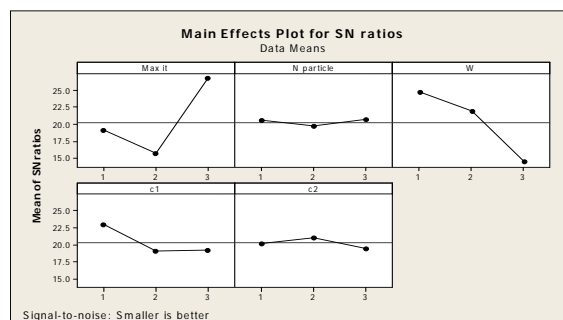
مطابق با شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه مسئله، زمان محاسباتی بصورت نمایی افزایش می‌یابد که دلیلی بر اثبات NP-Hard بودن مسئله می‌باشد. همچنین برای تحلیل راحت‌تر، شکل ۱۱ تا ۱۷ تغییرات میانگین‌های توابع هدف و شاخص‌های محاسباتی را در نمونه مسائل مختلف به تفکیک نشان می‌دهد. مطابق با شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان محاسباتی مقدار میانگین‌های توابع هدف افزایش یافته است و بیشترین افزایش صورت یافته در تغییرات دوره‌های زمانی بوده است. شکل ۱۰ نمودار تغییرات میانگین زمان محاسباتی را با افزایش اندازه مسئله نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار متوسط میانگین‌ها در الگوریتم NSGA II

### جدول ۸. نتایج تحلیل تنظیم پارامترهای الگوریتم MOPSO

سطح	حداکثر تعداد تکرار	تعداد ذرات	ضریب یادگیری گرانث	ضریب یادگیری فردی	ضریب یادگیری جمعی
۱	۰,۱۳۸۴۶	۰,۱۱۴۶	۰,۰۸۰۴	۰,۱۰۸۳۲	۰,۱۳۸۸۵
۲	۰,۱۹۱۶۰	۰,۱۴۹۰	۰,۱۰۵۱	۰,۱۲۸۵۵	۰,۱۳۸۳۶
۳	۰,۰۶۲۲۷	۰,۱۲۸۶	۰,۲۰۶۷	۰,۱۵۵۴۶	۰,۱۱۵۱۱
دلنا	۰,۱۲۹۳۳	۰,۰۳۴۴	۰,۱۲۶۳	۰,۰۴۷۱۳	۰,۰۲۳۷۴
رتبه	۱	۴	۲	۳	۵

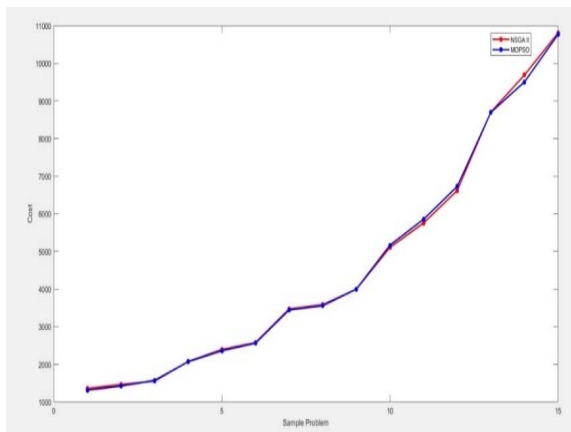


شکل ۸. نمودار متوسط نسبت S/N در الگوریتم MOPSO

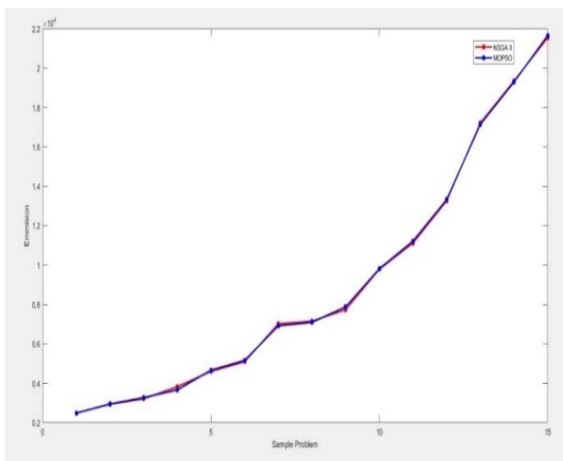
مطابق با نتایج قابل مشاهده از شکل ۹، در صورتی که مقدار حداکثر تعداد تکرار در سطح ۳، تعداد ذرات در سطح ۲، ضریب گرانث در سطح ۳، ضریب یادگیری فردی در سطح ۳ و ضریب یادگیری جمعی در سطح ۱ قرار بگیرد، الگوریتم MOPSO بیشترین کارایی را خواهد داشت.

جدول ۹. مسائل طراحی شده در اندازه متوسط و بزرگ

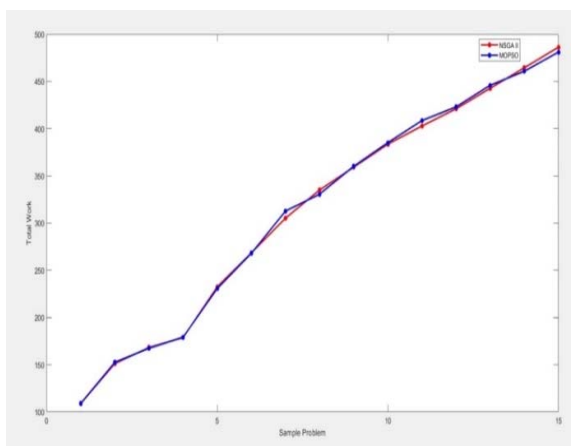
نمونه مسئله	مشتریان	تعداد کل	تعداد کل ایزارهای میانی	تعداد کل محصولات	تعداد کل	تعداد دوره ها
۱	۱۰	۶	۶	۶	۶	۴
۲	۱۲	۶	۶	۶	۶	۴
۳	۱۴	۶	۶	۶	۶	۴
۴	۱۶	۷	۷	۸	۸	۵
۵	۱۸	۷	۷	۸	۸	۵
۶	۲۰	۷	۷	۸	۸	۵
۷	۲۲	۸	۸	۹	۹	۶
۸	۲۴	۸	۸	۹	۹	۶
۹	۲۶	۹	۹	۱۰	۱۰	۶
۱۰	۲۸	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۷
۱۱	۳۰	۱۲	۱۲	۱۴	۱۴	۷
۱۲	۳۵	۱۴	۱۴	۱۵	۱۵	۷
۱۳	۴۰	۱۶	۱۶	۱۸	۱۸	۸
۱۴	۴۵	۱۸	۱۸	۲۰	۲۰	۸
۱۵	۵۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸



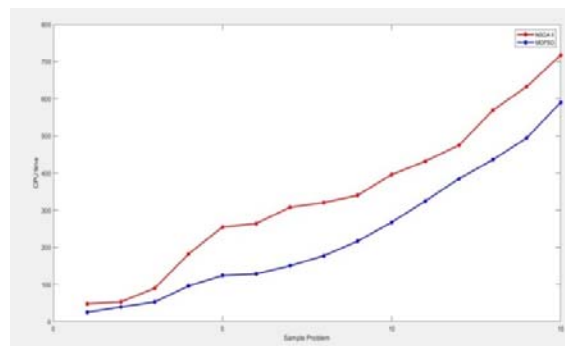
شکل ۱۱. تغییرات میانگین تابع هدف اول در نمونه مسائل مختلف.



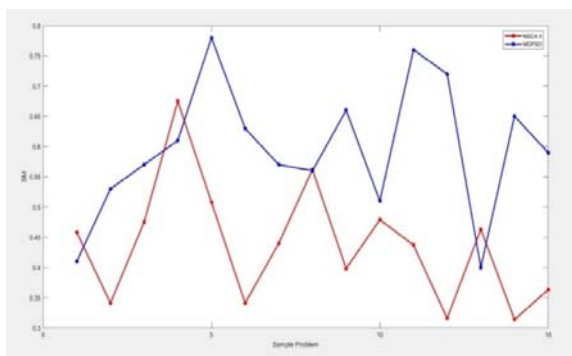
شکل ۱۲. تغییرات میانگین تابع هدف دوم در نمونه مسائل مختلف



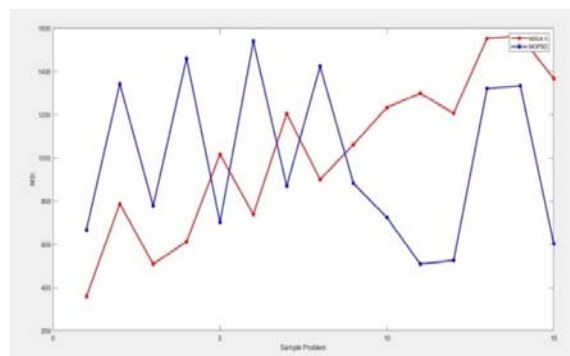
شکل ۱۳. تغییرات میانگین تابع هدف سوم در نمونه مسائل مختلف



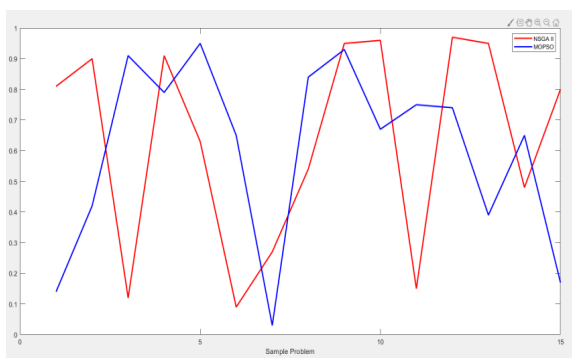
شکل ۱۰. تغییرات مقادیر زمان محاسباتی در نمونه مسائل مختلف



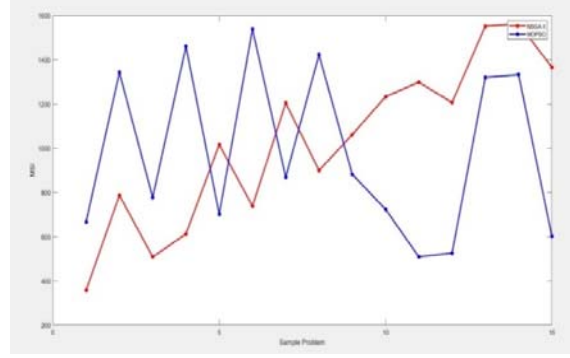
شکل ۱۶. تغییرات شاخص فاصله متریک در نمونه مسائل مختلف



شکل ۱۴. تغییرات تعداد جواب کارا در نمونه مسائل مختلف



شکل ۱۷. تغییرات شاخص فاصله از نقطه ایده آل در نمونه مسائل مختلف



شکل ۱۵. تغییرات شاخص بیشترین گسترش در نمونه مسائل مختلف

جدول ۱۰. میانگین توابع هدف و زمان محاسباتی حل مسائل اندازه متوسط و بزرگ با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

MOPSO	NSGA II	فاصله از نقطه ایده آل (MID)		فاصله متریک (SM)		بیشترین گسترش (MSI)		تعداد جواب کارا (NPF)		میانگین تابع هدف سوم (Z3)		میانگین تابع هدف دوم (Z2)		میانگین تابع هدف اول (Z1)		نمونه مسئله
		MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	MOPSO	NSGA II	
۲۵.۱	۴۷	-۰.۱۴	-۰.۸۱	-۰.۴۱	-۰.۳۵	۶۶۷	۳۵۸	۶۵	۵۶	۱۰۸	۱۰۸	۲۴۸۵	۲۴۸۹	۱۳۱۱	۱۳۵۹	۱
۳۹.۲	۵۳	-۰.۴۲	-۰.۹۰	-۰.۵۳	-۰.۳۴	۱۳۴۱	۷۸۷	۷۹	۶۰	۱۵۲	۱۵۱	۲۹۴۸	۲۹۴۰	۱۴۲۴	۱۴۶۵	۲
۵۲.۷	۸۹	-۰.۹۱	-۰.۱۲	-۰.۵۷	-۰.۴۷	۷۷۷	۵۰۸	۶۰	۷۵	۱۶۷	۱۶۸	۳۲۷۲	۳۲۱۰	۱۵۷۴	۱۵۵۵	۳
۹۵.۷	۱۸۱	-۰.۷۹	-۰.۹۱	-۰.۶۱	-۰.۶۷	۱۴۵۹	۶۱۲	۶۷	۸۳	۱۷۹	۱۷۸	۳۶۶۴	۳۸۲۳	۲۰۷۱	۲۰۷۵	۴
۱۲۳	۲۵۴	-۰.۹۵	-۰.۶۳	-۰.۷۸	-۰.۵۰	۷۰۲	۱۰۱۶	۶۵	۹۶	۲۳۰	۲۳۲	۴۶۶۳	۴۶۰۶	۲۳۶۱	۲۳۹۴	۵
۱۲۸	۲۶۴	-۰.۶۵	-۰.۰۹	-۰.۶۳	-۰.۳۴	۱۵۳۷	۷۳۷	۸۷	۸۰	۲۶۷	۲۶۸	۵۱۶۱	۵۰۹۵	۲۵۶۳	۲۵۷۹	۶
۱۵۰	۳۰۷	-۰.۰۳	-۰.۲۷	-۰.۵۷	-۰.۴۴	۸۶۹	۱۲۰۴	۶۱	۶۸	۳۱۲	۳۰۵	۶۹۱۵	۷۰۱۵	۳۴۴۴	۳۴۷۳	۷
۱۷۷	۳۲۰	-۰.۸۴	-۰.۵۴	-۰.۵۶	-۰.۵۶	۱۴۲۲	۸۹۹	۷۰	۸۱	۳۳۰	۳۳۵	۷۰۹۴	۷۱۵۳	۳۵۵۷	۳۵۸۶	۸
۲۱۶	۳۳۹	-۰.۹۳	-۰.۹۵	-۰.۶۶	-۰.۳۹	۸۸۱	۱۰۶۱	۷۹	۷۴	۳۶۰	۳۵۹	۷۸۷۹	۷۷۳۹	۴۰۰۰	۳۹۹۷	۹
۲۶۷	۳۹۵	-۰.۶۷	-۰.۹۶	-۰.۵۱	-۰.۴۷	۷۲۳	۱۲۳۲	۷۲	۷۹	۳۸۵	۳۸۳	۹۸۱۴	۹۷۸۷	۵۱۶۷	۵۱۰۷	۱۰
۳۲۴	۴۲۱	-۰.۷۵	-۰.۱۵	-۰.۷۶	-۰.۴۳	۵۰۹	۱۲۹۸	۸۳	۸۶	۴۰۸	۴۰۲	۱۱۲۱۷	۱۱۱۱۹	۵۸۵۷	۵۷۵۶	۱۱
۳۸۴	۴۷۴	-۰.۷۴	-۰.۹۷	-۰.۷۲	-۰.۳۱	۵۲۵	۱۳۰۶	۷۴	۹۰	۴۲۳	۴۲۱	۱۳۳۲۸	۱۳۳۵۹	۶۷۲۷	۶۶۲۰	۱۲
۴۳۵	۵۶۹	-۰.۳۹	-۰.۹۵	-۰.۴۰	-۰.۴۶	۱۳۱۹	۱۵۵۲	۶۶	۹۷	۴۴۵	۴۴۲	۱۷۱۳۴	۱۷۲۰۹	۸۶۹۶	۸۷۰۳	۱۳
۴۹۴	۶۳۲	-۰.۶۵	-۰.۴۸	-۰.۶۵	-۰.۳۱	۱۳۳۲	۱۵۶۲	۶۴	۸۵	۴۶۰	۴۶۴	۱۹۲۸۶	۱۹۳۴۳	۹۵۰۴	۹۶۹۰	۱۴
۵۸۹	۷۱۶	-۰.۱۷	-۰.۸۰	-۰.۵۹	-۰.۳۶	۶۰۲	۱۳۶۶	۷۶	۸۰	۴۸۱	۴۸۶	۲۱۶۵۶	۲۱۵۳۲	۱۰۷۶۶	۱۰۸۰۶	۱۵

به الگوریتم MOPSO رسیده است. در حالی که الگوریتم MOPSO در دستیابی به میانگین‌های توابع هدف اول تا سوم، شاخص فاصله از نقطه ایده آل و زمان محاسباتی کاراتر از

با توجه به نتایج بدست آمده، الگوریتم NSGA II در کسب شاخص‌های میانگین تعداد جواب کارا، میانگین بیشترین گسترش، میانگین شاخص متریک به نتایج بهتری نسبت

در اندازه کوچک طراحی و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند هدفه معیار جامع به حل مدل پرداخته شده که نتیجه آن تولید ۶ جواب کارا بود. پس از بررسی متغیرهای خروجی مسئله مشاهده شد که با افزایش جریمه ناشی از تجاوز از پنجره زمانی و همچنین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، مقدار تابع هدف اول و دوم افزایش یافته است. سپس به علت عدم کارایی نرم افزار GAMS از دو الگوریتم فرا ابتکاری NSGA II و MOPSO استفاده شد. بنابراین ۱۵ نمونه مسئله در اندازه‌های متوسط و بزرگ طراحی و مشاهده شد که با افزایش اندازه مسئله، زمان محاسباتی بصورت نمایی افزایش یافته است. لذا مسئله مورد بررسی یک مسئله از نوع NP-Hard است. نتایج بدست آمده نشان داد، الگوریتم NSGA II در کسب شاخص‌های میانگین تعداد جواب کارا، میانگین بیشترین گسترش، میانگین شاخص متریک به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم MOPSO رسیده است. در حالی که الگوریتم MOPSO در دستیابی به میانگین‌های توابع هدف اول تا سوم، شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل و زمان محاسباتی کارا تر از الگوریتم NSGA II بوده است. بر اساس وزن مطلوبیت بدست آمده مشاهده می‌گردد که الگوریتم MOPSO با کسب وزن مطلوبیت ۰,۷۰۶۱، به عنوان کارا ترین روش حل نسبت به الگوریتم NSGA II برای حل مدل سه هدفه بوده است.

پیشنهادها زیر جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.  
- در نظر گرفتن پارامترهای مسئله بصورت غیر قطعی جهت نزدیکی هر چه بیشتر شرایط مسئله مورد مطالعه به دنیای واقعی  
- در نظر گرفتن سطوح دیگری از جمله مراکز تولید و نیز تامین‌کننده‌ها.  
- استفاده روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری دیگر.

## ۶- مراجع

- فتحی، سیده بتول و دهقانیان، فرزاد (۱۳۹۸). ارائه یک مدل یکپارچه و روش حل برای زمانبندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه در یک زنجیره تامین دو سطحی با هدف کاهش مصرف سوخت. *پژوهشنامه حمل و نقل*، دوره ۱۱، شماره ۱، ۱۴۵-۱۱۹.  
- قطره سامانی، محمدرضا، حسینی مطلق، سید مهدی، یعقوبی، سعید و جوکار، عباس (۱۳۹۵). ارائه یک مدل احتمالی استوار چند هدفه برای مسئله مکان یابی مسیریابی دو سطحی با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره های زمانی. *پژوهشنامه حمل و نقل*، دوره ۸، شماره ۱، ۷۳-۵۳.  
- معماری، پدرام، پرتوی، محمد، جولای، فریبرز و توکلی مقدم، رضا (۱۳۹۹). توسعه مدل مکان‌یابی مسیریابی با در نظر

الگوریتم NSGA II بوده است. بر اساس وزن مطلوبیت بدست آمده مشاهده می‌گردد که الگوریتم MOPSO با کسب وزن مطلوبیت ۰,۷۰۶۱، به عنوان کارا ترین روش حل نسبت به الگوریتم NSGA II برای حل مدل سه هدفه بوده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

توسعه روزافزون شهرنشینی، صنایع و به‌خصوص صنایع پشتیبانی، جابه‌جایی انسان و کالا را بصورت مسئله‌ای درآورده است که پیچیدگی آن دائماً در حال افزایش می‌باشد. رشد شهری باعث افزایش تقاضا در صنعت حمل و نقل شده است که به تبع آن شهرها و صنایع بزرگ را دست به گریبان مشکلات زیادی در زمینه‌های تراکم ترافیکی، آلودگی هوا، اتلاف وقت‌های طولانی در مسیر سفرهای روزانه افراد، افزایش مصرف سوخت و استهلاک وسایل نقلیه و غیره کرده است. برای حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، صنایع تولیدی و بخش خدمات نیاز به یک سیستم مجهز و کارآمد حمل و نقل می‌باشد. حمل و نقل یکی از بخش‌های عمده و مهم از اقتصاد هر کشوری به‌شمار می‌رود و همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌های تشکیل دهنده هزینه تمام شده محصولات نهایی است. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مسائل مورد بحث در تحقیق در عملیات، توزیع کالا، جابجایی افراد و حمل و نقل می‌باشد. اهمیت انتقال مواد فسادپذیر از جمله شیر، مواد غذایی، دارویی و غیره نیز منجر به آن شده است تا در این تحقیق به مدل‌سازی و حل یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پایدار همراه با تحویل و برداشت همزمان و پنجره زمانی برای محصولات فسادپذیر پرداخته شود. مدل مورد نظر در دو سطح شبکه زنجیره تامین طراحی شده است که در سطح اول انبارهای میانی مسئول تحویل مواد فسادپذیر به مشتریان و برداشت محصولات فاسد شده از آنها را به روش مسیریابی وسیله نقلیه بر عهده دارند. همچنین در سطح دوم شبکه زنجیره تامین، انبارهای میانی و یک انبار مرکزی در نظر گرفته شده است تا تقاضای مورد نیاز انبارهای میانی را تامین و مقدار انبارش محصولات فاسد شده برگشتی را جمع‌آوری کند. در این تحقیق سه تابع هدف مختلف که به جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی می‌پردازد در نظر گرفته شده است. در جنبه اقتصادی هدف اصلی کمینه‌سازی هزینه‌های کل مسیر یابی وسیله نقلیه در جنبه زیست‌محیطی کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و در جنبه اجتماعی به ایجاد تعادل کاری رانندگان پرداخته شده است. برای حل مسئله، یک مثال

- Liu, D., Deng, Z., Mao, X., Yang, Y., & Kaisar, E. I., (2020). Two-Echelon vehicle-routing problem: optimization of autonomous delivery vehicle-assisted E-grocery distribution. *IEEE Access*, Vol. 8, 108705-108719.
- Paul, A., Kumar, R. S., Rout, C., & Goswami, A., (2021). A bi-objective two-echelon pollution routing problem with simultaneous pickup and delivery under multiple time window, constraint. *Opsearch*, Vol. 58, 1-32.
- Rahimi, A. M., Rajabi, V., & Ramezani Khansari, E., (2020). Developing genetic algorithm to solve Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, Vol. 4, 103-114.
- Shi, Y., Zhou, Y., Boudouh, T., & Grunder, O., (2020). A lexicographic-based two-stage algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time window. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 95, 103901.
- do C. Martins, L., Hirsch, P., & Juan, A. A., (2021). Agile optimization of a two-echelon vehicle routing problem with pickup and delivery. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 28, 201-221.
- Sitek, P., Wikarek, J., Rutczyńska-Wdowiak, K., Bocewicz, G., & Banaszak, Z., (2021). Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach. *Neurocomputing*, Vol. 423, 670-678.
- Talouki, R. Z., Javadian, N., & Movahedi, M. M., (2021). Optimization and incorporating of green traffic for dynamic vehicle routing problem with perishable products, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, 1-19.
- Wang, K., Shao, Y., & Zhou, W., (2017). Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 57, 262-276.
- Wu, Y., Zheng, B., & Zhou, X., (2020). A disruption recovery model for time-dependent vehicle routing problem with time windows in delivering perishable goods. *IEEE Access*, Vol. 8, 189614-189631.
- گرفتن رضایت مشتری و دریافت و تحویل همزمان. پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۲، شماره ۱، ۱۱۴-۱۰۱.
- Al Chami, Z., Manier, H., & Manier, M. A., (2019). A lexicographic approach for the bi-objective selective pickup and delivery problem with time windows and paired demands. *Annals of Operations Research*, Vol. 273, 237-255.
- Alkaabneh, F., Diabat, A., & Gao, H. O., (2020). Benders decomposition for the inventory vehicle routing problem with perishable products and environmental cost. *Computers & Operations Research*, Vol. 113, 104751.
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R., (2013). GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem. *In Advances in Metaheuristics*, Springer, New York, NY.113-125.
- Dongyang, X., Kunpeng, L., Jiehui, Y., & Ligang, C., (2020). A multicommodity unpaired pickup and delivery vehicle routing problem with split loads and unloads. *Industrial Management & Data Systems*.
- Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D., & Tatsiopoulos, I. P., (2019). Vehicle routing problem for urban freight transportation: A review of the recent literature. *Operational Research in the Digital era-ICT Challenges*, 89-104.
- Hajad, M., Tangwarodomnukun, V., Dumkum, C., Jaturanonda, C., Widodo, K. H., & Sutiarmo, L., (2020). Capacitated Vehicle Routing Problem under Quality Constraint for Perishable Product, IEEE. *In 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. 878-882.
- Jafari Nozar, F., & Behnamian, J., (2020). Hyper-heuristic for integrated due-window scheduling and vehicle routing problem for perishable products considering production quality. *Engineering Optimization*, Vol. 53, 1-20.
- Kitjacharoenchai, P., Min, B. C., & Lee, S., (2020). Two echelon vehicle routing problem with drones in last mile delivery. *International Journal of Production Economics*, Vol. 225, 107598.

# Sustainable Multi-Objective Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery for Perishable Products

*Reza Shokri Busjin, Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch,  
Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Hamidreza Kia, Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch,  
Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: hr\_kia@azad.ac.com*

Received: November 2024- Accepted: February 2025

## ABSTRACT

Today, there are many social and environmental pressures to limit the emission of greenhouse gases, especially in the transportation sector. This paper investigates the two-echelon capacitated vehicle routing problem considering the simultaneous pickup and delivery approach. A multi-objective model is developed in order to minimize costs, environmental damage factors, and travel time balance of the transportation fleet to achieve sustainability. To solve this problem, two meta-heuristic algorithms including NSGA II and MOPSO were proposed. To evaluate the performance of the two proposed meta-heuristic algorithms, 15 instance problems were randomly generated. The results of the sample problems were compared in 8 indicators, such as the average of the first to third objective functions, the Number of Pareto Front (NFP), the Maximum Spread Index (MSI), the Spacing Metric (SM), the Mean Ideal Distance (MID), and the CPU run-time (CPU-time) values. The results showed that the NSGA II algorithm has achieved better results than the MOPSO algorithm in the Number of Pareto Front (NFP), the Maximum Spread Index (MSI) and the Spacing Metric (SM). While the MOPSO algorithm has been more efficient than the NSGA II algorithm in achieving the averages of the first to third objective functions, the Mean Ideal Distance (MID) and the CPU run-time (CPU-time). Finally, the MOPSO algorithm has chosen as the best solution method by using the TOPSIS method and obtaining a weight of 0.7061. This article can help managers to benefit by reducing operating costs, reducing harmful environmental effects and the need to pay attention to social criteria in order to gain a competitive advantage throughout the logistics network.

**Keywords:** Two-Echelon Vehicle Routing Problem, Simultaneous Pickup and Delivery, Sustainability, Meta-Heuristic Algorithms