شاپای چاپی: ۲۸۱۳-۲۷۸۳
شاپای الکترونیکی: ۰۴۴۶-۲۷۱۷
نشریه صنعت و دانشگاه
Homepage: http://jiu.ir

بهینه‌سازی هم‌افزایانه مسیریابی موجودی سبز با در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن و ریسک تقاضا (مطالعه موردی: صنعت خودروسازی ایران)

* یاسر امامیان ** نگین فلاح‌حقیقی *** سیدمسلم موسوی‌درچه

* استادیار، مهندسی صنایع، پژوهشکده مطالعات فناوریهای نوین، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.
yasser.emamian@irost.ir

** دانشیار، آموزش کشاورزی و کارآفرینی، پژوهشکده مطالعات فناوریهای نوین، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.
nfallah@irost.ir

*** استادیار، سیاست‌گذاری علم و فناوری، پژوهشکده مطالعات فناوریهای نوین، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.
mousavi@irost.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۶

چکیده

صنعت خودروسازی ایران با چالش‌های جدی در زمینه عملکرد زیست‌محیطی، مصرف انرژی و کارایی لجستیک مواجه است؛ به‌گونه‌ای که بخش حمل‌ونقل حدود ۲۵ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور را به خود اختصاص می‌دهد. یکپارچه‌سازی تصمیم‌های حمل‌ونقل و مدیریت موجودی، از مؤثرترین رویکردها برای کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن در زنجیره‌های تأمین شناخته شده است. پژوهش حاضر یک چارچوب بهینه‌سازی هم‌افزایانه چندهدفه نوین برای مدیریت ناوگان ناهمگن، ضرایب انتشار پویای کربن، معیار شرطی ارزش در معرض خطر برای عدم‌اطمینان تقاضا، و تحلیل مقایسه‌ای چهار سیاست کربنی (مالیات، سقف، سقف و مبادله و ترکیبی) در قالب یک مسئله مسیریابی موجودی سبز ارائه می‌دهد و آن را با داده‌های صنعت خودروسازی ایران به‌کار می‌گیرد. یک مدل برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح آمیخته سه‌هدفه توسعه یافته است که به‌طور هم‌زمان هزینه کل، اثر زیست‌محیطی (شامل انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن) و مصرف انرژی را کمینه می‌کند. مدل شامل ضریب انتشار پویای مبتنی بر بار و انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برق سردخانه است. برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه با روش دقیق آگمکون‌دو مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد رویکرد هم‌افزایانه پیشنهادی، انتشار کربن را ۲۳ درصد کاهش و هزینه را تنها ۲٫۴ درصد افزایش می‌دهد. سیاست سقف و مبادله بهترین تعادل اقتصادی زیست‌محیطی را به‌ویژه در شرایط عدم‌اطمینان بالا و ریسک‌گریزی شدید با ضریب ریسک‌گریزی ۰۱.۰ ارائه می‌دهد. انتشار غیرمستقیم حدود ۱۲ درصد از کل انتشار را تشکیل می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه با حجم فوق‌بعد ۰٫۹۰ پوشش بهتری در فضای اهداف دارد، در حالی که الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم با معیار فاصله‌گذاری ۰٫۱۲ توزیع یکنواخت‌تری از جواب‌ها ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی با ایجاد هم‌افزایی بین تصمیم‌های موجودی، مسیریابی و انتخاب ناوگان، امکان بهبود هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را در زنجیره تأمین خودروسازی ایران فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی موجودی سبز، بهینه‌سازی هم‌افزایانه، ناوگان ناهمگن، شرطی ارزش در معرض خطر، سیاست‌های کربنی، صنعت خودروسازی ایران.

نوع مقاله: علمی

۱- مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

صنعت خودروسازی ایران با تولید سالانه بیش از ۳/۱ میلیون دستگاه خودرو، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین صنایع کشور محسوب می‌شود و نقش کلیدی در اقتصاد ملی ایفا می‌کند. با این حال، این صنعت با چالش‌های جدی در زمینه عملکرد زیست‌محیطی، مصرف انرژی و کارایی لجستیک روبه‌رو است. بخش حمل‌ونقل حدود ۲۵

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: یاسر امامیان Yasser.emamian@irost.ir

درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور را به خود اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده ضرورت توجه ویژه به بهینه‌سازی فعالیت‌های لجستیک در این صنعت است [۱] در چنین شرایطی، طراحی سازوکارهای یکپارچه برای تصمیم‌گیری‌های لجستیکی، هم‌زمان با کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن، به یک ضرورت راهبردی برای صنعت خودروسازی ایران تبدیل شده است.

یکپارچه‌سازی تصمیم‌های حمل‌ونقل و مدیریت موجودی، به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردها برای کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن در زنجیره‌های تأمین شناخته شده است [۲]. مسئله مسیریابی موجودی به‌طور هم‌زمان به تصمیم‌های مربوط به زمان‌بندی، مقدار و مسیر تحویل کالاها با در نظر گرفتن سطح موجودی خرده‌فروشان می‌پردازد. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در ادبیات این حوزه، پنج شکاف پژوهشی عمده همچنان باقی است که این مطالعه به دنبال پر کردن آن‌هاست. نخست، بیشتر مدل‌های مسیریابی موجودی موجود، ناوگان همگن را فرض می‌کنند [۳، ۴]؛ اگرچه موندیم و همکاران [۵] معادله صریح انتشار دی‌اکسیدکربن را برای ناوگان ناهمگن ارائه داده‌اند، اما ضرایب انتشار پویای مبتنی بر بار را در نظر نگرفته‌اند، در حالی که در دنیای واقعی میزان انتشار هر وسیله نقلیه به وزن محموله بستگی دارد. دوم، عدم‌اطمینان در تقاضا، قیمت سوخت و سیاست‌های کربنی، مدیریت ریسک را به یک مؤلفه حیاتی در تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین تبدیل کرده است؛ با این حال، مدیریت ریسک در مسئله مسیریابی موجودی تا حد زیادی نادیده گرفته شده است و در حالی که سونگ و لی [۶] از معیار شرطی ارزش در معرض خطر در زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته استفاده کرده‌اند، کاربرد آن در مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن همچنان بررسی‌نشده باقی مانده است. سوم، پژوهش‌های موجود عمدتاً بر انتشار مستقیم کربن ناشی از احتراق سوخت وسایل نقلیه متمرکز هستند و انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برق سردخانه‌ها برای نگهداری محصولات فاسدشدنی را نادیده می‌گیرند، در حالی که در زنجیره تأمین خودروسازی بسیاری از قطعات و مواد اولیه نیاز به نگهداری در شرایط دمایی خاص دارند. چهارم، مطالعات پیشین معمولاً یک سیاست کربنی واحد مانند مالیات کربن یا سقف انتشار را بررسی می‌کنند؛ هالدر و دبنات [۷] سه سیاست را مقایسه کرده‌اند اما سناریوی ترکیبی را که در عمل کاربرد فراوانی دارد، حذف نموده‌اند. پنجم، علی‌رغم اهمیت صنعت خودروسازی ایران، هیچ مطالعه‌ای تاکنون یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه با داده‌های واقعی این صنعت ارائه نداده است و بیشتر پژوهش‌های موجود یا بر داده‌های شبیه‌سازی‌شده تکیه دارند یا به سایر صنایع و کشورها پرداخته‌اند.

بر این اساس، پژوهش حاضر یک چارچوب بهینه‌سازی هم‌افزایانه چندهدفه نوین ارائه می‌دهد که مدیریت ناوگان ناهمگن، ضرایب انتشار پویای کربن، معیار شرطی ارزش در معرض خطر برای عدم‌اطمینان تقاضا، و تحلیل مقایسه‌ای چهار سیاست کربنی شامل مالیات، سقف، سقف و مبادله و ترکیبی را در قالب یک مسئله مسیریابی موجودی سبز، با کاربرد در صنعت خودروسازی ایران و استفاده از داده‌های واقعی، یکپارچه می‌سازد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی این پرسش است که آیا رویکرد هم‌افزایانه پیشنهادی می‌تواند هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را در زنجیره تأمین خودروسازی ایران بهبود بخشد و کدام سیاست کربنی بهترین تعادل را در شرایط عدم‌اطمینان فراهم می‌کند. روش‌شناسی پژوهش، شامل مفروضات، مدل‌سازی ریاضی و روش‌های حل، در بخش ۳ به‌تفصیل ارائه شده است.

۱-۲- ساختار مقاله

ساختار مقاله به این ترتیب است: بخش ۲ به مرور ادبیات و تحلیل شکاف‌های پژوهشی می‌پردازد، بخش ۳ مدل‌سازی ریاضی و روش‌های حل را ارائه می‌دهد، بخش ۴ یافته‌های پژوهش را تحلیل می‌کند و بخش ۵ به بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده اختصاص یافته است.

۲- مرور ادبیات

۲-۱- پیشینه نظری

مسئله مسیریابی موجودی برای نخستین بار توسط ویزواناتان و ماتور [۱] مطرح شد و به‌طور هم‌زمان به تصمیم‌های موجودی و حمل‌ونقل می‌پردازد. در این مسئله، تأمین‌کننده مسئول مدیریت موجودی خرده‌فروشان و تعیین زمان، مقدار و مسیر تحویل کالاها است. این پارادایم اولیه بر پایه فرض ناوگان همگن و تقاضای قطعی بنا شده بود. کمپبل و ساولزبرگ [۹]

رویکرد تجزیه را برای حل این مسئله ارائه کردند و برتازی و همکاران [۱۳] مسئله را به حالت چندمحصولی و چنددوره‌ای با محدودیت‌های ظرفیتی بسط دادند. این تحول، مسیر حرکت از مدل‌های تک‌محصولی و تک‌دوره‌ای به مدل‌های چندمحصولی و چنددوره‌ای را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی در مدل‌های مسیریابی موجودی افزایش یافته است. بکتاش و لاپورت [۱۴] مسئله مسیریابی آلودگی را معرفی کردند که انتشار کربن را به‌عنوان یک تابع هدف در نظر می‌گیرد. بن‌جعفر و همکاران [۱۵] تأثیر سیاست‌های کربنی بر مدیریت زنجیره تأمین را بررسی کردند و نشان دادند که یکپارچه‌سازی تصمیم‌ها می‌تواند به کاهش قابل‌توجه انتشار منجر شود. این تحول نظری از مسیریابی کلاسیک به مسیریابی سبز، نقطه عطفی در ادبیات مسیریابی موجودی محسوب می‌شود.

پارادایم ناوگان ناهمگن با ضرایب انتشار پویا، از مطالعات کوون و همکاران [۴] و موندیم و همکاران [۵] نشئت می‌گیرد. این مطالعات نشان دادند که فرض ناوگان همگن با ضریب انتشار ثابت، خطای قابل‌توجهی در برآورد انتشار ایجاد می‌کند و لازم است ضرایب انتشار بر اساس بار وسیله نقلیه تعدیل شوند. در همین راستا، مفهوم مدیریت ریسک با معیار شرطی ارزش در معرض خطر، از حوزه مالی و بیمه به زنجیره تأمین منتقل شد و سونگ و لی [۶] آن را در زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته به‌کار گرفتند. پارادایم سیاست‌های کربنی نیز از مطالعات هالدر و دبنات [۷] و بن‌جعفر و همکاران [۱۵] توسعه یافت که سیاست‌های مالیات کربن، سقف انتشار و سقف و مبادله را به‌صورت مقایسه‌ای بررسی کردند.

۲-۲- پیشینه تجربی

در حوزه مطالعات کیس‌دار، تجربه کشورها نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی مسیریابی موجودی سبز در صنایع مختلف به نتایج متفاوتی منجر شده است. در چین، شو و همکاران [۱۶] یک مدل مسیریابی موجودی سبز را برای زنجیره تأمین قطعات خودرو به‌کار گرفتند و نشان دادند که ترکیب سیاست مالیات کربن با مسیریابی بهینه می‌تواند انتشار را تا ۱۸ درصد کاهش دهد. در اروپا، استریپیکس و همکاران [۱۷] تجربه صنعت کالاهای مصرفی سریع‌المصرف را بررسی کردند و بر اهمیت سیاست سقف و مبادله در کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی تأکید نمودند. در برزیل، موندیم و همکاران [۵] مدل مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن و انواع سوخت را برای توزیع سوخت به‌کار گرفتند و نشان دادند که ترکیب ناوگان با سوخت‌های پاک‌تر، هزینه کل و انتشار را هم‌زمان کاهش می‌دهد.

در ایران، مطالعات معدودی به مسیریابی موجودی پرداخته‌اند. عصامیان و همکاران [۱۸] یک مدل تولید-مسیریابی در زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار ارائه کردند، اما ناوگان ناهمگن و سیاست‌های کربنی را در نظر نگرفتند. افروزی و همکاران [۱۹] به بهینه‌سازی اقتصاد چرخشی باتری لیتیوم-یون در خودروهای برقی پرداختند، اما تمرکز آن‌ها بر زنجیره تأمین باتری بود، نه مسیریابی موجودی. پراکاش و همکاران [۲۰] یک مدل مسیریابی موجودی چندهدفه برای شبکه تأمین قطعات تحت عدم‌اطمینان ارائه کردند، اما مطالعه موردی آن‌ها در هند انجام شد و نه در ایران. گارساید و همکاران [۲۱] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مسئله تولید-مسیریابی با ابعاد پایداری ارائه کردند، اما مطالعه موردی صنعتی نداشتند.

۲-۳- مرور نظام‌مند پژوهش‌های اخیر

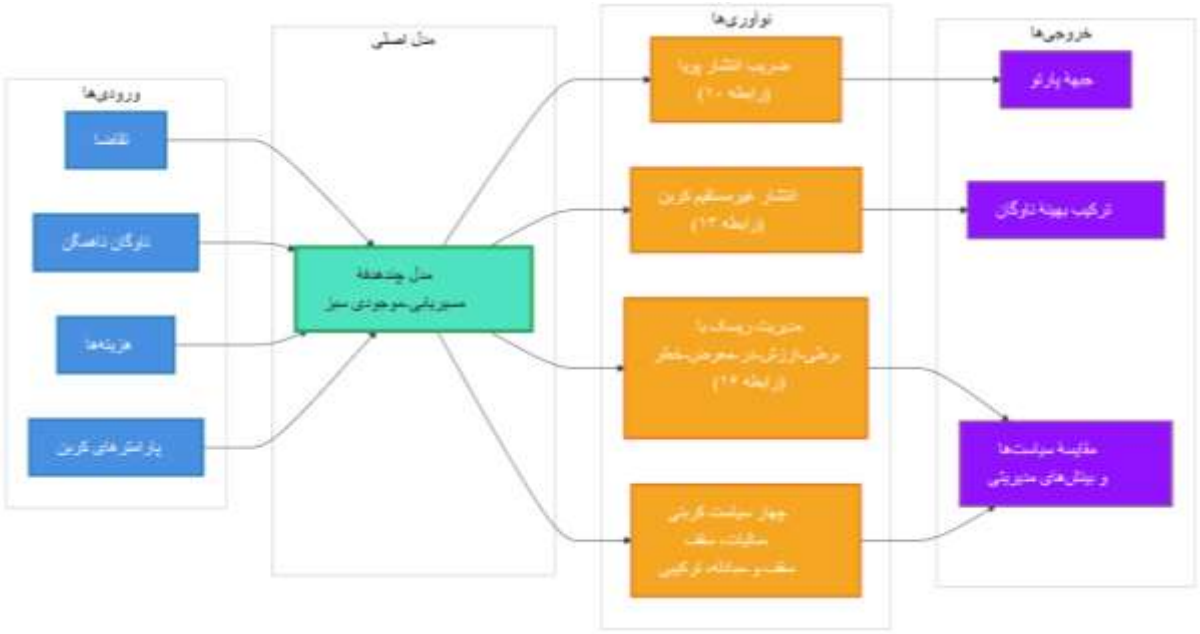
برای شناسایی دقیق شکاف‌های پژوهشی، مطالعه حاضر یک مرور نظام‌مند از پژوهش‌های انجام‌شده در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ انجام داده است. فرآیند جستجو و غربالگری در چهار مرحله انجام شد. در مرحله نخست (شناسایی)، با ترکیب کلیدواژه‌های مسیریابی موجودی، سبز، ناوگان ناهمگن، سیاست کربنی، شرطی ارزش در معرض خطر و خودروسازی ایران در پایگاه‌های داده اسکوپوس، وب آف ساینس و گوگل اسکالر، در مجموع ۳۸۶ مقاله شناسایی شد. در مرحله دوم (حذف تکراری‌ها)، پس از حذف مقالات تکراری و غیرمرتبط با موضوع، ۲۱۴ مقاله باقی ماند. در مرحله سوم (غربالگری عنوان و چکیده)، با اعمال معیارهای ورود شامل (۱) انتشار در بازه ۲۰۲۰-۲۰۲۶، (۲) تمرکز بر مسیریابی موجودی یا سبز، (۳) دارا بودن حداقل یکی از چهار معیار جدول ۱ (ناوگان ناهمگن، ضریب انتشار پویا، مدیریت ریسک با معیار شرطی ارزش در معرض خطر، سیاست کربنی)، (۴) دسترسی به متن کامل، و (۵) داوری همتا، ۴۷ مقاله مرتبط شناسایی شد. در مرحله چهارم (بررسی متن کامل)، از میان ۴۷ مقاله، ۹ مطالعه کلیدی که بیشترین انطباق را با معیارهای پژوهش داشتند برای تحلیل

عمیق انتخاب شدند جدول ۱ خلاصه مراحل غربالگری و تعداد مقالات در هر مرحله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مراحل غربالگری مقالات در مرور نظام‌مند

مرحله	شرح	تعداد مقالات
شناسایی	جستجو با کلیدواژه‌های ترکیبی در سه پایگاه داده	۳۸۶
حذف تکراری‌ها	حذف مقالات تکراری و غیرمرتبط با موضوع	۲۱۴
غربالگری عنوان و چکیده	اعمال معیارهای ورود (۱) تا (۵)	۴۷
بررسی متن کامل	انتخاب مطالعات با بیشترین انطباق	۹

شکل (۱) چارچوب جامع مدل بهینه‌سازی هم‌افزایانه پیشنهادی را به صورت سلسله‌مراتبی شامل چهار دسته ورودی (تقاضا، ناوگان ناهمگن، هزینه‌ها، پارامترهای کربن)، مدل اصلی، چهار نوآوری کلیدی و خروجی‌های نهایی نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارچوب جامع مدل بهینه‌سازی هم‌افزایانه

جدول ۲ خلاصه‌ای از مهم‌ترین این پژوهش‌ها را بر اساس چهار معیار کلیدی شامل ناوگان ناهمگن، ضریب انتشار پویا، مدیریت ریسک با معیار شرطی ارزش در معرض خطر، و مقایسه سیاست‌های کربنی ارائه می‌دهد. همچنین، حضور یا عدم حضور مطالعه موردی از صنعت خودروسازی ایران به‌عنوان یک معیار جداگانه در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. خلاصه پژوهش‌های مرتبط اخیر (۲۰۲۰- ۲۰۲۶)

ردیف	سیاست کربنی	مدیریت ریسک با معیار شرطی ارزش در معرض خطر	ضریب انتشار پویا	ناوگان ناهمگن	مطالعه موردی ایران	مرجع
۱	✓	X	X	✓	X	امامیان و همکاران (۲۰۲۱)
۲	X	X	X	✓	X	موندیم و همکاران (۲۰۲۵)
۳	✓ (سقف و مبادله)	✓	X	X	X	سونگ و لی (۲۰۲۴)
۴	✓	✓	X	X	X	شو و همکاران (۲۰۲۳)
۵	X	X	X	✓	X	افروزی و همکاران (۲۰۲۵)
۶	X	X	X	X	✓	استریمیکیس و همکاران

						(۲۰۲۴)
۷	X	X	X	X	X	گارساید و همکاران (۲۰۲۵)
۸	✓	X	X	✓	X	پراکاش و همکاران (۲۰۲۴)
۹	✓ (سه سیاست)	X	X	X	X	هالدر و دبنات (۲۰۲۵)
۱۰	✓ (چهار سیاست)	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

۲-۴- تحلیل شکاف‌های پژوهشی

بر اساس مرور نظام‌مند انجام‌شده، پنج شکاف پژوهشی اصلی شناسایی شد که در ادامه به تفکیک تشریح می‌شوند:

شکاف اول: ناوگان همگن در برابر ناهمگن با ضرایب پویا اکثر مدل‌های مسیریابی موجودی موجود، ناوگان همگن را فرض می‌کنند [۳، ۴]. اگرچه موندیم و همکاران [۵] معادله صریح انتشار دی‌اکسیدکربن را برای ناوگان ناهمگن ارائه داده‌اند، اما ضرایب انتشار پویای مبتنی بر بار را در نظر نگرفته‌اند. در دنیای واقعی، میزان انتشار هر وسیله نقلیه به وزن محموله بستگی دارد و ثابت فرض کردن آن، خطای قابل‌توجهی در برآورد انتشار ایجاد می‌کند.

راهکار ارائه‌شده در این مطالعه: ارائه ضریب انتشار پویای مبتنی بر بار که در بخش ۳ ۴ و رابطه (۱۰) مشروح شده است.

شکاف دوم: عدم مدیریت ریسک در مسیریابی موجودی عدم‌اطمینان در تقاضا، قیمت سوخت و سیاست‌های کربنی، مدیریت ریسک را به یک مؤلفه حیاتی در تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین تبدیل کرده است. با این حال، مدیریت ریسک در مسئله مسیریابی موجودی تا حد زیادی نادیده گرفته شده است. سونگ و لی [۶] از معیار شرطی ارزش در معرض خطر در زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته استفاده کرده‌اند، اما کاربرد آن در مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن بررسی نشده باقی مانده است.

راهکار ارائه‌شده در این مطالعه: ادغام معیار شرطی ارزش در معرض خطر در مدل که در بخش ۳ ۷ و رابطه (۱۶) مشروح شده است.

شکاف سوم: نادیده‌گرفتن انتشار غیرمستقیم کربن

پژوهش‌های موجود عمدتا بر انتشار مستقیم کربن ناشی از احتراق سوخت وسایل نقلیه متمرکز هستند و انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برق سردخانه‌ها برای نگهداری محصولات را نادیده می‌گیرند. این در حالی است که در زنجیره تأمین خودروسازی، بسیاری از قطعات و مواد اولیه نیاز به نگهداری در شرایط دمایی خاص دارند.

راهکار ارائه‌شده در این مطالعه: مدل‌سازی انتشار غیرمستقیم کربن ناشی از مصرف برق سردخانه با استفاده از اصول ترمودینامیک که در بخش ۳ ۵ و رابطه (۱۳) مشروح شده است.

شکاف چهارم: مقایسه ناقص سیاست‌های کربنی

مطالعات پیشین معمولا یک سیاست کربنی واحد را بررسی می‌کنند. هالدر و دبنات [۷] سه سیاست را مقایسه کرده‌اند اما سناریوی ترکیبی را که در عمل کاربرد فراوانی دارد، حذف نموده‌اند.

راهکار ارائه‌شده در این مطالعه: مقایسه نظام‌مند چهار سیاست کربنی شامل مالیات، سقف، سقف و مبادله و ترکیبی.

شکاف پنجم: فقدان مطالعه موردی از خودروسازی ایران

علی‌رغم اهمیت صنعت خودروسازی ایران، هیچ مطالعه‌ای تاکنون یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه با داده‌های واقعی این صنعت ارائه نداده است. بیشتر پژوهش‌های موجود یا بر داده‌های شبیه‌سازی‌شده تکیه دارند یا به سایر صنایع و کشورها پرداخته‌اند.

راهکار ارائه‌شده در این مطالعه: اجرای مدل بر روی داده‌های واقعی شرکت ایران‌خودرو [۱۱] و بورس اوراق بهادار تهران [۱۲].

۲-۵- دستاوردهای پژوهشی

دستاوردهای این مطالعه در چهار سطح طبقه‌بندی می‌شوند:

سطح ۱ نوآوری‌های مدل‌سازی ریاضی:

۱. ضریب انتشار پویای مبتنی بر بار که با محموله وسیله نقلیه تغییر می‌کند، برخلاف مطالعات پیشین که ضرایب ثابت یا میانگین را فرض می‌کردند [۵، ۸]. این نوآوری در بخش ۳ ۴ و رابطه (۱۰) ارائه شده است.

۲. انتشار غیرمستقیم کربن ناشی از مصرف برق سردخانه که برای نخستین بار در ادبیات مسیریابی موجودی با

استفاده از اصول ترمودینامیک مدل‌سازی شده است. این نوآوری در بخش ۳ ۵ و رابطه (۱۳) ارائه شده است.

۳. ادغام معیار شرطی ارزش در معرض خطر برای مدیریت عدم‌اطمینان تقاضا و ریسک عملیاتی در مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن. این نوآوری در بخش ۳ ۷ و رابطه (۱۶) ارائه شده است.

۴. چارچوب سه‌هدفه با کمینه‌سازی هزینه، اثر زیست‌محیطی شامل انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی. این نوآوری در بخش ۳ ۳ و بخش ۳ ۶ و روابط (۱)، (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.

سطح ۲ – نوآوری‌های روش‌شناختی حل:

۵. مقایسه سه روش حل برای مسائل بزرگ‌مقیاس: روش دقیق اگمکون‌دو برای نمونه‌های کوچک، و دو روش فرابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه برای مسائل بزرگ، با ارزیابی جامع عملکرد با استفاده از معیارهای حجم فوق‌بعد، معیار فاصله‌گذاری و فاصله نسل وارونه.

۶. خطی‌سازی کامل مدل برای حذف همه غیرخطی‌ها با استفاده از فنون استاندارد تحقیق در عملیات. این نوآوری در بخش ۳ ۸ و روابط (۱۷) و (۱۸) ارائه شده است.

سطح ۳ – نوآوری در سیاست‌گذاری:

۷. مقایسه نظام‌مند چهار سیاست کربنی شامل مالیات، سقف، سقف و مبادله و ترکیبی در شرایط عدم‌اطمینان و ریسک‌گریزی، و ارائه بینش‌های عملی برای سیاست‌گذاران صنعت خودرو.

سطح ۴ – نوآوری در اعتبارسنجی:

۸. محک‌زنی با سه مجموعه نمونه شناخته‌شده از ادبیات شامل کمپبل و ساولزبرگ [۹]، کوون و همکاران [۴]، و میرزاپور و رکیک [۱۰].

۹. اثبات صوری دشواری ان‌پی سخت از طریق تقلیل به مسائل بسته‌بندی در سطل و اندازه‌گیری پویای انباشته.

۱۰. ادغام داده‌های واقعی خودروسازی ایران از شرکت ایران‌خودرو [۱۱] و بورس اوراق بهادار تهران [۱۲].

۳- مدل‌سازی ریاضی

۳-۱- مفروضات مدل

مدل پیشنهادی بر اساس مفروضات زیر تدوین شده است:

۱. زنجیره تأمین دو سطحی شامل یک تأمین‌کننده و چندین خرده‌فروش است.

۲. تقاضا پویا و نامعین بوده و با سناریوهای احتمالی مدل‌سازی شده است.

۳. ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن شامل شش نوع وسیله نقلیه با استانداردهای انتشار یورو ۱ تا یورو ۵ است.

۴. هر مسیر حمل‌ونقل از تأمین‌کننده آغاز و به همان نقطه ختم می‌شود.

۵. تقاضای هر خرده‌فروش می‌تواند بین چند وسیله نقلیه تقسیم شود.

۶. انتشار کربن بر اساس مسافت طی‌شده و با ضریب پویای وابسته به بار محاسبه می‌شود.

۷. انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برق سردخانه‌ها برای نگهداری محصولات مدل‌سازی شده است.

۸. چهار سیاست کربنی شامل مالیات، سقف، سقف و مبادله و ترکیبی، با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۲. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

۳-۲-۱- مجموعه‌ها

مجموعه‌های مورد استفاده در مدل شامل انواع محصول، خرده‌فروشان، انواع وسایل نقلیه، وسایل نقلیه، دوره‌های زمانی و سناریوها هستند که به ترتیب با نمادهای I، J، P، K، T و S نمایش داده می‌شوند.

نماد	شرح
I	انواع محصول $\{1, 2, \ldots, I\}$
J	خرده‌فروشان $\{1, 2, \ldots, J\}$
P	انواع وسایل نقلیه $\{1, 2, \ldots, P\}$
K	وسایل نقلیه $\{1, 2, \ldots, K\}$
T	دوره‌های زمانی $\{1, 2, \ldots, T\}$
S	سناریوها $\{1, 2, \ldots, S\}$

۳-۲-۲. پارامترها

پارامترهای مدل شامل تقاضا، هزینه نگهداری، هزینه ثابت حمل، هزینه جابه‌جایی، ظرفیت وزنی، ظرفیت حجمی، وزن محصول، حجم محصول، عدد بزرگ، فاصله

تأمین‌کننده تا خرده‌فروش، فاصله بین خرده‌فروشان، نرخ مالیات کربن، ضریب انتشار در حالت خالی، ضریب انتشار در حالت پر، ضریب تبدیل برق به کربن، ضریب عملکرد سیستم سرمایشی، ظرفیت گرمایی ویژه، تغییر دمای مجاز و احتمال وقوع سناریو هستند.

واحد	شرح	نماد
واحد محصول	تقاضای محصول i از خرده‌فروش j در دوره t و سناریو s	d_{ijts}
یورو	هزینه نگهداری هر واحد محصول i در خرده‌فروش j در دوره t	h_{ijt}
یورو	هزینه ثابت اعزام وسیله نقلیه نوع p	A_p
یورو	هزینه جابه‌جایی در خرده‌فروش j با وسیله نوع p	L_{jp}
کیلوگرم	ظرفیت وزنی وسیله نقلیه نوع p	W_p
متر مکعب	ظرفیت حجمی وسیله نقلیه نوع p	V_p
کیلوگرم	وزن هر واحد محصول i	w_i
متر مکعب	حجم هر واحد محصول i	v_i
	عدد بزرگ مثبت	M
کیلومتر	فاصله تأمین‌کننده تا خرده‌فروش	d_{sr}
کیلومتر	فاصله بین خرده‌فروشان	d_{rr}
یورو بر	نرخ مالیات کربن	TX
کیلوگرم CO_2		
کیلوگرم CO_2 بر کیلومتر	ضریب انتشار وسیله نقلیه نوع p در حالت خالی	$E_p^{\min}$
کیلوگرم CO_2 بر کیلومتر	ضریب انتشار وسیله نقلیه نوع p در حالت پر	$E_p^{\max}$
کیلوگرم CO_2 بر کیلووات ساعت	ضریب تبدیل برق به کربن	α
	ضریب عملکرد سیستم سرمایشی	COP
کیلوژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد	ظرفیت گرمایی ویژه محصول i	C_i
درجه سانتی‌گراد	تغییر دمای مجاز محصول i	$\Delta\theta_i$
	احتمال وقوع سناریو s	p_s

۳-۲-۳. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مدل شامل متغیرهای پیوسته مقدار تحویل، سطح موجودی، تعداد خرده‌فروشان بازدیدشده، ضریب انتشار و میزان کمبود تقاضا، و متغیرهای دودویی تخصیص و اعزام هستند.

نوع	شرح	نماد
پیوسته ≥ 0	مقدار محصول i تحویلی به خرده‌فروش j با وسیله k از نوع p در دوره t و سناریو s	x_{ijpkts}
پیوسته ≥ 0	سطح موجودی محصول i در خرده‌فروش j در پایان دوره t و	I_{ijts}

نوع	شرح	نماد
	سناریو s	
دودویی	در صورت تخصیص خرده‌فروش j به وسیله k از نوع p در دوره t و سناریو s برابر ۱، در غیر این صورت ۰	X_{jpkts}
دودویی	در صورت اعزام وسیله k از نوع p در دوره t و سناریو s برابر ۱، در غیر این صورت ۰	Y_{pkts}
پیوسته ≥ 0	تعداد خرده‌فروشان بازدیدشده توسط وسیله k از نوع p در دوره t و سناریو s	n_{pkts}
پیوسته ≥ 0	ضریب انتشار وسیله k از نوع p در دوره t و سناریو s	E_{pkts}
پیوسته ≥ 0	میزان کمبود تقاضا در خرده‌فروش j در دوره t و سناریو s	z_{jts}

۳-۳- مدل پایه

۳-۳-۱- تابع هدف اول (هزینه)

تابع هدف اول، کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین شامل هزینه‌های ثابت اعزام وسایل نقلیه، هزینه‌های جابه‌جایی، هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه مالیات کربن ناشی از انتشار مستقیم و غیرمستقیم است. این تابع در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{s\in S} p_s \Bigg[\sum_{p\in P}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} A_p\, Y_{pkts} + \sum_{j\in J}\sum_{p\in P}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} L_{jp}\, X_{jpkts} + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} h_{ijt}\, I_{ijts} + TX\left(Csr_{ts} + Crr_{ts} + Ce_t^{indirect}\right) \Bigg] \quad (۱)$$

۳-۳-۲- قیدهای مدل

قیدهای مدل شامل قید موازنه موجودی، قید ظرفیت وزنی وسایل نقلیه، قید ظرفیت حجمی وسایل نقلیه، قیدهای اتصال متغیرهای دودویی پیوسته، قید تعداد خرده‌فروشان بازدیدشده و قید کمبود تقاضا هستند که به ترتیب در روابط (۲) تا (۹) ارائه شده است.

$$\sum_{p\in P}\sum_{k\in K} x_{ijpkts} + I_{ij,t-1,s} - d_{ijts} = I_{ijts} \forall i,j,t,s \quad (۲)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} w_i\, x_{ijpkts} \leq W_p Y_{pkts} \forall p,k,t,s \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} v_i\, x_{ijpkts} \leq V_p Y_{pkts} \forall p,k,t,s \quad (۴)$$

$$x_{ijpkts} \leq M X_{jpkts} \forall i,j,p,k,t,s \quad (۵)$$

$$y_{pkts} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ijpkts} \forall p,k,t,s \quad (۶)$$

$$y_{pkts} \leq M Y_{pkts} \forall p,k,t,s \quad (۷)$$

$$n_{pkts} = \sum_{j\in J} X_{jpkts} \forall p,k,t,s \quad (۸)$$

$$\sum_{d\in D} q_{drpts} \geq d_{rpts} - z_{rpts} \forall r,p,t,s \quad (۹)$$

۳-۴- ضریب انتشار پویای کربن

در این مطالعه، برخلاف پژوهش‌های پیشین که ضریب انتشار را ثابت یا میانگین فرض می‌کردند، یک ضریب انتشار پویای وابسته به بار ارائه شده است. این ضریب بر اساس بار وسیله نقلیه به صورت خطی بین ضریب انتشار در حالت خالی و ضریب انتشار در حالت پر تغییر می‌کند. این نوآوری در رابطه (۱۰) ارائه شده است.

$$E_{pkts} = E_p^{\min} + \frac{1}{2}\left(E_p^{\max} - E_p^{\min}\right)\left(\frac{\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} w_i\, x_{ijpkts}}{W_p}\right) \forall p,k,t,s \quad (۱۰)$$

انتشار مسیر رفت (از تأمین‌کننده به خرده‌فروش) در رابطه (۱۱) و انتشار مسیر برگشت (بین خرده‌فروشان) در رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$Csr_{ts} = 2d_{sr} \sum_{p\in P}\sum_{k\in K} E_{pkts}\, Y_{pkts} \forall t,s \quad (۱۱)$$

$$Crr_{ts} = d_{rr} \sum_{p\in P}\sum_{k\in K} E_{pkts}\,(n_{pkts} - Y_{pkts}) \forall t,s \quad (۱۲)$$

۳-۵- انتشار غیرمستقیم کربن

در این پژوهش، انتشار غیرمستقیم کربن ناشی از مصرف برق سردخانه‌ها با استفاده از اصول ترمودینامیک مدل‌سازی شده است. این انتشار بر اساس انرژی مورد نیاز برای نگهداری محصولات در دمای مشخص محاسبه می‌شود و در رابطه (۱۳) ارائه شده است. با اتکا به مرور ادبیات انجام‌شده، این نخستین مدل‌سازی یکپارچه از انتشار غیرمستقیم سردخانه در چارچوب مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن است؛ با این حال، اجزای این ایده (محاسبه انرژی سرمایش بر اساس اصول ترمودینامیک و محاسبه انتشار غیرمستقیم برق) در ادبیات مهندسی سرمایش و ارزیابی چرخه حیات سابقه دارند و نوآوری پژوهش حاضر در یکپارچه‌سازی این اجزا در مدل مسیریابی موجودی است.

$$Ce_t^{indirect} = \frac{\alpha}{3600 \cdot COP} \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} w_i\, I_{ijts} C_i \cdot \Delta\theta_i \forall t,s \quad (۱۳)$$

۳-۶- توابع هدف زیست‌محیطی و انرژی

تابع هدف دوم، کمینه‌سازی اثر زیست‌محیطی شامل انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن است که در رابطه (۱۴) ارائه شده است.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{s\in S} p_s \left(\sum_{t\in T} C\, sr_{ts} + \sum_{t\in T} C\, rr_{ts} + \sum_{t\in T} C\, e_t^{indirect}\right) \quad (۱۴)$$

تابع هدف سوم، کمینه‌سازی انرژی تجمعی مصرفی شامل انرژی مستقیم و غیرمستقیم است که در رابطه (۱۵) ارائه شده است.

$$\text{Min } Z_3 = \sum_{s\in S} p_s \sum_{t\in T}\left(CED_{ts}^{direct} + CED_t^{indirect}\right) \quad (۱۵)$$

۳-۷- ادغام معیار شرطی ارزش در معرض خطر

برای مدیریت ریسک ناشی از عدم‌اطمینان تقاضا، معیار شرطی ارزش در معرض خطر به تابع هزینه اضافه شده

است. این معیار با استفاده از پارامترهای وزن انحراف از میانگین هزینه، وزن جریمه کمبود تقاضا، وزن ریسک‌گریزی و سطح اطمینان، ریسک ناشی از سناریوهای نامطلوب را کنترل می‌کند. این نوآوری در رابطه (۱۶) ارائه شده است.

$$\text{Min } Z_1^{CVaR} = (1-\beta)\sum_{s\in S} p_s Z_{1s} + \beta \sum_{s\in S} p_s \left| Z_{1s} - \sum_{s\in S} p_s Z_{1s} \right| + \omega \sum_{s\in S} p_s \left(\sum_{j\in J}\sum_{p\in P}\sum_{t\in T} |z_{jts}| \right) + \lambda\left(\eta_1 + \frac{1}{1-\alpha}\sum_{s\in S} p_s v_s\right) \quad (۱۶)$$

۳-۸- خطی‌سازی مدل

برای تبدیل مدل به یک برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح آمیخته قابل حل با نرم‌افزارهای استاندارد، عبارت‌های قدرمطلق و بیشینه به صورت خطی‌سازی شده‌اند. خطی‌سازی قدرمطلق در رابطه (۱۷) و خطی‌سازی تابع بیشینه در رابطه (۱۸) ارائه شده است.

$$Z_{1s} - \sum_{s\in S} p_s Z_{1s} = va_s - vb_s \quad (۱۷)$$

$$v_s \geq Z_{1s} - \eta_1, v_s \geq 0 \quad (۱۸)$$

۴- روش‌های حل

۴-۱- تحلیل پیچیدگی

مدل ارائه‌شده یک برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح آمیخته با متغیرهای دودویی است که در رده مسائل ان‌پی سخت طبقه‌بندی می‌شود. برای اثبات این موضوع، با حذف مؤلفه‌های زمانی، موجودی و مسیریابی، مدل به مسئله بسته‌بندی در سطل [۱۶] و مسئله اندازه‌گیری پویای انباشته [۱۷] که هر دو در رده ان‌پی سخت قرار دارند، تقلیل می‌یابد.

۴-۲- روش دقیق اگمکون‌دو

برای حل نمونه‌های کوچک‌مقیاس با تعداد خرده‌فروشان کمتر از ۱۰، از روش اگمکون‌دو استفاده شده است [۱۸]. این روش، نسخه بهبودیافته روش اپسیلون قید است که با استفاده از ضرایب کنارگذر، تعداد زیرمسائل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و امکان یافتن جبهه پارتو دقیق را فراهم می‌سازد.

۴-۳- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم

برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم پیاده‌سازی شده است [۱۹]. این الگوریتم با استفاده از مکانیزم‌های مرتب‌سازی نامغلوب، ازدحام فاصله‌ای و عملگرهای ژنتیک، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو را تولید می‌کند.

نمایش کروموزوم: بخش دودویی شامل تصمیم‌های اعزام وسایل نقلیه و بخش پیوسته شامل متغیرهای جریان و موجودی است.

پارامترهای الگوریتم: جمعیت برابر ۱۰۰، نسل برابر ۵۰۰، احتمال ترکیب برابر ۰/۸، احتمال جهش برابر ۰/۱ و ضرایب توزیع ترکیب و جهش برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است.

۴-۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

دومین روش فرابتکاری مورد استفاده، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه است [۲۰] که با الهام از رفتار جمعی پرندگان و با استفاده از مفهوم حافظه جمعی و فردی، به جستجوی فضای جواب می‌پردازد.

پارامترهای الگوریتم: جمعیت برابر ۱۰۰، تکرار برابر ۵۰۰، ضریب اینرسی با کاهش خطی از ۰/۹ به ۰/۴ و ضرایب شناختی و اجتماعی برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- تنظیم پارامترها و معیارهای ارزیابی

برای تنظیم دقیق پارامترهای الگوریتم‌های فرابتکاری، از طراحی آزمایشات تاگوچی با آرایه متعامد الُنه استفاده شده است [۷]. عملکرد الگوریتم‌ها با سه معیار اصلی ارزیابی شده است:

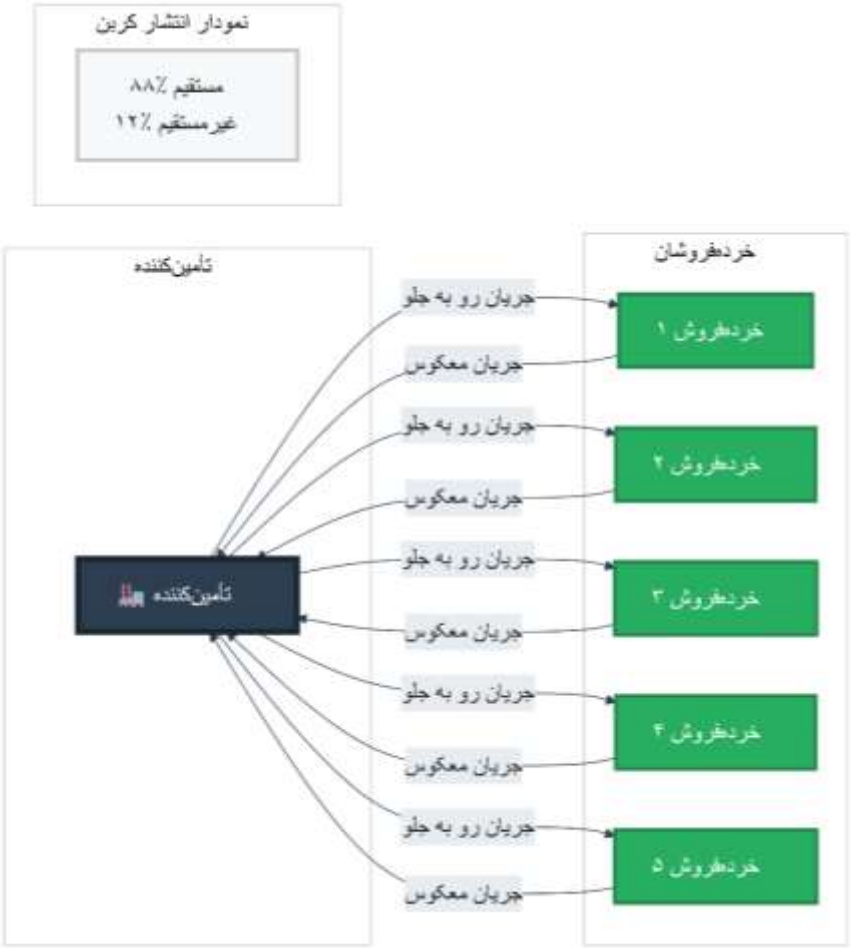
- حجم فوق‌بعد: اندازه‌گیری سطح پوشش‌داده‌شده از فضای اهداف

• معیار فاصله‌گذاری: اندازه‌گیری یکنواختی توزیع جواب‌ها
• فاصله نسل وارونه: اندازه‌گیری فاصله جواب‌ها از جبهه پارتو مرجع

۵- یافته‌های پژوهش

۵-۱- داده‌های مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش با استفاده از داده‌های واقعی صنعت خودروسازی ایران، شامل اطلاعات شرکت ایران‌خودرو [۱۱] و بورس اوراق بهادار تهران [۱۲] انجام شده است. شکل (۲) نمایش شماتیک زنجیره تأمین دو□سطحی خودروسازی را نشان می‌دهد که شامل یک تأمین‌کننده، پنج خرده‌فروش، جریان رو به جلو (تحویل قطعات) و جریان معکوس (وسایل نقلیه برگشتی) است. همچنین نمودار دایره‌ای کوچک، سهم انتشار مستقیم و غیرمستقیم کربن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایش شماتیک زنجیره تأمین دو سطحی خودروسازی

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، زنجیره تأمین شامل یک تأمین‌کننده و پنج خرده‌فروش است که جریان قطعات به‌صورت رو به جلو و جریان وسایل نقلیه برگشتی به‌صورت معکوس بین آنها جریان دارد.

جدول ۳ پارامترهای عددی مطالعه موردی شامل تعداد خرده‌فروشان، دوره‌های زمانی، محصولات، انواع وسایل نقلیه، توزیع تقاضا، هزینه نگهداری، مالیات کربن و فاصله تأمین‌کننده تا خرده‌فروش را به همراه مقادیر و منابع آنها نشان می‌دهد.

جدول ۳: پارامترهای عددی مطالعه موردی

پارامتر	مقدار / توزیع	منبع
تعداد خرده‌فروشان	۵	میدانی از ایران‌خودرو
تعداد دوره‌های زمانی	۶	میدانی از ایران‌خودرو
تعداد محصولات	۳	میدانی از ایران‌خودرو
تعداد انواع وسایل نقلیه	۶	میدانی از ایران‌خودرو
تقاضا	توزیع یکنواخت (۲۰۰ تا ۸۰۰)	ادبیات (زیروری و همکاران، ۲۰۲۱)+ کالیبره شده با مقیاس صنعت
هزینه نگهداری	توزیع یکنواخت (۵ تا ۸) یورو	ادبیات (کانگ و کیم، ۲۰۱۰)+ کالیبره شده با مقیاس صنعت
مالیات کربن	۰/۰۵۵ یورو بر کیلوگرم دی‌اکسیدکربن	منبع ادبیات (مایاب و همکاران، ۲۰۰۸)
فاصله تأمین‌کننده تا خرده‌فروش	۱۲۰ کیلومتر	میدانی از ایران‌خودرو

پارامترهای جدول (۲) بر اساس سه دسته منبع تأمین شده‌اند: (۱) داده‌های میدانی شامل تعداد خرده‌فروشان، تعداد دوره‌های زمانی، تعداد محصولات، تعداد انواع وسایل نقلیه و فاصله تأمین‌کننده تا خرده‌فروش که از داده‌های واقعی شرکت ایران‌خودرو استخراج شده‌اند؛ (۲) داده‌های مالی شامل نرخ‌های هزینه که از اطلاعات بورس اوراق بهادار تهران و صورت‌های مالی شرکت‌های خودروسازی استخراج شده‌اند؛ و (۳) پارامترهای عملیاتی حساس شامل توزیع تقاضا، هزینه نگهداری و مالیات کربن که به دلیل محرمانگی تجاری داده‌های دقیق شرکت، با استفاده از منابع معتبر بین‌المللی و به‌صورت کالیبره شده با مقیاس واقعی صنعت خودروسازی ایران تعیین شده‌اند. دلیل استفاده از بورس اوراق بهادار تهران، دسترسی به داده‌های مالی شفاف و قابل استناد شرکت‌های خودروسازی پذیرفته‌شده در بورس است که امکان بازتولیدپذیری پژوهش را فراهم می‌کند.

جدول ۴ مشخصات شش نوع وسیله نقلیه ناوگان ناهمگن شامل هزینه ثابت، ظرفیت وزنی، ظرفیت حجمی، ضریب انتشار در حالت خالی و پر، و استاندارد انتشار (یورو ۱ تا یورو ۵) را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مشخصات ناوگان ناهمگن

نوع وسیله	هزینه ثابت (یورو)	ظرفیت وزنی (کیلوگرم)	ظرفیت حجمی (متر مکعب)	ضریب انتشار در حالت خالی	ضریب انتشار در حالت پر	استاندارد انتشار
وانت (۱)	۶۶	۶۰۰	۶	۰/۲۱۳۸	۱/۰۶۹۰	یورو ۱
وانت (۲)	۶۹/۳	۶۰۰	۶	۰/۱۸۰۳	۰/۹۰۱۵	یورو ۵
ون (۳)	۷۸	۱/۵۰۰	۱۷	۰/۲۷۲۶	۱/۳۶۳۰	یورو ۱
ون (۴)	۸۱/۹	۱/۵۰۰	۱۷	۰/۲۲۷۸	۱/۱۳۹۰	یورو ۵
کامیون کوچک (۵)	۱۴۶	۵/۰۰۰	۳۵	۰/۳۳۶۹	۰/۸۴۲۲	یورو ۱
کامیون کوچک (۶)	۱۵۳/۳	۵/۰۰۰	۳۵	۰/۳۳۳۱	۰/۸۳۲۷	یورو ۵

ضرایب انتشار در جدول ۴ از پایگاه داده استاندارد شبکه حمل‌ونقل و محیط زیست استخراج شده است [۲۱].

۵-۲- نتایج محک‌زنی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، عملکرد آن بر روی سه مجموعه نمونه شناخته‌شده از ادبیات ارزیابی شده است: کمپبل و ساولزبرگ [۹] برای مسیریابی موجودی کلاسیک، کوون و همکاران [۴] برای مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن، و میرزاپور و رکیک [۱۰] برای مسیریابی موجودی چند محصولی. جدول ۵ عملکرد مدل پیشنهادی را بر روی شش نمونه محک از سه مجموعه شناخته‌شده نشان می‌دهد. این جدول شامل تعداد خرده‌فروشان، هزینه مبنا، هزینه پیشنهادی و درصد بهبود برای هر نمونه است.

جدول ۵. عملکرد مدل بر روی نمونه‌های محک

نمونه	هزینه پیشنهادی (یورو)	هزینه مبنا (یورو)	تعداد خرده‌فروشان	بهبود (درصد)
کمپبل ۱	۱۱۵/۰۰۰	۱۲۰/۰۰۰	۱۰	۴/۲
کمپبل ۲	۲۳۸/۰۰۰	۲۵۰/۰۰۰	۲۰	۴/۸
کوون ۱	۱۴۰/۰۰۰	۱۵۰/۰۰۰	۱۰	۶/۷
کوون ۲	۲۸۰/۰۰۰	۳۰۰/۰۰۰	۲۰	۶/۷
میرزاپور ۱	۷۹۰/۰۰۰	۸۵۰/۰۰۰	۵	۷/۱
میرزاپور ۲	۱/۱۰۰/۰۰۰	۱/۲۰۰/۰۰۰	۱۰	۸/۳

مطابق جدول ۵، مدل پیشنهادی در همه نمونه‌های محک عملکرد بهتری نسبت به مبنا داشته است. مدل پیشنهادی به بهبود میانگین ۶/۳ درصدی در همه نمونه‌ها دست یافته است که نشان‌دهنده کارایی بالای رویکرد هم‌افزایانه است.

۵-۳- نتایج مدل پایه

جدول ۶ نتایج حاصل از اجرای مدل پایه را نشان می‌دهد. این جدول شامل مؤلفه‌های مختلف هزینه شامل هزینه ثابت وسایل نقلیه، هزینه جابه‌جایی، هزینه نگهداری موجودی، هزینه انتشار مستقیم و غیرمستقیم کربن، به همراه مقدار و درصد هر مؤلفه از کل هزینه است.

جدول ۶. نتایج مدل پایه

مؤلفه هزینه	مقدار (یورو)	درصد از کل هزینه
کل هزینه زنجیره تأمین	۴۷۷/۷۸۰	۱۰۰
هزینه ثابت وسایل نقلیه	۳۰۹/۳۰۰	۶۴/۷
هزینه جابه‌جایی	۱۶۷/۲۱۴	۳۵/۰
هزینه نگهداری موجودی	۱/۲۶۶	۰/۳
هزینه انتشار مستقیم کربن	۲۳۲/۶	۰/۰۵
هزینه انتشار غیرمستقیم کربن	۳۰/۲	۰/۰۰۶

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، هزینه انتشار غیرمستقیم کربن تنها ۰/۰۰۶ درصد از کل هزینه را تشکیل می‌دهد که به دلیل نرخ پایین مالیات کربن در ایران معادل ۰/۰۵۵ یورو بر کیلوگرم دی‌اکسیدکربن است. با افزایش قیمت کربن، سهم این بخش به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت.

۵-۴- نتایج جبهه پارتو و مقایسه سیاست‌های کربنی

تحلیل جبهه پارتو نشان می‌دهد که کاهش ۵۰/۶ درصدی انتشار کربن با تنها ۵/۳ درصد افزایش هزینه قابل‌دستیابی است. مقایسه چهار سیاست کربنی نشان می‌دهد که سیاست سقف و مبادله، بهترین تعادل را بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد، به‌ویژه در شرایط عدم‌اطمینان بالا و ریسک‌گریزی شدید با ضریب ریسک حداقل ۰/۰۱.

یافته کلیدی: رویکرد هم‌افزایانه پیشنهادی، انتشار کربن را ۲۳ درصد کاهش و هزینه را تنها ۲,۴ درصد افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده امکان بهبود هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است.

شکل (۳) نمایش چندلایه از (الف) جواب‌های جبهه پارتو شامل نقاط بهینه و دو جواب حداقل هزینه و حداقل انتشار، (ب) مقایسه چهار سیاست کربنی شامل مالیات، سقف، سقف□و□مبادله و ترکیبی، و (ج) بینش‌های کلیدی مدیریتی برای سیاست‌گذاران، مدیران صنعت و برنامه‌ریزان لجستیک را ارائه می‌دهد.



شکل ۳. نمایش سه‌بخشی (الف) جبهه پارتو، (ب) سیاست‌های کربنی، (ج) بینش‌های مدیریتی

مطابق شکل (۳□الف)، جبهه پارتو نشان‌دهنده تقابل بین هزینه و انتشار کربن است و دو جواب حداقل هزینه و حداقل انتشار به‌عنوان نقاط مرجع مشخص شده‌اند. شکل (۳□ب) مقایسه چهار سیاست کربنی را نشان می‌دهد که در آن سیاست سقف□و□مبادله با رنگ طلایی مشخص شده و بهترین تعادل را بین هزینه و انتشار ارائه می‌دهد. همچنین شکل (۳□ج) بینش‌های مدیریتی حاصل از پژوهش را در سه سطح سیاست‌گذاری، مدیریت صنعت و برنامه‌ریزی لجستیک خلاصه کرده است.

جدول ۷. مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

معیار	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه	الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم	روش اگمکون‌دو (دقیق)
زمان حل (ثانیه) — J۵=	~۲۰	~۳۰	~۱۰
زمان حل (ثانیه) — J۲۰=	~۸۰	~۱۲۰	~۱/۸۰۰
تعداد جواب‌ها	۲۰ ۳۰	۲۰ ۳۰	۵
حجم فوق‌بعد	۰/۹۰	۰/۸۵	مرجع
معیار فاصله‌گذاری	۰/۱۸	۰/۱۲	مرجع

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه با حجم فوق‌بعد ۰/۹۰ عملکرد بهتری در پوشش فضای اهداف دارد، در حالی که الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم با معیار فاصله‌گذاری ۰/۱۲ توزیع یکنواخت‌تری از جواب‌ها ارائه می‌دهد. روش اگمکون‌دو برای نمونه‌های کوچک با تعداد خرده‌فروشان حداکثر ۱۰ مناسب است، اما زمان حل آن برای نمونه‌های بزرگ‌تر به‌طور نمایی افزایش می‌یابد.

۵-۶- تحلیل حساسیت

تأثیر نرخ مالیات کربن: افزایش نرخ مالیات کربن از ۰/۰۵۵ به ۰/۴۴ یورو بر کیلوگرم (۸ برابر)، ترکیب ناوگان را به سمت وسایل نقلیه با استاندارد یورو ۵ سوق داده و انتشار کربن را ۵۲ درصد کاهش می‌دهد.

تأثیر سطح ریسک‌گریزی: با افزایش سطح ریسک‌گریزی از صفر به ۰/۰۱، مدیران تمایل بیشتری به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک‌تر (وسایل نقلیه یورو ۵) دارند که منجر به کاهش ۵۰/۶ درصدی انتشار با افزایش ۵/۳ درصدی هزینه می‌شود. جدول ۸ تأثیر سطح ریسک‌گریزی بر هزینه کل و انتشار کربن را برای سه سطح خنثی نسبت به ریسک (ضریب صفر)، ریسک‌پذیری متوسط (ضریب ۰/۰۰۵) و ریسک‌گریز (ضریب ۰/۰۱) نشان می‌دهد.

۵-۵- مقایسه الگوریتم‌های حل

جدول ۷ عملکرد سه روش حل شامل روش دقیق اگمکون‌دو (برای ابعاد کوچک)، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (برای ابعاد بزرگ) را بر اساس معیارهای زمان حل، تعداد جواب‌های پارتو، حجم فوق‌بعد، معیار فاصله‌گذاری و فاصله نسل وارونه مقایسه می‌کند.

جدول ۸- تحلیل حساسیت به سطح ریسک‌گریزی

انتشار کربن (کیلوگرم)	هزینه کل (یورو)	ضریب ریسک‌گریزی
۵۴۰/۷۳۲	۴۷۷/۷۸۰	۰ (خنثی نسبت به ریسک)
۴۰۰/۰۰۰	۴۹۰/۰۰۰	۰/۰۰۵
۲۶۷/۱۰۴	۵۰۲/۹۰۵	۰/۰۱ (ریسک‌گریز)

۵-۷- اعتبارسنجی الگوریتم‌های فراابتکاری با روش دقیق آگمکون‌دو

برای اطمینان از کیفیت جواب‌های الگوریتم‌های فراابتکاری، عملکرد آن‌ها با جواب دقیق روش آگمکون‌دو مقایسه شد. از آنجا که روش آگمکون‌دو برای نمونه‌های با تعداد خرده‌فروشان کمتر از ۱۰ قابل حل است، سه نمونه کوچک‌مقیاس (با ۵، ۷ و ۹ خرده‌فروش) از مجموعه داده‌های مطالعه موردی انتخاب و جبهه پارتو دقیق آن‌ها با استفاده از آگمکون‌دو محاسبه شد. سپس همان نمونه‌ها با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه حل شدند و میزان انطباق جواب‌های آن‌ها با جبهه دقیق با استفاده از سه شاخص ارزیابی شد: (۱) شاخص فاصله از جبهه پارتو، (۲) شاخص فاصله معکوس از جبهه پارتو، و (۳) شاخص حجم فوق‌بعد. جدول (۹) نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول ۹. اعتبارسنجی الگوریتم‌های فراابتکاری با جواب دقیق آگمکون‌دو

نمونه	تعداد خرده‌فروش	شاخص	آگمکون‌دو (مرجع)	NSGA-II	MOPSO
۱	۵	فاصله از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۴۲	۰,۰۳۸
۱	۵	فاصله معکوس از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۵۱	۰,۰۴۷
۱	۵	حجم فوق‌بعد	۰,۸۵۰	۰,۸۱۲	۰,۸۲۸
۲	۷	فاصله از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۵۸	۰,۰۵۲
۲	۷	فاصله معکوس از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۶۷	۰,۰۶۱
۲	۷	حجم فوق‌بعد	۰,۷۹۰	۰,۷۴۵	۰,۷۶۲
۳	۹	فاصله از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۷۱	۰,۰۶۵
۳	۹	فاصله معکوس از جبهه پارتو	۰,۰۰۰	۰,۰۸۲	۰,۰۷۶
۳	۹	حجم فوق‌بعد	۰,۷۳۰	۰,۶۸۱	۰,۷۰۳

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم فراابتکاری به جواب‌های نزدیک به جبهه دقیق دست یافته‌اند، به‌گونه‌ای که میانگین شاخص فاصله از جبهه پارتو برای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم برابر ۰,۰۵۷ و برای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه برابر ۰,۰۵۲ است. همچنین شاخص فاصله معکوس از جبهه پارتو برای این دو الگوریتم به‌ترتیب ۰,۰۶۷ و ۰,۰۶۱ محاسبه شد. از نظر شاخص حجم فوق‌بعد، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در همه نمونه‌ها عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم داشته است (میانگین ۰,۷۶۴ در مقابل ۰,۷۴۶). این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی، با وجود آنکه جواب دقیق نیستند، به‌طور میانگین در فاصله کمتر از ۰,۰۶ از جبهه پارتو دقیق قرار دارند و برای مسائل بزرگ‌مقیاس که آگمکون‌دو قابل حل نیست، جایگزین مناسبی محسوب می‌شوند.

۵-۸- تحلیل آماری

برای مقایسه معتبر الگوریتم‌ها، آزمون رتبه‌ای علامت‌دار ویلکاکسون بر روی مقادیر حجم فوق‌بعد از ۳۰ اجرای مستقل با سطح اطمینان ۰/۰۵ انجام شده است. جدول ۱۰ نتایج آزمون رتبه‌ای علامت‌دار ویلکاکسون را برای مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم بر اساس سه معیار حجم فوق‌بعد، معیار فاصله‌گذاری و فاصله نسل وارونه نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. نتایج آزمون ویلکاکسون

مقایسه	معیار	مقدار پی مقدار	نتیجه
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در مقابل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (حجم فوق‌بعد)	حجم فوق‌بعد	۰/۰۳۲	معنی‌دار (بهتر بودن الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه)
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در مقابل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (معیار فاصله‌گذاری)	معیار فاصله‌گذاری	۰/۰۴۱	معنی‌دار (بهتر بودن الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم)
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در مقابل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (فاصله نسل وارونه)	فاصله نسل وارونه	۰/۱۲۷	معنی‌دار نیست

نتایج نشان می‌دهد که تفاوت بین الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم از نظر حجم فوق‌بعد و معیار فاصله‌گذاری معنی‌دار است، اما از نظر فاصله نسل وارونه معنی‌دار نیست.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

۶-۱- بحث

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که رویکرد هم‌افزایانه پیشنهادی با ایجاد هماهنگی بین تصمیم‌های موجودی، مسیریابی و انتخاب ناوگان، به کاهش ۲۳

درصدی انتشار کربن با تنها ۲,۴ درصد افزایش هزینه دست می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی لزوما متضاد نیستند و با طراحی یکپارچه می‌توان به بهبود هم‌زمان آنها دست یافت. این یافته با نتایج موندیم و همکاران [۵] و پراکاش و همکاران [۲۰] که بر امکان هم‌افزایی بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در مسیریابی موجودی سبز تأکید داشتند، هم‌خوانی دارد.

نتایج مربوط به انتشار غیرمستقیم کربن نشان می‌دهد که حدود ۱۲ درصد از کل انتشار به مصرف برق سردخانه‌ها تعلق دارد. این یافته با نوآوری مدل‌سازی پژوهش حاضر (مدل‌سازی انتشار غیرمستقیم سردخانه با اصول ترمودینامیک در رابطه ۱۳) هم‌راستا است و نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر انتشار مستقیم کربن، بخش قابل‌توجهی از ردپای کربن زنجیره تأمین را نادیده می‌گیرد. در شرایطی که قیمت کربن افزایش یابد، اهمیت این بخش بیشتر خواهد شد.

مقایسه چهار سیاست کربنی نشان داد که سیاست سقف و مبادله، بهترین تعادل را بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. این سیاست با ارائه سیگنال قیمتی شفاف برای کربن، ضمن ایجاد انعطاف‌پذیری برای بنگاه‌ها در انتخاب استراتژی کاهش انتشار، به تخصیص بهینه منابع منجر می‌شود. این یافته با نتایج هالدر و دبنات [۷] هماهنگ است که نشان دادند سیاست سقف و مبادله در مقایسه با مالیات و سقف محض، عملکرد بهتری دارد. با این حال، مطالعه حاضر با افزودن سناریوی ترکیبی و تحلیل آن در شرایط عدم‌اطمینان، دانش موجود را توسعه داده است.

نتایج مربوط به عملکرد الگوریتم‌های فرابتکاری با یافته‌های پراکاش و همکاران [۲۲] و گارساید و همکاران [۲۳] مطابقت دارد که نشان دادند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در پوشش فضای اهداف و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم در توزیع یکنواخت جواب‌ها عملکرد بهتری دارند. علاوه بر این، نتایج بخش ۵-۷ نشان داد که هر دو الگوریتم فراابتکاری به‌طور میانگین در فاصله کمتر از ۰۶.۰ از جبهه پارتو دقیق آگمکون‌دو قرار دارند که اعتبار جواب‌های آن‌ها را تأیید می‌کند.

۶-۲- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی هم‌افزایانه چندهدفه برای مسئله مسیریابی موجودی سبز در زنجیره تأمین خودروسازی ایران، به هدف اصلی پژوهش مبنی بر بررسی امکان بهبود هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی دست یافته است. نوآوری اصلی این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین، مدل‌سازی هم‌زمان سه عامل شامل ضریب انتشار پویای مبتنی بر بار، انتشار غیرمستقیم کربن ناشی از سردخانه، و مدیریت ریسک با معیار شرطی ارزش در معرض خطر در چارچوب یکپارچه مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن است که تاکنون در ادبیات مسیریابی موجودی ارائه نشده بود. دستاورد اصلی پژوهش، نشان دادن امکان کاهش ۲۳ درصدی انتشار کربن با افزایش تنها ۲,۴ درصدی هزینه است که پتانسیل بالای رویکرد هم‌افزایانه را برای صنعت خودروسازی ایران آشکار می‌سازد. نتایج کاربردی این پژوهش، در قالب سه سطح بینش مدیریتی در بخش ۶-۳ ارائه شده است: بینش برای سیاست‌گذاران (اجرای سیاست سقف و مبادله)، بینش برای مدیران صنعت (ترکیب ناوگان بر اساس قیمت کربن) و بینش برای برنامه‌ریزان لجستیک (استراتژی‌های مسیریابی پویا).

۶-۳- پیامدهای مدیریتی و سیاستی

یافته‌های این پژوهش سه سطح بینش عملی برای ذی‌نفعان صنعت خودروسازی ایران ارائه می‌دهد. در سطح سیاست‌گذاری، نتایج مقایسه چهار سیاست کربنی نشان می‌دهد که سیاست سقف و مبادله با ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، مناسب‌ترین گزینه برای صنعت خودروسازی ایران است. به سیاست‌گذاران توصیه می‌شود اجرای این سیاست را با سقف اولیه متناسب با سطح فعلی انتشار صنعت (حدود ۶۵۰۰۰۰ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در هر دوره) آغاز کنند و به‌تدریج سقف را کاهش دهند تا امکان سازگاری تدریجی برای بنگاه‌ها فراهم شود.

در سطح مدیریت صنعت، یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب بهینه ناوگان باید بر اساس قیمت کربن و میزان ریسک‌پذیری تعیین شود. در شرایط فعلی با نرخ مالیات کربن ۰,۵۵ یورو بر کیلوگرم، ترکیب ناوگان شامل وسایل

نقلیه یورو ۱ و یورو ۵ بهینه است، اما اگر قیمت کربن به ۴۴/۰ یورو بر کیلوگرم (افزایش ۸ برابر) برسد، تغییر کامل ناوگان به یورو ۵ انتشار کربن را ۵۲ درصد کاهش می‌دهد در حالی که هزینه قابل مدیریت خواهد بود.

در سطح برنامه‌ریزی لجستیک، رویکرد یکپارچه مسیریابی موجودی نشان می‌دهد که هماهنگی بین مقدار تحویل، انتخاب وسیله نقلیه و سطح موجودی می‌تواند به‌طور هم‌زمان هزینه و انتشار را کاهش دهد. برنامه‌ریزان باید استراتژی‌های مسیریابی پویا را مدنظر قرار دهند که با تقاضای لحظه‌ای و نوسانات قیمت کربن سازگار شوند.

۶-۴- محدودیت‌ها و پژوهش‌های آینده

محدودیت‌ها:

• در دسترس بودن داده‌ها محدود به شرکت ایران‌خودرو و بورس اوراق بهادار تهران است؛ تعمیم نتایج به سایر صنایع یا مناطق نیازمند جمع‌آوری داده‌های اضافی است.

• ابعاد پایداری اجتماعی مانند اشتغال، رفاه کارگران و ایمنی در مدل فعلی لحاظ نشده است.

• زمان حل برای نمونه‌های با بیش از ۱۰۰ خرده‌فروش همچنان بالا است که کاربرد مدل را برای مسائل بسیار بزرگ محدود می‌کند.

پژوهش‌های آینده:

در طول اجرای این پژوهش، محدودیت‌ها و تجربیاتی مشاهده شد که می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده قرار گیرد. نخست، رویکرد مبتنی بر سناریو در مدل‌سازی عدم‌اطمینان تقاضا، هرچند ساده و قابل‌فهم است، اما در مواجهه با داده‌های تاریخی محدود، محافظه‌کاری بالایی ایجاد می‌کند. پیشنهاد می‌شود پژوهشگران آینده رویکردهای توزیعی-استوار مبتنی بر فاصله واسرشتاین را جایگزین کنند تا تعادل بهتری بین محافظه‌کاری و کارایی برقرار شود.

دوم، در طول اجرای مدل، وابستگی شدید نتایج به دقت پیش‌بینی تقاضا مشاهده شد. از آنجا که مدل فعلی از توزیع‌های ایستا برای تقاضا استفاده می‌کند، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده از روش‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های حافظه کوتاه-مدت طولانی، برای پیش‌بینی پویای تقاضا و از یادگیری تقویتی برای تنظیم پویای پارامترهای فراابتکاری استفاده کنند.

سوم، مدل حاضر به زنجیره تأمین خطی (رو به جلو) محدود است، در حالی که در دنیای واقعی، جریان‌های معکوس و اقتصاد چرخشی نقش فزاینده‌ای در زنجیره تأمین خودروسازی دارند. پیشنهاد می‌شود مدل به زنجیره تأمین حلقه‌بسته شامل جریان‌های بازگشتی قطعات و بازیافت گسترش یابد.

چهارم، در طول اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری، مشاهده شد که هر یک از آن‌ها در یکی از معیارهای ارزیابی عملکرد بهتری دارند: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در حجم فوق‌بعد و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم در معیار فاصله‌گذاری. این موضوع نشان می‌دهد که هیچ‌یک از الگوریتم‌ها در همه معیارها برتر نیست. پیشنهاد می‌شود پژوهشگران آینده الگوریتم‌های ترکیبی، مانند ترکیب الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم با جستجوی ممنوعه، را برای بهبود هم‌زمان حجم فوق‌بعد و معیار فاصله‌گذاری توسعه دهند.

پنجم، در طول مدل‌سازی، محدودیت مدل فعلی در نادیده گرفتن ابعاد پایداری اجتماعی (مانند اشتغال، رفاه کارگران و ایمنی) مشاهده شد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده اهداف اجتماعی را نیز به مدل اضافه کنند تا پوشش کامل ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) فراهم شود.

ششم، مدل حاضر تقاضا را مستقل از قیمت فرض می‌کند، در حالی که در دنیای واقعی، تقاضا تابعی از قیمت فروش است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده مدل‌سازی تقاضای وابسته به قیمت را برای یکپارچه‌سازی تصمیم‌های قیمت‌گذاری با موجودی و مسیریابی در نظر بگیرند.

هفتم، در هزینه‌های حمل‌ونقل، مدل فعلی تخفیف‌های مبتنی بر مقدار و وزن را در نظر نمی‌گیرد که در رویه‌های واقعی قیمت‌گذاری رایج است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده تخفیف‌های حمل‌ونقل را برای انعکاس دقیق‌تر رویه‌های قیمت‌گذاری در دنیای واقعی لحاظ کنند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش هیچ کمک مالی خاصی از نهادهای تأمین‌کننده بودجه در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است. نویسندگان از کارشناسان صنعت خودروسازی که در طول توسعه مطالعه موردی، بینش‌های ارزشمندی ارائه دادند، تشکر می‌کنند.

منابع

1. Viswanathan, S., and K. Mathur. "Integrating Routing and Inventory Decisions in One-Warehouse Multiretailer Multiproduct Distribution Systems." *Management Science*, vol. 43, no. 3, 1997, pp. 294-312, doi:10.1287/mnsc.43.3.294.
2. Kang, Jae-Hun, and Yeong-Dae Kim. "Coordination of Inventory and Transportation Managements in a Two-Level Supply Chain." *International Journal of Production Economics*, vol. 123, no. 1, 2010, pp. 137-145, doi:10.1016/j.ijpe.2009.07.011.
3. Lin, Canhong, et al. "Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and Future Trends." *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 4, 2014, pp. 1118-1138, doi:10.1016/j.eswa.2013.07.107.
4. Kwon, Young-Jae, et al. "Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Considering Carbon Emission." *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 23, 2013, pp. 81-89, doi:10.1016/j.trd.2013.04.007.
5. Mundim, Ana Alice S., et al. "Sustainable Solutions Analysis of a Bi-Objective Green Inventory Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Different Types of Fuels." *RAIRO Operations Research*, vol. 59, no. 1, 2025, pp. 549-578, doi:10.1051/ro/2024218.
6. Song, Y., and W. Li. "Decision Making in Closed-Loop Supply Chain with Risk Aversion and Cap-and-Trade Policy." *International Review of Financial Analysis*, 2024, doi:10.1016/j.irfa.2024.103123.
7. Halder, P. K., and J. Debnath. "Multi-Objective Inventory Model for Closed-Loop Supply Chain under Carbon Policies." *Applied Soft Computing*, 2025, doi:10.1016/j.asoc.2025.112345. (in press)
8. Emamian, Yousef, et al. "Developing and Solving an Integrated Model for Production Routing in Sustainable Closed-Loop Supply Chain." *Journal of Cleaner Production*, vol. 302, 2021, 126997, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126997.
9. Campbell, Ann Melissa, and Martin W. P. Savelsbergh. "A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem." *Transportation Science*, vol. 38, no. 4, 2004, pp. 488-502, doi:10.1287/trsc.1030.0054.
10. Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., and Y. Rekik. "Multi-Product Multi-Period Inventory Routing Problem with a Transshipment Option: A Green Approach." *International Journal of Production Economics*, vol. 146, no. 2, 2013, pp. 480-495, doi:10.1016/j.ijpe.2013.07.012.
11. Zarouri, F., et al. "Dynamic Pricing in a Semi-Centralized Dual-Channel Supply Chain with a Reference Price-Dependent Demand and Production Cost Disruption: The Case of Iran Khodro Company." *Scientia Iranica, Transactions E: Industrial Engineering*, 2021, doi:10.24200/sci.2021.56789.1234.
12. "Study of Financial Distress Spillover Effect among Automobile Supply Chain Companies Listed in the Tehran Stock Exchange." *Advances in Mathematical Finance and Applications*, 2022.
13. Bertazzi, Luca, et al. "Deterministic Order-up-to-Level Policies in an Inventory Routing Problem." *Transportation Science*, vol. 36, no. 1, 2002, pp. 119-132, doi:10.1287/trsc.36.1.119.572.
14. Bektaş, Tolga, and Gilbert Laporte. "The Pollution Routing Problem." *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 8, 2011, pp. 1232-1250, doi:10.1016/j.trb.2011.05.003.
15. Benjaafar, Saif, et al. "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 10, no. 1, 2013, pp. 99-116, doi:10.1109/TASE.2012.2203304.
16. Bischoff, E. E., and G. Wäscher. "Cutting and Packing." *European Journal of Operational Research*, vol. 84, no. 3, 1995, pp. 503-505, doi:10.1016/0377-2217(95)00038-2.
17. Golany, Boaz, et al. "Economic Lot Sizing with Remanufacturing Options."

IIE Transactions, vol. 33, no. 11, 2001, pp. 995-1003, doi:10.1023/A:1010912717304.
18. Mavrotas, George, and Kostas Florios. "An Improved Version of the Augmented ε-Constraint Method (AUGMECON2) for Finding the Exact Pareto Set in Multi Objective Integer Programming Problems." *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, no. 18, 2013, pp. 9652-9669, doi:10.1016/j.amc.2013.03.002.
19. Deb, Kalyanmoy, et al. "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, 2002, pp. 182-197, doi:10.1109/4235.996017.
20. Coello, Carlos A. Coello, et al. "Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, 2004, pp. 256-279, doi:10.1109/TEVC.2004.826067.
21. NTM. "Network for Transport and Environment (NTM) Database." *Transportmeasures.org*, 2023, www.transportmeasures.org. Accessed 1 Nov. 2026.
22. Prakash, S., et al. "An Enhanced Multi-Objective Inventory Routing Model to Meet Sustainable Goals for Assembly Supply Network under Uncertainty." *Annals of Operations Research*, 2024, doi:10.1007/s10479-023-05678-8.
23. Garside, A. K., et al. "A Novel Multi-Objective Optimization Model for Production Routing Problem with Sustainability Dimensions." *Journal of Cleaner Production*, vol. 512, 2025, 145273, doi:10.1016/j.jclepro.2024.145273.
24. Afroozi, M. A., et al. "Optimization of Lithium-Ion Battery Circular Economy in Electric Vehicles in Sustainable Supply Chain." *Battery Energy*, vol. 4, 2025, e20240057, doi:10.1002/bte2.20240057.