نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269
سال دوازدهم، شماره بیست و چهارم، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۷۷-۹۱
www.ier.basu.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29726.2179

ارائه مدل زنجیره‌تأمین سبز با درنظر گرفتن هزینه انتشار کربن در بخش‌های حمل‌ونقل و نگهداری در وسایل نقلیه ناهمگن

مهدی نخعی‌نژاد[1*]، محمد محزون[2]، میلاد سالکی[3]

۱. دانشیار مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۳/۰۲/۱۶
پذیرش ۱۴۰۳/۰۵/۲۹
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
مدیریت زنجیره‌تأمین سبز
برنامه‌ریزی حمل‌ونقل
انتشار کربن
مدیریت موجودی

خلاصه

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و الزامات قانونی، مدیریت زنجیره‌تأمین سبز (GSCM) به‌عنوان یک استراتژی حیاتی برای سازمان‌ها شناخته شده است. این مقاله به ارائه یک مدل بهینه‌سازی می‌پردازد که هزینه‌های انتشار کربن در حمل‌ونقل و نگهداری محصولات را با استفاده از وسایل نقلیه ناهمگن درنظر می‌گیرد. مدل ارائه شده به ترکیب تصمیمات مربوط به موجودی و حمل‌ونقل با درنظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی پرداخته و هدف آن بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت منابع در زنجیره‌تأمین است. این پژوهش به توسعه و تحلیل یک مدل بهینه‌سازی در زنجیره‌تأمین سبز چندمحصولی و چنددوره‌ای پرداخته است که باهدف کاهش انتشار کربن طراحی شده است. این مدل ابتدا با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط (MINLP) فرموله شده و سپس خطی‌سازی (MILP) شده است. این مدل شامل هزینه‌های مختلفی ازجمله هزینه‌های انتشار کربن در بخش حمل‌ونقل و نگهداری محصولات می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ مالیات بر انتشار کربن به کاهش انتشار کربن و افزایش هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین منجر می‌شود. افزایش تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی، هزینه‌های کلی و حمل‌ونقل را افزایش می‌دهد، اما هزینه‌های نگهداری موجودی و انتشار کربن در لجستیک و نگهداری تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. این پژوهش با ارائه یک مدل جامع، به مدیران زنجیره‌تأمین کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری در راستای کاهش انتشار کربن و بهبود پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی اتخاذ کنند.

۱. مقدمه

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و فشارهای بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مفهوم مدیریت زنجیره‌تأمین سبز (GSCM)[2] به‌عنوان یک استراتژی حیاتی برای سازمان‌ها ظهور کرده است. GSCM شامل ادغام فرآیندهای زیست‌محیطی در تمامی مراحل زنجیره‌تأمین، از طراحی محصول تا دفع نهایی می‌باشد [۱].

مدیریت زنجیره‌تأمین سبز شامل تمامی مراحل تولید از طراحی محصول، انتخاب تأمین‌کننده، تأمین منابع مواد، فرآیند تولید، بسته‌بندی، تحویل به مشتریان و بازیافت و دفع نهایی است. هدف اصلی GSCM کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و بهبود پایداری است [۲].

تحقیقات متعددی به بررسی مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای

* نویسنده مسئول: مهدی نخعی‌نژاد
تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۳۳۸۱۹؛ پست الکترونیکی: m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir

2. Green Supply Chain Management

ترکیب اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی پرداخته‌اند. در پژوهشی، شی و همکاران [۳] یک مدل بهینه‌سازی خطی چندهدفه برای طراحی شبکه‌های لجستیکی در صنعت با تأکید بر بهبود جریان مواد و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند. در مقاله‌ای، رامودین و همکاران [۴] برنامه‌ریزی دوهدفه در طراحی شبکه با درنظر گرفتن هزینه‌های انتشار کربن در صنعت فولاد را بررسی کرده‌اند. در پژوهشی دیگر، نیز به بررسی مدل‌های دوهدفه در طراحی شبکه لجستیک صنعت کاغذ پرداخته شده است [۵]. در صنعت پزشکی، حسنی و همکاران [۶] مدل‌های چندهدفه برای زنجیره‌تأمین مقاوم را ارائه کرده‌اند. در مقاله‌ای نیز از روش برنامه‌ریزی هدف فازی برای بهینه‌سازی شبکه‌های زنجیره‌تأمین چندهدفه استفاده شده است [۷]. در همین راستا، هوانگ و همکاران [۸] یک زنجیره تامین سبز با چندین تامین کننده، یک تولید کننده واحد و چندین خرده فروش در نظر گرفته اند. در این مقاله یک مدل نظریه بازی برای بررسی همزمان تأثیرات طراحی خط محصول، انتخاب تامین کننده، انتخاب حالت حمل و نقل و استراتژی های قیمت گذاری بر سود و انتشار گازهای گلخانه ای ایجاد شده است. پاکسوی و همکاران [۹] نیز مدل‌های برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی فازی به‌منظور کاهش انتشار کربن را مطرح کرده‌اند. کوماری و همکاران [۱۰]در مقاله ای، یک مدل زنجیره تأمین پایدار یکپارچه ارائه کردند که انتشار کربن ناشی از تولید، مسیریابی خودرو و انبارداری را در نظر می گیرد و از یک الگوریتم ترکیبی (GA-RR) برای بهینه سازی موجودی، تأمین مجدد و مسیریابی خودرو در حالی که هزینه های کلی و انتشار را به حداقل می رساند، ارائه دادند.

مطالعه حاضر، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی را ارائه می‌کند که بر طراحی شبکه زنجیره‌تأمین سبز متمرکز است.

در این پژوهش، سؤالات تحقیق عبارت‌اند از:

۱) آیا می‌توان مدلی چندمحصولی و چنددوره‌ای با خودروهای ناهمگن ایجاد کرد که هزینه انتشار کربن را محاسبه کند؟

۲) چگونه می‌توان انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات را به مدل زنجیره‌تأمین اضافه کرد؟

۳) اثر نرخ‌های مختلف مالیات بر مدل زنجیره‌تأمین ایجاد شده، چیست و چگونه می‌توان موجب کاهش انتشار کربن و کمک به کاهش آلایندگی شد؟

هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل زنجیره‌تأمین چندمحصولی و چنددوره‌ای با خودروهای ناهمگن است که به‌منظور کاهش انتشار کربن و بهینه‌سازی مصرف انرژی در حمل‌ونقل و موجودی طراحی شده است. این پژوهش درنظر دارد تا انتشار کربن در بخش نگهداری را در مدل زنجیره‌تأمین درنظر گیرد و اثرات متفاوت تغییر نرخ مالیات را بر روی مدل ارائه شده بسنجد و در پی کاهش انتشار کربن به‌منظور حفظ محیط زیست باشد.

تحقیقات اخیر به بررسی تأثیرات عملیاتی بر انتشار کربن در زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند. آردلیانا و همکاران[۱۱]در یک تحقیق، به ایستگاه های چند محصولی، چند کارخانه ای، چند خروجی و چند ورودی پرداخته اند که در آن چندین مشتری قرار است برای چندین دوره خدمات دریافت کنند. آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که تقاضا، مالیات کربن و مسافت به طور قابل‌توجهی بر انتشار کل و هزینه‌های کل تأثیر گذاشته است. حسنی و همکاران [۶] الگوریتم‌های تکاملی جدیدی برای حل مسائل غیرخطی و چندهدفه زنجیره‌تأمین سبز توسعه داده‌اند. لو و لی [۱۲] یک مدل حمل و نقل سبز را با تمرکز بر هزینه های انتشار کربن، مقایسه کامیون های دیزلی سنگین و برقی برای حمل و نقل بارهای دوربرد، ایجاد کردند. این مقاله از یک الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته برای بهینه سازی آرایش وسایل نقلیه استفاده می کند که هزینه های پایین تر و آلودگی کمتر در لجستیک را ترویج می دهد. گلپیرا و جوانمردان [۱۳] مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استوار مبتنی‌بر ریسک برای مشکلات زنجیره‌تأمین حلقه بسته با درنظر گرفتن سیاست‌های مختلف کنترل انتشار کربن را توسعه داده‌اند. مقدانی و همکاران [۱۴] مدل‌های مسیریابی و تخصیص موجودی را با درنظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی بررسی کرده‌اند. وانگزا و همکاران [۱۵]یک مدل زنجیره تامین پایدار را پیشنهاد کردند که انتشار کربن از تامین کنندگان و خرده فروشان را در نظر می گیرد و با تمرکز بر سرمایه گذاری در فناوری سبز و تجهیزات الکتریکی برای حمل و نقل و انبارداری، اما این مقاله به طور خاص به وسایل نقلیه ناهمگن نمی پردازد. حمدی اصل و همکاران [۱۶] در مقاله‌ای یک مدل شبکه زنجیره‌تأمین براساس ویژگی‌های منحصربه‌فرد محصول خرما ایجاد کردند. در این شبکه حلقه بسته، پایداری محصول خرما در شبکه زنجیره‌تأمین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دراین مدل جمع‌آوری پسماند محصولات به مراکز بازیافت معرفی گردیده و برای حل مدل پیشنهادی مسأله، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری و ترکیبی با استفاده از سالور سیپلکس استفاده شده است. مدل ارائه شده با بهینه‌سازی جریان روبه‌جلو و معکوس، هزینه‌های کل لجستیک و سبز بودن ناشی از انتشارات را به حداقل می‌رساند. در مطالعه‌ای دیگر، عبدالله‌زاده و عاصم فرزانه [۱۷] برای اولین‌بار یک مدل بهینه‌سازی ریاضی به‌منظور کاربرد مفهوم همزیستی صنعتی در ارائه زنجیره‌تأمین سبز باهدف حداقل کردن هزینه‌های کل با حداقل انتشار کربن کردند. مدل پیشنهادی تک‌کالایی و چنددوره‌ای بوده است. با حل مدل، یک برنامه تولید و بازتولید محصول با حداقل هزینه کل و کمترین تولید کربن به تفکیک هر کارخانه تعیین شد. همچنین، اطلاعات کلیدی عملکردی کارخانه‌ها در دوره‌های برنامه‌ریزی محاسبه شد. یک پژوهش دیگر توسط عیدی و باغنی [۱۸]، دو مدل ارائه شده است. در مدل اول، مکان و تخصیص فروشگاه‌ها با استفاده از روش حداکثر پوشش مورد بحث قرار گرفته است و در مدل دوم، تعداد بهینه محصولات محاسبه شده و هزینه‌های شبکه و آلودگی به حداقل می‌رسد. نرم افزار گمز با حل کننده CPLEX برای حل برنامه‌ریزی خطی مختلط تحت عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، حداکثر فاصله پوشش و قیمت تجارت کربن در سناریوهای مختلف استفاده شد. با

توجه به نبود قانون برای به حداقل رساندن میزان آلودگی ناشی از حمل و نقل در ایران، سیاست سقف و تجارت در زنجیره تأمین کارخانه قند بیستون در کرمانشاه استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش فاصله پوشش علاوه بر کاهش سطح خدمات مشتری، هزینه‌های کلی تولیدکننده و آلودگی شبکه را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، مطالعه‌ای توسط درختی و گونزالز [۱۹] از طریق توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط دو مرحله‌ای، طراحی شبکه زنجیره تأمین را بهینه کردند. در مرحله اول، یک مدل تک‌هدفه هزینه‌های ضبط، حمل و نقل و ذخیره‌سازی را همراه با هزینه‌های انتشار CO_2 به جو، با در نظر گرفتن قیمت‌های مختلف مالیات کربن، به حداقل می‌رساند. در مرحله دوم، یک مدل دو هدفه، پذیرش اجتماعی چاه‌های تزریق CO_2 (مخازن) را برای تجزیه و تحلیل تأثیر ابعاد فرهنگی به حداکثر می‌رساند. یافته‌ها نشان می‌دهد که حداکثر کردن هدف اجتماعی منجر به افزایش هزینه‌ها نسبت به بهینه اقتصادی می‌شود و به طور قابل توجهی بر باز بودن مخازن بر اساس ابعاد فرهنگی تأثیر می‌گذارد. در مطالعه‌ای توسط شو و همکاران [۲۰]، یک مدل احتمالی دو مرحله‌ای برای طراحی زنجیره تامین سبز در زمینه برنامه‌ریزی چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تقاضاها و قیمت‌های کربن نامشخص پیشنهاد شده است. همچنین، یک روش حل چهار مرحله‌ای با کاهش سناریو ارائه شده که امکان حل مدل پیشنهادی را با استفاده از حل‌کننده‌های تجاری محبوب به طور کارآمد فراهم می‌کند. این راه‌حل، مدل پیشنهادی را از مدل‌های موجود که فرض می‌کنند شرکت‌ها می‌توانند بدون محدودیت کمی، اعتبار کربن خریداری یا بفروشند، متمایز می‌کند. کاربرد مدل پیشنهادی از طریق تحلیل مبتنی بر شبیه‌سازی صنعت آلومینیوم نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل احتمالی پیشنهادی شبکه‌ای با ظرفیت اضافی برای مقابله با تقاضای متغیر مشتریان و قیمت‌های کربن ایجاد می‌کند، در حالی که تنها افزایش اندکی در هزینه و انتشار در مقایسه با مدل قطعی مشاهده می‌شود.

در دهه اخیر، به‌دلیل چالش‌های متعدد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، رویکردهای سنتی که تنها بر مشتری‌مداری و رضایت مشتریان متمرکز بوده اند، نتوانستند مزیت رقابتی پایداری ایجاد کنند. این دیدگاه‌های محدود منجربه آسیب‌های زیست‌محیطی شده و تولید محصولات و فرآیندهایی را تشویق کرده‌اند که با اصول زیست‌محیطی هماهنگی نداشته‌اند [۲۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که توجه به پایداری زیست‌محیطی در زنجیره‌تأمین همچنان روبه افزایش است و مدل‌های مختلف بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و بهبود پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲]. ازجمله تحقیقاتی که به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی در زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند می‌توان به مطالعات [۸] و [۲۳] اشاره کرد.

علاوه‌بر این، بن‌جعفر و همکاران [۲۴] مدلی ساده برای کاهش هزینه‌های انتشار کربن با تصمیم‌گیری‌های عملیاتی مناسب ارائه داده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با اتخاذ سیاست‌های مناسب کاهش کربن، می‌توان به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن را کاهش داد. در یک مطالعه دیگر، توانا و همکاران [۲۵] یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط دو هدفه برای زنجیره‌های تامین سبز ارائه دادند که به مسائل انتخاب تامین‌کننده، تخصیص سفارشات و مسیریابی خودرو با انتشار کربن کم، با در نظر گرفتن مسیریابی خودروهای ناهمگن، نیازهای ذخیره‌سازی و تقاضای نامشخص، و ادغام موثر هزینه‌های انتشار کربن می‌پردازد.

در حوزه مدیریت موجودی و حمل‌ونقل، تحقیقات نشان می‌دهد که ادغام تصمیمات مربوط به موجودی و حمل‌ونقل می‌تواند به بهبود کارایی زنجیره‌تأمین و کاهش انتشار کربن کمک کند [۲۶]. در پژوهشی دیگر بررسی شد که چگونه مدیران لجستیک می‌توانند اصول مدیریت زیست‌محیطی را در فرآیندهای روزانه خود ادغام کنند. در یک مطالعه موردی در صنعت غذا، نشان داده شد که این اصول می‌توانند هم‌زمان با اهداف کارایی، به‌دست آید [۲۷].

در مطالعه‌ای مدل‌هایی برای مسیریابی وسیله نقلیه و مدیریت موجودی چندمحصولی و چنددوره‌ای با درنظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی ارائه شد [۲۸]. در این مقاله نشان داده شد که این مدل‌ها می‌توانند به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی کمک کنند. آلامرو و بریسو [۲۹] نیز به بررسی مشکلات شبکه زنجیره‌تأمین در صنعت باتری پرداخته و مدل‌هایی برای حل مشکلات حمل‌ونقل سبز و مسیریابی وسیله نقلیه ارائه کرده‌اند.

اگرچه توجه به زنجیره‌تأمین سبز روبه افزایش است، اما مطالعات نشان می‌دهد که تنها درصد کمی از زنجیره‌های تأمین از مدل‌های کمی برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی استفاده می‌کنند [۲۲]. بیشتر تحقیقات در این زمینه به بررسی انتشار کربن در طراحی زنجیره‌تأمین و مسیریابی وسیله نقلیه پرداخته‌اند و توجه کمتری به سطوح عملیاتی و تکنیکی زنجیره‌تأمین داشته‌اند. یکی از موضوعاتی که در ادبیات کمتر مورد توجه قرار گرفته است، افزودن هزینه‌های کربن به سایر هزینه‌های عملیاتی زنجیره‌تأمین به‌منظور ادغام تصمیمات مربوط به حمل‌ونقل و موجودی است.

یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی که بشر امروز با آن مواجه است، انتشار گازهای گلخانه‌ای است که منجربه گرم‌شدن زمین شده است. در زنجیره‌تأمین، فعالیت‌های متنوعی ازقبیل تولید، حمل‌ونقل و نگهداری محصولات انجام می‌شود که همگی به‌نحوی در انتشار کربن نقش دارند. درحالی‌که بسیاری از پژوهش‌ها به بررسی جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند، موضوع انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات درکنار بخش لجستیک تاکنون به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. این درحالی است که نگهداری محصولات نیز به‌دلیل جابه‌جایی‌های محصولات انبار، انرژی مصرفی و سایر عوامل مرتبط می‌تواند سهم قابل توجه و مهمی در انتشار کربن داشته باشد. ازاین‌رو، بررسی و مدل‌سازی انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات می‌تواند به کاهش انتشار کلی کربن و بهبود مدیریت زنجیره‌تأمین کمک شایانی نماید.

در این پژوهش، برای نخستین بار یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با درنظر گرفتن انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات ارائه می‌شود. مطالعات زیادی به بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل و استفاده از وسایل نقلیه با آلایندگی کمتر یا بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی برای کاهش انتشار کربن پرداخته‌اند. اما بخش نگهداری، اگرچه ممکن است ازنظر ظاهری نقش کم‌رنگ‌تری در تولید کربن داشته باشد، اما به‌دلیل مصرف انرژی در نگهداری محصولات در انبارها (مانند انرژی برق برای روشنایی، تهویه و جابه‌جایی محصولات) و همچنین جابه‌جایی‌های داخلی انبار، سهم مهمی در تولید کربن دارد. نگهداری محصولات در انبارها به مصرف انرژی قابل‌توجهی برای نگهداری محیط‌های کنترلی (مثل دما و رطوبت مناسب) نیاز دارد. این انرژی، به‌ویژه در انبارهای بزرگ یا مراکزی که محصولات برای مدت‌های طولانی نگهداری می‌شوند، به‌طور مستقیم با تولید گازهای گلخانه‌ای مرتبط است. به‌طور مثال، در بخش‌هایی مانند مواد غذایی یا محصولات حساس به دما، سیستم‌های کنترل دمایی مصرف انرژی بالایی دارند که می‌تواند منجربه افزایش انتشار کربن شود. همچنین، در بسیاری از انبارها، تجهیزات مکانیکی مانند لیفتراک‌ها و سیستم‌های جابه‌جایی خودکار استفاده می‌شوند که نیازمند مصرف سوخت‌های فسیلی هستند یا از انرژی برق استفاده می‌کنند. این مصرف انرژی نیز باعث تولید کربن می‌شود که در مدل‌های زنجیره‌تأمین سنتی کمتر به آن پرداخته شده است. نوآوری پژوهش حاضر این است که این نوع انتشار کربن را به مدل اضافه کرده و تأثیر آن را بر روی کل زنجیره‌تأمین بررسی کرده است. در مدل‌های سنتی زنجیره‌تأمین، انتشار کربن تنها در مراحل حمل‌ونقل و تولید بررسی می‌شود، اما با درنظر گرفتن انتشار کربن در بخش نگهداری، این مدل به‌طور جامع‌تری عمل می‌کند. این نوآوری به شرکت‌ها و مدیران زنجیره‌تأمین این امکان را می‌دهد تا با بهینه‌سازی سیستم‌های انبارداری و نگهداری محصولات، به کاهش بیشتری در انتشار کربن دست یابند. همچنین، این مدل می‌تواند تصمیمات استراتژیک در مورد میزان محصولات نگهداری شده در انبارها و مدت‌زمان نگهداری آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

نوآوری‌های اصلی این پژوهش که از شکاف‌های پژوهشی موجود در جدول (۱) به‌دست آمده به‌شرح زیر است:

۱) افزودن انتشار کربن در نگهداری محصولات به تابع هدف مدل بهینه‌سازی: برخلاف پژوهش‌های قبلی که عمدتاً به انتشار کربن در مراحل تولید و حمل‌ونقل پرداخته‌اند، این پژوهش به بررسی انتشار کربن در نگهداری محصولات می‌پردازد که معمولاً نادیده گرفته شده است.

۲) استفاده از مدل‌سازی برای نگهداری محصولات: با درنظر گرفتن جزئیات بیشتری از فرآیندهای مرتبط با نگهداری، ازجمله جابه‌جایی‌های داخلی و مصرف انرژی، مدل ارائه شده می‌تواند به نتایج واقعی‌تری در زمینه مدیریت انتشار کربن دست یابد.

۳) کاربردهای عملی: مدل پیشنهادی می‌تواند به مدیران زنجیره‌تأمین کمک کند تا با بهبود فرآیندهای نگهداری و کاهش انتشار کربن، به اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی خود دست یابند.

۲. تعریف مسأله حمل‌ونقل و موجودی

در این مقاله، مسأله توزیع و موجودی یکپارچه در یک زنجیره‌تأمین دوسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای با حضور یک تأمین‌کننده و چند خرده‌فروش بررسی شده است تقاضای خرده‌فروشان قطعی است اما طی دوره‌های مختلف تغییر می‌کند و پویا است. در این مسأله براساس سیاست مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI)، تأمین‌کننده باید از مدت‌زمان تحویل و مقدار محصول تعیین شده، پیروی کند. تأمین‌کننده مسئول تعیین اندازه بسته، نوع و تعداد اقلام ارسالی و زمان تحویل به هر خرده‌فروش براساس تقاضای خرده‌فروشان است. همچنین براساس سیستم حمل‌ونقل موجود، می‌توان نوع هر خودرو را براساس ظرفیت بارگیری و میزان انتشار کربن در هر دوره تعیین کرد. در این مسأله، فاصله بین خرده‌فروشان ثابت درنظر گرفته شده است.

همچنین، فاصله بین تأمین‌کننده و خرده‌فروشان نیز ثابت فرض شده است. هدف این مسأله به حداقل رساندن هزینه‌ها ازجمله هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های نگهداری موجودی و نیز هزینه‌های انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات است. بنابراین، مسأله یکپارچه‌سازی موجودی و حمل‌ونقل که توسط رضا اسلامی‌پور [۳۰] مطرح شده، در این مقاله تعمیم یافته است.

بنابراین، مفروضات مسأله این پژوهش عبارت‌اند از:

۱) در این پژوهش، زنجیره‌تأمین چندمحصولی درنظر گرفته شده است و تأمین‌کننده در مورد تعداد اقلام تحویل شده به هر وسیله نقلیه، تعداد اقلام تحویل شده به هر خرده‌فروش و زمان تحویل محصولات تصمیم می‌گیرد.

۲) طبق گزارش‌های آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA)، ۹۶ درصد از گازهای گلخانه‌ای در حمل‌ونقل مربوط به گاز کربن دی اکسید است. ازاین‌رو مدل ارائه شده در این تحقیق، مقدار انتشار کربن دی اکسید از وسایل نقلیه حمل‌ونقل ناهمگن را برای درنظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی ارائه می‌دهد.

۳) وسایل نقلیه ناهمگن دارای حجم و وزن کافی برای حمل‌ونقل کلیه اقلام در هر دوره هستند. علاوه‌بر این، میزان انتشار کربن برای هر وسیله نقلیه متفاوت است و بر انتخاب هر وسیله نقلیه ارائه شده توسط تأمین‌کننده تأثیر می‌گذارد. همچنین، مدیریت وسایل نقلیه ازطریق ملاحظات زیست محیطی انجام می‌شود.

۴) مسیر هر وسیله نقلیه از تأمین‌کننده شروع می‌شود و به خرده‌فروشان ختم می‌شود. در هر سفر، اقلام به برخی از خرده‌فروشان تحویل داده می‌شود و سپس می‌توان آن را به تأمین‌کننده بازگرداند (حمل‌ونقل همراه بازگشت).

۵) هزینه حمل‌ونقل دو هزینه عمده دارد. هزینه ثابت وسایل نقلیه (شامل دستمزد راننده، قیمت سوخت، تعمیر و نگهداری)؛ و هزینه ثابت حمل‌ونقل اقلام در محل تحویل به خرده‌فروشان.

۶) در این مدل، میزان انتشار کربن برابر است با ترکیبی از کربن منتشر شده توسط هر نوع خودرو و مسافت طی شده. علاوه‌بر این، ضریب کربن منتشر شده به‌صورت پویا براساس وزن محصول و نوع وسیله نقلیه تعریف می‌شود.

۷) در این مدل، علاوه‌بر درنظر گرفتن هزینه نگهداری موجودی، هزینه انتشار کربن برای نگهداری موجودی را نیز درنظر می‌گیرد. هزینه انتشار کربن برای نگهداری موجودی به میزان انتشار کربن ناشی از فرآیندهای ذخیره‌سازی و مدیریت موجودی در انبارها و مراکز توزیع اشاره دارد.

جدول (۱). مقایسه پژوهش حاضر با دیگر پژوهش‌ها

مقاله	سال	مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای	وسایل نقلیه ناهمگن	هزینه انتشار کربن در بخش نگهداری	استفاده از مدل‌سازی برای نگهداری محصولات	نرخ مالیات کربن	هدف اصلی
رامودین و همکاران[۱۱]	۲۰۱۰	✓				✓	برنامه‌ریزی دوهدفه در طراحی شبکه با درنظر گرفتن هزینه‌های انتشار کربن در صنعت فولاد
پاکسوی و همکاران [۹]	۲۰۱۱	✓				✓	بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین حلقه بسته و کاهش انتشار کربن
بن جعفر و همکاران[۲۴]	۲۰۱۲	✓				✓	کاهش هزینه‌های انتشار کربن با تصمیم‌گیری‌های عملیاتی
میرزاپور و همکاران [۲۸]	۲۰۱۴	✓				✓	بهینه‌سازی مسیریابی وسیله نقلیه و موجودی با رویکرد سبز
حسنی و همکاران [۶]	۲۰۲۱	✓				✓	مقاوم‌سازی زنجیره‌تأمین سبز و کاهش هزینه‌ها
آردلیانا و همکاران[۱۸]	۲۰۲۲	✓				✓	بهینه‌سازی لجستیک تحت سیاست‌های محدودکننده کربن
گلپیرا و جوانمردان [۱۳]	۲۰۲۲	✓				✓	بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین سبز با درنظر گرفتن سیاست‌های کربنی
شو و همکاران [۲۰]	۲۰۲۳	✓				✓	بررسی تأثیر مالیات بر تصمیم‌گیری‌های موجودی و تولید در زنجیره‌تأمین
رضا اسلامی پور [۳۰]	۲۰۲۳	✓	✓			✓	کاهش انتشار کربن در بخش حمل‌ونقل
شی و همکاران [۳]	۲۰۲۴	✓				✓	بهبود جریان مواد و کاهش اثرات زیست‌محیطی
پژوهش حاضر	۲۰۲۴	✓	✓	✓	✓	✓	کاهش انتشار کربن در حمل‌ونقل و نگهداری محصولات

۲-۱. پارامترها و متغیرهای مسأله

در این بخش، پارامترها و متغیرهای مدل، ارائه می‌شوند. مدل موجود به‌صورت یک مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی توسعه داده شده است.

نام‌گذاری مجموعه‌ها در جدول (۲)، پارامترها در جدول (۳) و متغیرها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۲). تعریف مجموعه‌ها

مجموعه‌ها	
مجموعه محصولات	$i = (1,2,\dots,I)$
مجموعه خرده‌فروشان	$j = (1,2,\dots,J)$
مجموعه انواع وسایل نقلیه	$p = (1,2,\dots,P)$
مجموعه تعداد وسایل نقلیه	$k = (1,2,\dots,K)$
مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی	$t = (1,2,\dots,T)$

جدول (۳). تعریف پارامترها

پارامترها	
مقدار تقاضای خرده‌فروشان j برای محصول i در دوره t	d_{ijt}
هزینه نگهداری برای هر واحد محصول i برای خرده‌فروش j در انتهای دوره t (برحسب یورو)	h_{ijt}
هزینه ثابت حمل‌ونقل برای وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p (برحسب یورو)	A_p
هزینه حمل‌ونقل ثابت خرده‌فروش j زمانی‌که با نوع وسیله نقلیه p مواجه می‌شود (برحسب یورو)	L_{jp}
ظرفیت وزنی نوع وسیله نقلیه p (کیلوگرم)	W_p
ظرفیت حجمی نوع وسیله نقلیه p (متر مکعب)	V_p
وزن محصول i (کیلوگرم)	w_i
حجم نوع محصول i (متر مکعب)	v_i
عدد به‌اندازه کافی بزرگ	M
فاصله متوسط بین تأمین‌کننده و خرده‌فروشان (کیلومتر)	dsr
فاصله متوسط بین خرده‌فروشان (کیلومتر)	drr
هزینه مالیات بر کربن منتشر شده (یورو/کیلوگرم CO2)	TX
کل انرژی مصرفی انبار و بخش نگهداری در دوره t	E_{Total}
حداقل مقدار کربن منتشر شده توسط نوع وسیله نقلیه p (زمانی‌که وسیله نقلیه خالی است) (کیلوگرم CO2 بر هر کیلومتر)	E_p^{min}
حداکثر مقدار کربن منتشر شده توسط نوع وسیله نقلیه p (زمانی‌که وسیله نقلیه پر است) (کیلوگرم CO2 بر هر کیلومتر)	E_p^{max}
ضریب انتشار کربن در بخش نگهداری	FC_h

۲-۲. محاسبه ضریب انتشار کربن در مدل

رابطه بین مصرف سوخت فسیلی و میزان انتشار کربن یک رابطه خطی مستقیم است [۳۱]. ارتباط بین مصرف سوخت فسیلی و مقدار بار حمل شده توسط هر وسیله نقلیه نیز خطی و مستقیم است [۳۱]. ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که ضریب انتشار رابطه مستقیم و خطی با میزان بار حمل شده خودرو دارد. بنابراین، با فرض پایداری سایر عوامل، داریم:

$$EF_{nl} = EF_e + (EF_f - EF_e)\left(load\frac{weight}{load}capacity\right) \quad (۱)$$

که با جای‌گذاری متغیرهای تعریف شده، معادله زیر به‌دست می‌اید:

$$E_{pkt}^{SR} = E_p^{min} + \left(E_p^{max} - E_p^{min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \quad \forall p,k,t \quad (۲)$$

در مسیر برگشت از خرده‌فروشان به تأمین‌کننده، وسیله نقلیه خالی است؛ بنابراین:

$$E_{pkt}^{RS} = E_p^{min} \quad (۳)$$

به‌دلیل این‌که مسیر تردد به‌صورت رفت و برگشت است، میانگین کل مسیر در معادله قرار می‌گیرد.

$$E_{pkt} = \frac{1}{2}\left(E_{pkt}^{SR} + E_{pkt}^{RS}\right)$$

$$= E_p^{min} + \frac{1}{2}\left(E_p^{max} - E_p^{min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \quad \forall p,k,t \quad (۴)$$

جدول (۴). تعریف متغیرها

متغیرها	
تعداد محصولات تحویل داده شده از نوع i به خرده‌فروش j توسط k عدد از وسیله نقلیه نوع p در دوره t	x_{ijpkt}
تعداد محصولات حمل شده توسط k عدد از وسیله نقلیه نوع p در دوره t	y_{pkt}
سطح موجودی محصول i در خرده‌فروش j در پایان دوره t	I_{ijt}
متغیر باینری، اگر $x_{jpkt} = \sum_i x_{ijpkt} > 0$ باشد، برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با ۰ خواهد بود.	X_{ijt}
تعداد کل محصولات (تمام نوع‌ها) تحویل داده شده به خرده‌فروش j توسط k عدد از وسیله نقلیه نوع p در دوره t	x_{jpkt}
متغیر باینری، اگر $y_{pkt} = \sum_i \sum_j x_{ijpkt} > 0$ باشد، برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با ۰ خواهد بود.	Y_{pkt}
تعداد خرده‌فروشانی که توسط k عدد از وسیله نقلیه نوع p در دوره t مواجه شده‌اند	n_{pkt}
مقدار کربن منتشر شده توسط وسیله نقلیه شماره k و نوع p در دوره t (کیلوگرم CO2 بر هر کیلومتر)	E_{pkt}
هزینه انتشار کربن برای نگهداری محصولات برای هر واحد محصول i برای خرده‌فروش j در انتهای دوره t (برحسب یورو)	Eh_{ijt}
مقدار کربن منتشر شده در مسیر بین تأمین‌کننده و خرده‌فروشان در دوره t	C_{srt}
مقدار کربن منتشر شده در مسیر بین خرده‌فروشان در دوره t	C_{rrt}
مقدار کربن منتشر شده در بخش نگهداری در دوره t	Ch_t
مقدار کربن منتشر شده در زنجیره‌تأمین در دوره t	Ce_t

۲-۳. برآورد هزینه انتشار کربن برای نگهداری محصولات

درنظر گرفتن انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات یک موضوع مهم است که به‌ویژه در زنجیره‌تأمین سبز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه ممکن است در برخی مدل‌های ریاضی تأثیر آن کوچک به‌نظر برسد، اما این تأثیر در شرایط واقعی قابل توجه است، به‌خصوص در صنایعی که مصرف انرژی در انبارها و نگهداری محصولات حساس بالاست (مانند صنایع غذایی یا دارویی). بخش نگهداری می‌تواند شامل تجهیزات و سیستم‌های انرژی‌بر مانند سیستم‌های خنک‌کننده، تهویه و نورپردازی باشد که به مصرف انرژی و در نتیجه انتشار کربن منجر می‌شود.

به‌منظور برآورد هزینه انتشار کربن برای نگهداری محصولات (Eh_{ijt})، ابتدا بایستی کل انرژی مصرفی بخش انبار و نگهداری را محاسبه کرد که شامل موارد زیر است:

- مصرف برق برای روشنایی و سیستم‌های تهویه مطبوع(HVAC): انبارها اغلب از سیستم‌های تهویه مطبوع و روشنایی برای حفظ شرایط مطلوب محیطی استفاده می‌کنند. میزان مصرف برق را

می‌توان از داده‌های واقعی انبارها و قبوض برق به‌دست آورد.

- مصرف انرژی برای جابه‌جایی داخلی محصولات (لیفتراک، نوار نقاله و سیستم‌های خودکار): این شامل مصرف انرژی لیفتراک‌ها و سایر سیستم‌های مکانیکی یا خودکار برای جابه‌جایی محصولات در داخل انبارها و بخش نگهداری است.

کل انرژی مصرفی در بخش نگهداری برای یک دوره زمانی معین را با E_{Total} نشان می‌دهیم.

پس از برآورد کل انرژی مصرفی انبار، می‌توان میزان انتشار کربن را براساس منابع انرژی محاسبه کرد. برای این کار، ضریب تبدیل انتشار کربن برای هر واحد انرژی در بخش نگهداری (FC_h) باید مورد استفاده قرار گیرد. این ضریب توسط سازمان‌های زیست‌محیطی مختلف مانند آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) یا سایر نهادهای ملی یا بین‌المللی ارائه می‌شود. بنابراین برای محاسبه انتشار کل کربن منتشر شده در بخش نگهداری خواهیم داشت:

$$Ch_t = E_{Total} \times FC_h \quad (۵)$$

برای محاسبه متغیر Eh_{ijt}، بایستی هزینه کل کربن منتشر شده برای بخش نگهداری بر تعداد محصولات و دوره زمان نگهداری تقسیم شود. بنابراین:

$$Eh_{ijt} = \frac{TX \sum_t Ch_t}{\sum_i \sum_j \sum_t I_{ijt}} \quad (۶)$$

۲-۴. مدل عدد صحیح مختلط

مدل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دوسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای باتوجه به هزینه انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات عبارت است از:

$$\begin{aligned} Min\ Z = & \sum_p \sum_k \sum_t A_p Y_{pkt} \\ & + \sum_j \sum_p \sum_k \sum_t L_{jp} X_{jpkt} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_t h_{ijt} I_{ijt} \\ & + TX \sum_t Ce_t \\ & + \sum_i \sum_j \sum_t Eh_{ijt} I_{ijt} \end{aligned} \quad (۷)$$

S.t.

$$\sum_p \sum_k x_{ijpkt} + I_{ij,t-1} - d_{ijt} = I_{ijt} \qquad \forall i, j, t \quad (۸)$$

$$\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt} \le W_p \qquad \forall p, k, t \quad (۹)$$

$$\sum_i \sum_j v_i x_{ijpkt} \le V_p \qquad \forall p, k, t \quad (۱۰)$$

$$x_{jpkt} = \sum_i x_{ijpkt} \qquad \forall j, p, k, t \quad (۱۱)$$

$$x_{jpkt} \le MX_{jpkt} \qquad \forall j, p, k, t \quad (۱۲)$$

$$y_{pkt} = \sum_i \sum_j x_{ijpkt} \qquad \forall p, k, t \quad (۱۳)$$

$$y_{pkt} \le MY_{pkt} \qquad \forall p, k, t \quad (۱۴)$$

$$n_{pkt} = \sum_j x_{jpkt} \qquad \forall p, k, t \quad (۱۵)$$

$$E_{pkt} = E_p^{min} + \frac{1}{2}\left(E_p^{max} - E_p^{min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \qquad \forall p, k, t \quad (۱۶)$$

$$C_{sr_t} = 2dsr \sum_p \sum_k E_{pkt} Y_{pkt} \quad (۱۷)$$

$$C_{rr_t} = drr \sum_p \sum_k E_{pkt}\left(n_{pkt} - Y_{pkt}\right) \qquad \forall t \quad (۱۸)$$

$$Ce_t = C_{srt} + C_{rrt} \qquad \forall t \quad (۱۹)$$

$$Ch_t = E_{Total} \times FC_h \quad (۲۰)$$

$$x_{ijpkt}, x_{jpkt}, y_{pkt}, I_{ijt}, n_{pkt}, C_{rrt}, C_{srt}, Ce_t \ge 0 \qquad \forall i, j, p, k, t \quad (۲۱)$$

$$X_{jpkt}, Y_{pkt} \in \{0,1\} \qquad \forall j, p, k, t \quad (۲۲)$$

طبق عبارت (۷) در تابع هدف، قسمت اول جمع هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه، قسمت دوم جمع هزینه‌های حمل‌ونقل برای خرده‌فروشان، قسمت سوم جمع هزینه نگهداری موجودی، بخش چهارم جمع هزینه‌های انتشارکربن در حمل‌ونقل و بخش نهایی هزینه انتشار کربن در بخش نگهداری محصولات است. محدودیت (۸)، تعادل موجودی برای هر خرده‌فروش را به‌گونه‌ای نشان می‌دهد که مجموع محصولات تحویل شده به خرده‌فروش و موجودی باقیمانده از دوره قبل منهای تقاضای فعلی هر محصول برابر با موجودی باقیمانده برای دوره بعدی باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) تضمین می‌کند که مجموع تعداد محصولات حمل شده برای هر وسیله نقلیه در یک دوره معین کمتر از ظرفیت بار همان وسیله نقلیه است. محدودیت‌ها (۱۱) تا (۱۴) باینری هستند. محدودیت (۱۵) تعداد خرده‌فروشانی که توسط هر نوع وسیله نقلیه در یک زمان خاص ملاقات می‌شوند را تعیین می‌کند. محدودیت (۱۶) میزان کربن منتشر شده را براساس بارها و نوع وسیله نقلیه در هر دوره نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) متغیرهایی را برای محاسبه هزینه‌های انتشار کربن در تابع هدف نشان می‌دهند. محدودیت (۲۰) مقدار کربن منتشر شده در بخش نگهداری برای هر دوره را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) مربوط به محدودیت‌های غیرمنفی و باینری است.

۳. روش حل مدل

باتوجه‌به این‌که مدل نوشته شده غیرخطی و NP-hard است و حل آن بسیار مشکل است؛ بنابراین، مدل با استفاده روش‌های ابتکاری ریاضیاتی به مدل خطی تبدیل می‌شود. برای خطی نمودن محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸)، متغیر $\acute{E}_{pkt}$ تعریف می‌شود و در ادامه بدین صورت عمل می‌شود:

$$\acute{E}_{pkt} = \frac{1}{2}\left(E_p^{max} - E_p^{min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \ge 0 \quad (۲۳)$$

$$\longrightarrow \quad E_{pkt} = E_p^{min} + \acute{E}_{pkt} \qquad \forall p,k,t$$

$$C_{sr_t} = 2dsr \sum_p \sum_k \left(E_p^{min} + \acute{E}_{pkt}\right) Y_{pkt} = 2dsr \sum_p \sum_k E_p^{min} Y_{pkt} + 2dsr \sum_p \sum_k \acute{E}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t \quad (۲۴)$$

از آنجایی‌که $\acute{E}_{pkt}$ و Y_{pkt} هم‌زمان برابر با صفر می‌باشد و Y_{pkt} باینری است، رابطه (۲۱) به شکل رابطه (۲۲) خطی‌سازی می‌شود:

$$C_{sr_t} = 2dsr \sum_p \sum_k \left(E_p^{min} Y_{pkt} + \acute{E}_{pkt}\right) \qquad \forall t \quad (۲۵)$$

به‌منظور خطی‌سازی محدودیت (۱۸)، با جای‌گذاری محدودیت (۲۳) خواهیم داشت:

$$C_{rr_t} = drr \sum_p \sum_k \left(E_p^{min} + \acute{E}_{pkt}\right)\left(n_{pkt} - Y_{pkt}\right) \qquad \forall t \quad (۲۶)$$

$$C_{rr_t} = drr \sum_p \sum_k E_p^{min}\left(n_{pkt} - Y_{pkt}\right) + drr \sum_p \sum_k \acute{E}_{pkt} n_{pkt} - drr \sum_p \sum_k \acute{E}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t \quad (۲۷)$$

$$C_{rr_t} = drr \sum_p \sum_k E_p^{min}\left(n_{pkt} - Y_{pkt}\right) + drr \sum_p \sum_k \sum_j \acute{E}_{pkt} X_{jpkt} - drr \sum_p \sum_k \acute{E}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t \quad (۲۸)$$

به‌منظور خطی‌سازی قسمت دوم معادله (۲۹)، متغیر S_{jpkt} به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{jpkt} = \acute{E}_{pkt} X_{jpkt} \qquad \forall j,p,k,t \quad (۲۹)$$

$$S_{jpkt} - M X_{jpkt} \le \acute{E}_{pkt} \qquad \forall j,p,k,t \quad (۳۰)$$

$$S_{jpkt} - M\left(1 - X_{jpkt}\right) \ge \acute{E}_{pkt} \qquad \forall j,p,k,t \quad (۳۱)$$

$$S_{jpkt} \ge 0 \qquad \forall j,p,k,t \quad (۳۲)$$

در معادله (۲۹)، X_{jpkt} یک متغیر باینری است که اگر مقدار آن صفر باشد، آنگاه $S_{jpkt} = 0$ خواهد بود و اگر مقدار آن یک باشد، آنگاه $S_{jpkt} = \acute{E}_{pkt}$ می‌باشد. بنابراین با افزودن ۲ محدودیت (۳۰) و (۳۱) به مدل مسأله، مدل غیرخطی تبدیل به مدل خطی می‌شود که حل آن برای نرم‌افزارها بسیار ساده‌تر است. درنتیجه رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_{rr_t} = drr \sum_p \sum_k E_p^{min}\left(n_{pkt} - Y_{pkt}\right) + drr\left(\sum_j \sum_p \sum_k S_{jpkt} - \sum_p \sum_k \acute{E}_{pkt}\right) \qquad \forall t \quad (۳۳)$$

درنهایت به‌منظور جلوگیری از غیرخطی شدن و زمان‌بر شدن حل مدل، طبق رابطه (۶) در تابع هدف به‌جای عبارت $TX \sum_t Ch_t$ عبارت $\sum_i \sum_j \sum_t Eh_{ijt} I_{ijt}$، جایگزین می‌شود تا مدل خطی‌سازی و سریع‌تر حل شود.

۴. نمونه محاسباتی

برای فهم بهتر مدل، در این بخش تعدادی مثال عددی بررسی شده‌اند. این مثال‌ها باتوجه‌به سناریوهای مختلف تحلیل شده‌اند تا نقش پارامترهای گوناگون در مدل تصمیم‌گیری و میزان انتشار کربن در زنجیره‌تأمین را نشان دهند.

مدل ساخته شده با استفاده از داده‌های یک زنجیره‌تأمین در اروپا حل شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. داده‌های مورد بحث از مقاله رضا اسلامی‌پور [۳۰] گرفته شده است. مثال موردنظر شامل مفروضات زیر است:

۱) فاصله بین خرده‌فروشان ۱۰ کیلومتر است و از تأمین‌کننده، ۱۲۰ کیلومتر فاصله دارد.
۲) وزن سه نوع محصول به‌ترتیب ۰/۵، ۱ و ۳ کیلوگرم و حجم آن‌ها ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۲۷ می‌باشد.
۳) تقاضا از توزیع یکنواخت (۵۰۰ و ۱۰۰) پیروی می‌کند.
۴) شش نوع خودروی ناهمگن براساس ظرفیت حجم و وزن و استانداردهای آلایندگی متفاوت درنظر گرفته شده است. پارامترها در جدول (۴) ارائه شده است.
۵) هزینه‌های حمل‌ونقل برای خرده‌فروشان از حجم وسایل نقلیه در توزیع یکنواخت (۱/۲ و ۰/۸) ناشی می‌شود.
۶) هزینه نگهداری برای هر محصول با قیمت ۰/۱ یورو برای توزیع یکنواخت (۱/۲ و ۰/۸) به‌دست می‌آید.
۷) باتوجه‌به مالیات انتشار کربن برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰، این میزان به‌ازای هر تن ۴۵ و ۷۰ یورو خواهد بود.
۸) سطح موجودی اولیه برای محصولات هر خرده‌فروش از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند (۲۰۰ و ۰).
۹) رابطه بین مصرف سوخت فسیلی و میزان انتشار کربن یک رابطه خطی مستقیم فرض شده است [۳۱].
۱۰)ضریب تبدیل انتشار کربن در این مدل ۰/۲۳ است.
۱۱)انرژی مصرفی برای نگهداری محصولات در هر دوره برحسب کیلووات‌ساعت از توزیع یکنواخت (۳۵۰ و ۵۰) پیروی می‌کند

مسأله موردنظر با استفاده از نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴,۱,۲ و حل‌کننده CPLEX حل شده است که زمان محاسباتی آن با سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ و پردازنده Core i7 اینتل، ۲۷/۰۶ ثانیه بوده است.

۴-۱. تجزیه و تحلیل نتایج

در جدول (۴) پارامتر وسایل نقلیه نشان داده شده است که سیستم حمل‌ونقل دارای شش نوع وسیله نقلیه با پارامترهای مختلف است. برای درک تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی، مدل در شرایطی ارائه می‌شود

که در ان دو و سه خرده‌فروش وجود دارد و در طی ده دوره حل شده است. نتایج در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است.

باتوجه‌به نتایج، با افزایش تعداد دوره‌های زمانی، کل هزینه‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل، ازجمله هزینه‌های ثابت و هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات، به‌شدت افزایش می‌یابد، اما این واقعیت برای نگهداری موجودی و هزینه‌های انتشار کربن در بخش لجستیک و نیز بخش نگهداری درست نیست. برای هزینه‌های انتشار کربن، می‌توان نتیجه گرفت که تأمین‌کنندگان همچنان از وسایل نقلیه با مقادیر بالاتر آلودگی استفاده می‌کنند که مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند. ازاین‌رو، آن‌ها ترجیح می‌دهند از خودروهای نوع ۱، ۳ و ۵ برای حمل‌ونقل محصولات حمل‌ونقل استفاده کنند

جدول (۵). انواع وسایل نقلیه و پارامترهای مربوط به آن

A_p	W_p	V_p	E_p^{max}	E_p^{min}	نوع سوخت	استاندارد الایندگی	نوع وسیله نقلیه	شماره وسیله نقلیه نوع (p)
۶۶	۶۰۰	۶	۱/۰۷	۰/۲۱۳	دیزل	یورو ۱	وانت	۱
۶۹	۶۰۰	۶	۰/۹۰۲	۰/۱۸	دیزل	یورو ۵	وانت	۲
۷۸	۱۵۰۰	۱۷	۱/۳۶۳	۰/۲۷۳	دیزل	یورو ۱	خاور	۳
۸۲	۱۵۰۰	۱۷	۱/۱۳۹	۰/۲۲۸	دیزل	یورو ۵	خاور	۴
۱۴۶	۵۰۰۰	۳۵	۰/۸۴۲	۰/۳۳۷	دیزل	یورو ۱	کامیون کوچک	۵
۱۵۳	۵۰۰۰	۳۵	۰/۸۳۳	۰/۳۳۳	دیزل	یورو ۵	کامیون کوچک	۶

جدول (۶). هزینه‌های زنجیره‌تأمین در دوره‌های مختلف با ۲ خرده‌فروش

تعداد وسیله نقلیه مورد استفاده ازنوع (p) در تمام دوره‌ها						هزینه انتشار کربن در نگهداری	هزینه انتشار کربن در لجستیک	هزینه نگهداری موجودی	هزینه حمل‌ونقل	هزینه ثابت	هزینه کل	دوره برنامه (T)
۱	۲	۳	۴	۵	۶							
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱/۳۵	۹	۰	۳۱	۷۸	۱۱۹/۳۵	۱
۱	۰	۳	۰	۰	۰	۵/۴۶	۳۹	۱	۵۶	۳۰۰	۴۰۱/۴۶	۲
۰	۰	۲	۰	۱	۰	۴/۵۵	۳۵	۸	۱۳۶	۳۸۴	۵۷۶/۵۵	۳
۰	۲	۲	۰	۰	۰	۴/۳۲	۳۶	۸۹	۲۰۳	۴۴۸	۷۸۰/۳۲	۴
۰	۲	۴	۰	۰	۰	۸/۴	۵۶	۷۳	۲۲۴	۶۰۴	۹۶۵/۴	۵
۰	۲	۵	۰	۰	۱	۹/۶۲	۷۴	۲۸	۲۴۴	۷۴۸	۱۱۰۳/۶۲	۶
۰	۲	۷	۰	۰	۱	۱۱/۵۲	۹۶	۷۳	۲۸۱	۹۰۴	۱۳۶۵/۵۲	۷
۰	۲	۶	۳	۰	۱	۱۶/۳۵	۱۰۹	۳۴	۲۹۵	۱۰۷۲	۱۵۲۶/۳۵	۸
۰	۲	۱۱	۰	۰	۱	۱۷/۸۱	۱۳۷	۳۵	۳۵۰	۱۲۱۶	۱۷۵۵/۸۱	۹
۰	۳	۹	۰	۰	۳	۱۵/۲۹	۱۳۹	۵۴	۴۲۰	۱۳۳۸	۱۹۶۶/۲۹	۱۰

جدول (۷). هزینه‌های زنجیره‌تأمین در دوره‌های مختلف با ۳ خرده‌فروش

تعداد وسیله نقلیه مورد استفاده ازنوع (p) در تمام دوره‌ها						هزینه انتشار کربن در نگهداری	هزینه انتشار کربن در لجستیک	هزینه نگهداری موجودی	هزینه حمل‌ونقل	هزینه ثابت	هزینه کل	دوره برنامه (T)
۱	۲	۳	۴	۵	۶							
۰	۰	۲	۰	۰	۰	۳/۱۵	۲۱	۰	۶۱	۱۵۶	۲۴۱/۱۵	۱
۰	۰	۱	۰	۱	۰	۳/۹۲	۲۸	۱	۱۶۵	۳۱۳	۵۱۰/۹۲	۲
۰	۰	۲	۰	۲	۰	۴/۶۸	۳۶	۲	۲۳۲	۴۴۸	۷۲۲/۶۸	۳
۰	۰	۲	۰	۳	۰	۵/۲۸	۴۴	۱۱	۳۵۱	۵۹۴	۱۰۰۵/۲۸	۴
۰	۱	۱	۱	۴	۰	۶/۹	۴۶	۰	۴۲۹	۷۴۴	۱۲۲۵/۹	۵
۰	۱	۳	۰	۴	۰	۹/۲۳	۷۱	۵	۴۷۴	۹۰۰	۱۴۵۹/۲۳	۶
۰	۲	۲	۰	۵	۰	۹/۳۶	۷۸	۴۳	۶۲۴	۱۰۵۰	۱۸۰۴/۳۶	۷
۰	۰	۶	۰	۵	۰	۱۵/۳	۱۰۲	۴۸	۶۴۹	۱۱۹۸	۲۰۱۲/۳	۸
۰	۰	۴	۰	۷	۰	۱۱/۹۶	۹۲	۱۷	۸۰۴	۱۳۳۴	۲۲۵۸/۹۶	۹
۰	۰	۴	۳	۰	۰	۱۲/۵۴	۱۱۴	۲۵	۸۲۵	۱۴۷۸	۲۴۵۴/۵۴	۱۰

این بدان معنی است که ترجیح داده می‌شود از وسایل نقلیه مختلف با استاندارد پایین استفاده شود، مگر انکه هزینه کل را نتوان به حداقل رساند. علاوه‌بر این، وزن و حجم محصولات در انتخاب نوع وسیله نقلیه بسیار مهم است. به‌عنوان مثال، زمانی که ما دو خرده‌فروش در $T = 2$ از یک وسیله نقلیه نوع یک و سه وسیله نقلیه از نوع ۳ داریم، در $T = 3$، به‌جای یک وسیله نقلیه نوع ۳ از یک وسیله نقلیه نوع ۴ و یک وسیله نقلیه نوع ۵ به‌جای نوع ۱ استفاده شده است. بنابراین، حتی اگر هزینه ثابت وسایل نقلیه افزایش یابد، منجربه کاهش انتشار کربن می‌شود. با افزایش تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی، تمایل به استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت بالاتر افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در سناریوهای $T = 1$ و $T = ۲$، که دو خرده‌فروش داریم و $T = 1$ زمانی‌که سه خرده‌فروش داریم، انواع وسایل نقلیه ۵ و ۶ استفاده نمی‌شوند، و برای سایر سناریوها، با افزایش مدت‌زمان برنامه‌ریزی، وسایل نقلیه با ظرفیت بالاتر بیشتر استفاده خواهند شد. نتایج نشان می‌دهند که کمتر از ۱۰٪ از هزینه‌های کل در تمامی دوره‌های زمانی برای دو سناریو (دو یا سه خرده‌فروش) به هزینه‌های انتشار کربن اختصاص دارد.

طبق جداول (۵) و (۶)، اگر بخواهیم طوری برنامه‌ریزی کنیم که هزینه‌های انتشار کربن باتوجه‌به هزینه کل زنجیره به حداقل خود برسد، در سناریوی دو خرده‌فروش زمانی‌که $T = 4$ است، با این وضعیت مواجه می‌شویم (مقدار هزینه کربن ۵٪ از هزینه‌های کل است). در سناریوی سه خرده‌فروش، در $T = 5$، هزینه کربن ۳/۷٪ از هزینه‌های کل است. بنابراین، برای کاهش هزینه‌های انتشار کربن در زنجیره‌تأمین در سناریوی دو خرده‌فروش، منطقی‌تر است که چهار دوره برنامه‌ریزی داشته باشیم؛ و در سناریوی سه خرده‌فروش، پنج دوره بهترین برنامه است.

۵. آنالیز حساسیت

در آنالیز حساسیت به‌منظور سنجیدن تأثیر تغییرات در وزن و حجم محصولات، ۱۸ حالت برای دو یا سه خرده‌فروش درنظر گرفته شده است که در جدول (۷) و (۸)، مشاهده می‌شود.

طبق جدول (۷) در حالت دو خرده‌فروش، درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها در مدل مسأله درحالتی‌که وزن و حجم محصولات به‌صورت $(w_i, 2v_i)$ باشد، ۳/۸۷ است که کمینه مقدار هزینه انتشار کربن می‌باشد. بیشینه درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها در این حالت برابر با ۱۱/۵ است؛ درحالتی که وزن و حجم محصولات برابر با $(w_i \text{ و } v_i)$ است. در جدول (۸) و در حالت ۳ خرده‌فروش، درحالتی که وزن و حجم محصولات به‌صورت $(w_i, 2v_i)$ است، کمینه درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها برابر با ۴/۷۲ است. حالت بیشینه درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها، برابر با ۸/۸۴ است؛ درصورتی‌که وزن و حجم محصولات در حالت $(0.5w_i, 0.5v_i)$ باشد.

برای داشتن درک عمیق‌تر از نقش مالیات انتشار کربن در$(J,T)=$ $(۵,۲)$ و $(J,T) = (۵,۳)$، نرخ مالیات افزایش یافته است؛ و نتایج هزینه‌های انتشار کربن در بخش‌های نگهداری و لجستیک، هزینه کل و تعداد و نوع وسایل نقلیه در جدول (۹) نشان داده شده است. طبق جدول (۹)، با افزایش نرخ مالیات، هزینه کل و هزینه انتشار کربن افزایش می‌یابد و سطح انتشار کربن در بخش‌های نگهداری و لجستیک زنجیره‌تأمین کاهش می‌یابد. در $(J,T)=(۲,۵)$ ، با افزایش نرخ مالیات، مقدار کربن منتشر شده در بخش لجستیک از ۱۰۲۰ کیلوگرم به ۷۱۱ کیلوگرم کاهش می‌یابد و در بخش نگهداری از ۱۵۳ به ۱۰۸/۹۲ کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش، استفاده از وسایل نقلیه‌ای است که استانداردهای بالاتری دارند است. در $(J,T) = (۵,۳)$ افزایش دو برابری نرخ مالیات تأثیری بر انتشار کربن در بخش لجستیک ندارد، اما در بخش نگهداری از ۱۰۸/۹۴ به ۱۰۰/۵۶ کاهش یافته است. اگر نرخ انتشار کربن پنج برابر افزایش یابد، نرخ انتشار کربن در دو بخش نگهداری و لجستیک کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش نرخ مالیات، وسایل نقلیه کم‌آلاینده‌تر استفاده خواهند شد.

جدول (۸). آنالیز حساسیت در حالت ۲ خرده‌فروش

درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها	هزینه انتشار کربن در بخش نگهداری	هزینه انتشار کربن در لجستیک	هزینه نگهداری موجودی	هزینه حمل	هزینه ثابت	هزینه کل	وزن و حجم محصولات
۱۱/۱۵	۵/۸۵	۳۹	۱،۵	۵۶	۳۰۰	۴۰۲/۳۵	$(w_i \text{ و } v_i)$
۳/۹۵	۲/۲۴	۱۶	۱۰	۱۴۱	۲۹۲	۴۶۱/۲۴	$(2w_i \text{ و } v_i)$
۳/۸۷	۲/۳۴	۱۸	۱۸	۱۱۷	۳۷۰	۵۲۵/۳۴	$(w_i \text{و} 2v_i)$
۵/۰۱	۲/۶۴	۲۴	۱۸	۱۱۷	۳۷۰	۵۳۱/۶۴	$(2w_i \text{و} 2v_i)$
۸/۲۴	۲/۷۶	۲۳	۰	۶۵	۲۲۲	۳۱۲/۷۶	$(0.5w_i \text{ و } v_i)$
۱۰/۷۳	۳/۹	۳۹	۱	۵۶	۳۰۰	۳۹۹/۹	$(w_i \text{و} 0.5v_i)$
۹/۲	۲/۴۷	۱۹	۰	۵۶	۱۵۶	۲۳۳/۴۷	$(0.5w_i \text{و} 0.5v_i)$
۴/۹۲	۲/۵۳	۲۳	۲۲	۹۱	۳۸۰	۵۱۸/۵۳	$(0.5w_i \text{و} 2v_i)$
۳/۸۹	۱/۹۲	۱۶	۱۰	۱۴۱	۲۹۲	۴۶۰/۹۲	$(2w_i \text{ و } 0.5v_i)$

جدول (۹). آنالیز حساسیت در حالت ۳ خرده‌فروش

درصد هزینه انتشار کربن به کل هزینه‌ها	هزینه انتشار کربن در بخش نگهداری	هزینه انتشار کربن در لجستیک	هزینه نگهداری موجودی	هزینه حمل	هزینه ثابت	هزینه کل	وزن و حجم محصولات
۶/۳	۴/۲	۲۸	۱/۳	۱۶۵	۳۱۳	۵۱۱/۵	$(w_i$ و $v_i)$
۴/۹	۴/۴۸	۳۲	۰/۲	۱۸۵	۵۲۳	۷۴۴/۶۸	$(2w_i$ و $v_i)$
۵/۳۷	۴/۸۱	۳۷	۳/۶	۲۰۰	۵۳۳	۷۷۸/۴۱	$(w_i$و$2v_i)$
۴/۷۲	۳/۷۴	۳۴	۱/۳	۲۳۷	۵۲۳	۷۹۹/۰۴	$(2w_i$و$2v_i)$
۷/۷۴	۳/۸۴	۳۲	۱۱/۳	۱۰۴	۳۱۲	۴۶۳/۱۴	$(0.5w_i$ و $v_i)$
۶/۰۴	۲/۸	۲۸	۱/۳	۱۶۵	۳۱۳	۵۱۰/۱	$(w_i$و$0.5v_i)$
۸/۸۴	۳/۷۷	۲۹	۰	۱۰۴	۲۳۴	۳۷۰/۷۷	$(0.5w_i$و$0.5v_i)$
۵/۲	۳/۹۶	۳۶	۵/۲	۱۸۱	۵۴۲	۷۶۸/۱۶	$(0.5w_i$و$2v_i)$
۴/۸۲	۳/۸۴	۳۲	۰/۲	۱۸۵	۵۲۳	۷۴۴/۰۴	$(2w_i$ و $0.5v_i)$

جدول (۱۰). اثر مالیات بر روی انواع هزینه‌های زنجیره‌تأمین

تعداد وسیله نقلیه مورد استفاده ازنوع (p) در تمام دوره‌ها							نسبت هزینه انتشار کربن به هزینه کل	مقدار انتشار کربن در لجستیک	مقدار انتشار کربن در نگهداری	هزینه انتشار کربن	هزینه کل	نرخ مالیات	(J,T)
۰	۲	۰	۴	۰	۰	۰	۶/۷۳	۱۰۲۰	۱۵۳/۱۱	۶۴,۴	۹۵۷	نرخ فعلی	(۵و۲)
۰	۳	۰	۲	۰	۰	۰	۹/۷۸	۷۷۸	۱۰۸/۹۲	۹۸,۰۴	۱۰۰۲	دو برابر نرخ فعلی	
۰	۳	۲	۰	۰	۰	۰	۱۹/۵۵	۷۱۱	۸۵/۳۲	۲۱۹,۵۲	۱۱۲۳	پنج برابر نرخ فعلی	
۰	۴	۱	۱	۰	۰	۰	۴/۲۶	۸۳۸	۱۰۸/۹۴	۵۱/۹۸	۱۲۱۹	نرخ فعلی	(۵و۳)
۰	۴	۱	۱	۰	۰	۰	۸/۱۵	۸۳۸	۱۰۰/۵۶	۱۰۳/۰۴	۱۲۶۵	دو برابر نرخ فعلی	
۰	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴/۹۷	۶۵۸	۹۸/۷	۲۰۸/۱۵	۱۳۹۰	پنج برابر نرخ فعلی	

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

پژوهش حاضر به بررسی جامع مدیریت زنجیره‌تأمین سبز پرداخته است. در این تحقیق، مدل جامع حمل‌ونقل-موجودی در یک زنجیره‌تأمین چندمحصولی و چنددوره‌ای توسعه یافته است که انتشار کربن را درنظر می‌گیرد. این مدل به‌صورت یک مسأله برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط فرموله شده که در آن یک تأمین‌کننده تقاضای گروهی از خرده‌فروشان را تأمین می‌کند تا عناصر زنجیره‌تأمین را هماهنگ کند. وسایل نقلیه ناهمگن درنظر گرفته شده و تأمین‌کننده براساس تقاضای خرده‌فروشان در هر دوره زمانی، نوع و تعداد وسایل نقلیه، و مقدار محصولات ارسالی به هر خرده‌فروش تصمیم‌گیری می‌کند. مدل پیشنهادی ابتدا به‌صورت یک مدل غیرخطی صحیح مختلط ارائه شد که بعداً خطی‌سازی شده است. مسأله با استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نرخ مالیات بر انتشار کربن، میزان انتشار کربن کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، با افزایش ۱۰٪ نرخ مالیات، میزان انتشار کربن تا ۱۲٪ کاهش می‌یابد، اما هزینه‌های کلی تا ۱۵٪ افزایش می‌یابد. وزن و حجم محصولات تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین دارند. افزایش ۵۰٪ در وزن محصولات می‌تواند منجربه افزایش ۲۰٪ در هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین شود. افزایش تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی از یک به چهار، منجربه افزایش ۱۵٪ در هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین می‌شود. بااین‌حال، هزینه‌های انتشار کربن به‌تدریج کاهش می‌یابد. در سناریوی دو خرده‌فروش، زمانی‌که تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی به چهار می‌رسد، هزینه‌های انتشار کربن به ۵٪ از هزینه‌های کل کاهش می‌یابد. در سناریوی سه خرده‌فروش، این مقدار در دوره پنجم به ۷/۳٪ کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت بهینه زنجیره‌تأمین با درنظر گرفتن هزینه‌های انتشار کربن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی را بهبود بخشد. استفاده از وسایل نقلیه کم‌آلاینده، افزایش تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی، و بهینه‌سازی وزن و حجم محصولات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های کلی و انتشار کربن داشته باشد. این پژوهش ابزارهای مهمی را برای مدیران زنجیره‌تأمین فراهم می‌کند تا تصمیمات استراتژیک و عملیاتی خود را

با درنظر گرفتن اهداف پایداری اتخاذ کنند. برای بهبود پژوهش حاضر، بررسی تأثیرات سیاست‌های دولتی مانند افزایش مالیات بر کربن و ارائه یارانه برای وسایل نقلیه کم‌آلاینده می‌تواند به توسعه مدل‌های بهینه‌تری برای زنجیره‌تأمین سبز کمک کند. همچنین، انجام مطالعات موردی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، الکترونیک، و مواد غذایی می‌تواند نتایج پژوهش را برای کاربردهای عملی‌تر و گسترده‌تر تقویت کند. بررسی تأثیر تکنولوژی‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IoT) و بلاک‌چین بر مدیریت زنجیره‌تأمین سبز و کاهش هزینه‌های انتشار کربن نیز می‌تواند به بهبود پژوهش حاضر کمک کند.

مراجع

[1] Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International journal of management reviews*, *9*(1), 53-80. https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x

[2] Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. H. (2007). Green supply chain management: pressures, practices and performance within the Chinese automobile industry. *Journal of cleaner production*, *15*(11-12), 1041-1052. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.021

[3] Xie, D., Qiu, Y., & Huang, J. (2024). Multi-objective optimization for green logistics planning and operations management: From economic to environmental perspective. *Computers & Industrial Engineering*, *189*, 109988. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109988

[4] Ramudhin, A., Chaabane, A., & Paquet, M. (2010). Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5(1), 30-38. https://doi.org/10.1080/17509653.2010.10671088

[5] Neto, J. Q. F., Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Nunen, J. A., & van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International journal of production economics*, 111(2), 195-208. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.014

[6] Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study. *Journal of cleaner production*, *278*, 123199. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123199

[7] Firouzi, F., & Jadidi, O. (2021). Multi-objective model for supplier selection and order allocation problem with fuzzy parameters. *Expert Systems with Applications*, *180*, 115129. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115129

[8] Huang, Y., Wang, K., Zhang, T., & Pang, C. (2016). Green supply chain coordination with greenhouse gases emissions management: a game-theoretic approach. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2004-2014. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.137

[9] Paksoy, T., Bektaş, T., & Özceylan, E. (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *47*(4),532-546. https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.001

[10] Kumari, M., De, P. K., Narang, P., & Shah, N. H. (2023). Integrated optimization of inventory, replenishment, and vehicle routing for a sustainable supply chain utilizing a novel hybrid algorithm with carbon emission regulation. *Expert Systems with Applications*, 220, 119667. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119667

[11] Ardliana, T., Pujawan, I. N., & Siswanto, N. (2022). A mixed-integer linear programming model for multiechelon and multimodal supply chain system considering carbon emission. *Cogent Engineering*, 9(1), 2044589. https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2044589

[12] Lu, Y., & Li, S. (2023). Green transportation model in logistics considering the carbon emissions costs based on improved grey wolf algorithm. *Sustainability*, 15(14), 11090. https://doi.org/10.3390/su151411090

[13] Golpîra, H., & Javanmardan, A. (2022). Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain considering carbon emission schemes. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 640-656. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.028

[14] Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E., & Benyettou, A. (2021). The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691

[15] Wangsa, I. D., Vanany, I., & Siswanto, N. (2023). A sustainable supply chain coordination model with an investment in green technology and electric equipment. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10(1), 2221078. https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2221078

[۱۶] حمدی اصل, عبدالرضا, عموزادخلیلی, حسین, توکلی‌مقدم, رضا, & حاجی آقایی, مصطفی. (۱۴۰۰). «بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین خرما». *نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید*, ۹(۱۹), ۱۵۳-۱۳۷. https://doi.org/10.22084/ier.2022.26317.2091

- Hamdi Asl, A., Amozad Khalili, H., Tookli Moghaddam, R., & Haji Aghaei, M. (2022). Multi-objective Optimization in the Date Supply Chain Network Design. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 9(19), 137-153. https://doi.org/10.22084/ier.2022.26317.2091 (in persion)

[۱۷] عبداله زاده, سهراب, & عاصم فرزانه, زهرا. (۱۴۰۲). «مدل ریاضی برای بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین سبز با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی». *نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید*, ۱۱(۲۲), ۱۰۹-۹۷. https://doi.org/10.22084/ier.2023.27680.2124

-Abdollazadeh, S., & Asem Farzaneh, Z. (2023). A Mathematical Model for Improving Green Supply Chain Performance Using the Concept of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 11(22), 97-109. https://doi.org/10.22084/ier.2023.27680.2124 (in persion)

[18] Eydi, A., & Hashem Bagheney, S. (2024). Impact of carbon emissions regulation on producer and consumer transportation decisions in green supply chain design under uncertainty. *Soft Computing*, 1-23. https://doi.org/10.1007/s00500-024-09867-w

[19] Derakhti, A., & Gonzalez, E. D. S. (2024). A bi-objective optimization approach for carbon capture and storage supply chain network combining with pricing policies: Economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139672. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139672

[20] Xu, Z., Pokharel, S., & Elomri, A. (2023). An eco-friendly closed-loop supply chain facing demand and carbon price uncertainty. *Annals of Operations Research*, 320(2), 1041-1067. https://doi.org/10.1007/s10479-021-04499-x

[۲۱] قهرمانی نهر, جاوید, قدرت نما, علی, ایزد بخش, حمید رضا, & توکلی مقدم, رضا. (۱۳۹۷). «طراحی یک شبکه زنجیره تأمین

سبز چند هدفه چند محصولی و چند دوره ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت». *نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید*, ۶(۱۳), ۱۳۷-۱۱۹. https://doi.org/10.22084/ier.2017.8877.1421

- Qahremani Nahar, J., Ghodrati Nima, A., Eizadbakhsh, H. R., & Tookli Moghaddam, R. (2018). Design of multi-objective multi-product multi period green supply chain network with considering discount under uncertainty. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 6(13), 119-137. https://doi.org/10.22084/ier.2017.8877.1421 (in persion)

[22] Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision support systems*, 54(4), 1513-1520. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053

[23] Fu, C., Liu, Y. Q., & Shan, M. (2023). Drivers of low-carbon practices in green supply chain management in construction industry: An empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139497. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139497

[24] Benjaafar, S., Li, Y., & Daskin, M. (2012). Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 10(1), 99-116. https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203304

[25] Tavana, M., Tohidi, H., Alimohammadi, M., & Lesansalmasi, R. (2021). A location-inventory-routing model for green supply chains with low-carbon emissions under uncertainty. *Environmental science and pollution research*, 28(36), 50636-50648. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13815-8

[26] Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions. *International journal of production Economics*, 115(2), 316-335. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.05.011

[27] Ubeda, S., Arcelus, F. J., & Faulin, J. (2011). Green logistics at Eroski: A case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 44-51. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.041

[28] Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J., & Rekik, Y. (2014). Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach. *International Journal of Production Economics*, 157, 80-88. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.09.005

[29] Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120025. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025

[30] Eslamipoor, R. (2023). An optimization model for green supply chain by regarding emission tax rate in incongruous vehicles. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 227-238. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01470-y

[31] Zadek, H., & Schulz, R. (2010). Methods for the calculation of CO 2 emissions in logistics activities. In Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics: 8th International Heinz Nixdorf Symposium, IHNS 2010, Paderborn, Germany, April 21-22, 2010. Proceedings (pp. 263-268). *Springer Berlin Heidelberg*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5_24

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2024, Volume 12., No. 24., pp. 77-91
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29726.2179

A Green Supply Chain Model Integrating Carbon Emission Costs in Transportation and Storage Using Heterogeneous Vehicles

Mahdi Nakhaeinejad[1*], Mohammad Mahzoon[2], Milad Saleki[3]

[1] Associate Professor of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
[2] PhD Candidate in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
[3] PhD Candidate in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 5 May 2024
Accepted 19 August 2024

***Keywords*:**

Green Supply Chain Management
Transportation Planning
Carbon Emissions
Inventory Management

ABSTRACT

Amid growing environmental concerns and stringent regulatory requirements, Green Supply Chain Management (GSCM) has emerged as an essential strategic approach for organizations. This study introduces an advanced optimization model that incorporates carbon emission costs in both transportation and product storage, utilizing heterogeneous vehicle fleets. The proposed model integrates inventory and transportation decisions while considering both environmental and economic impacts, with the objective of optimizing energy consumption and resource allocation across the supply chain. This research formulates and evaluates a multi-product, multi-period optimization framework within the context of GSCM, specifically aimed at minimizing carbon emissions. Initially developed using Mixed-Integer Non-Linear Programming (MINLP), the model is subsequently linearized into a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) formulation. It includes various cost factors, such as carbon emission costs in transportation and product storage. The findings demonstrate that increasing the carbon tax rate significantly reduces carbon emissions but concurrently elevates overall supply chain costs. While extending the planning horizon increases overall and transportation costs, inventory holding costs and carbon emissions from logistics and storage remain relatively stable. By presenting a comprehensive optimization framework, this study provides supply chain managers with a robust decision-making tool to mitigate carbon emissions and promote both environmental and economic sustainability.

[*] Corresponding author. M. Nakhaeinejad
Tel.:035-31233819; E-mail address: m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir