مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۱-۳۲، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۵۹-۶۹

Original Article

برنامه‌ریزی یک‌پارچه‌ی حمل‌ونقل و موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین با در نظرگرفتن انتشار کربن

سید حسام‌الدین انوار*(دانشجوی دکتری)
احمد صادقیه (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد
سید علی ترابی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع دانشگاه تهران
محمدعلی وحدت‌زاد (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

در این مقاله با لحاظ کردن انتشار کربن، مدلی جهت برنامه‌ریزی یک‌پارچه‌ی حمل‌ونقل و موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین چندکالایی چند دوره زمانی توسعه داده شده است که در آن یک تأمین‌کننده نیازگروهی از خرده‌فروش‌ها را با هدف ایجاد هماهنگی بین اعضای زنجیره تأمین می‌کند. ناوگان وسایل نقلیه ناهمگن در نظرگرفته شده و تأمین‌کننده با توجه به تقاضای خرده‌فروش‌ها در هر دوره زمانی در رابطه با وزن و حجم محموله، تعداد و نوع وسیله‌ی نقلیه و میزان کالای ارسالی از هر نوع به هریک از خرده‌فروش‌ها در زنجیره، تصمیم‌گیری می‌کند. مدل ارائه شده به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط بوده که ابتدا خطی شده و سپس به‌منظور ارزیابی آن، مثال‌هایی با اعداد دنیای واقعی و در ابعاد کوچک و متوسط حل شده است. در آخر با توجه به سناریوهای مختلف، نتایج مورد بحث و بررسی قرارگرفته و بینش‌های مدیریتی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین سبز، انتشار کربن، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، مدیریت موجودی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، وسایل نقلیه‌ی ناهمگن، مدیریت ناوگان.

anvar@stu.yazd.ac.ir
sadegheih@yazd.ac.ir
satorabi@ut.ac.ir
mvahdat@yazd.ac.ir

۱. مقدمه

تأثیرمخرب تولید روزافزون گازهای گلخانه‌یی حاصل از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و حمل‌ونقل بر محیط زیست، به‌ویژه گرمایش زمین، توجه پژوهش‌گران صنعت و دانشگاه را به این موضوع جلب کرده است. با توجه به گستردگی و تنوع فعالیت‌ها در زنجیره‌ی تأمین، مدل‌سازی عوامل زیست‌محیطی درکنار سایر عوامل اقتصادی در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده است. یک‌پارچه‌سازی تفکر زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین «مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز» نامیده‌شده و آن عبارت است از طراحی محصول، انتخاب تولیدکننده و منابع مواد، فرایند تولید، بسته‌بندی محصول، تحویل محصول به مشتری، و درانتها بازیافت یا امحاء آن.[۱] دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌یی است که در سال‌های اخیر انتشار آن ۵۰٪ بیشتر از سال ۱۹۹۰ میلادی ــ سال مبنا در پروتکل کیوتو ــ بوده و به سرعت در حال افزایش است. در حالی که طبق این پروتکل باید تا سال ۲۰۵۰ میلادی این میزان کم‌تر از نصف سطوح سال ۱۹۹۰ شود، تا به احتمال ۵۰٪ افزایش دمای جهانی در حد $2^{\circ}C$ حفظ شود.[۲] بنابراین بسیاری از بنگاه‌ها حرکت به سمت سبز کردن فعالیت‌های زنجیره‌ی تأمین‌شان را آغاز کرده‌اند.[۳]

طراحی زنجیره‌های تأمین با توجه به شاخص‌های اقتصادی از دیرباز مورد توجه محققین قرار داشته، ولی به‌تازگی لحاظ کردن موضوعات زیست‌محیطی در کنار آن‌ها نیز مورد توجه واقع شده است.[۴] در اکثر کارهای انجام‌شده در این حوزه، بهینه‌سازی چندهدفه مد نظر قرارگرفته است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفه به‌منظور طراحی شبکه‌ی لجستیکی در صنعت کاغذ با لحاظ‌کردن عوامل زیست‌محیطی به‌منظور بهینه‌سازی جریان فیزیکی کالا توسعه یافته است.[۵] همچنین یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی دوهدفه برای طراحی شبکه ارائه شده[۶] که انتشار کربن و هزینه‌های احتمالی آن را در صنعت فولاد با توجه به اعمال محدودیت‌های قانونی در این بخش تحلیل می‌کند. محققین دیگری نیز یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای طراحی زنجیره‌ی تأمین سبز با تمرکز بر عوامل مربوط به سطح استراتژیکی ارائه کردند.[۷] آنان همچنین یک مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفه با در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۹/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۲۰.

نظرگرفتن عوامل زیست‌محیطی و اقتصادی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین ارائه و آن را به کمک برنامه‌ریزی خطی فازی متقارن حل کردند.[۴] در ادامه یک مدل برنامه‌ریزی خطی دوهدفه برای طراحی زنجیره‌ی تأمین با توجه به برنامه‌ی مبادله‌ی انتشارات و انتخاب صنعت آلومینیوم به‌عنوان مطالعه‌ی موردی ارائه شد.[۸] سپس محققین یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه را به‌منظور طراحی یک زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته توسعه دادند[۹] و آن را با در نظرگرفتن میزان انتشارکربن به‌عنوان یکی از توابع هدف، به‌کمک تکنیک‌های بهینه‌سازی فازی به‌همراه یک مثال عددی حل کردند. با هدف کاهش هزینه‌های کربن در سرتاسر زنجیره‌ی تأمین و تمرکز بر منبع‌یابی محیطی و تدارکات سبز ــ که با کمک روش ارزیابی دوره عمر انجام شده ــ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط نیز ارائه شد.[۱۰]

درکنار طراحی سبز زنجیره‌ی تأمین، کارهایی درخصوص بهینه‌سازی تصمیمات عملیاتی با تمرکز بر انتشارکربن در زنجیره‌ی تأمین انجام شده و پژوهش‌گران کاهش هزینه‌های مربوط به گازهای گلخانه‌یی را در سطوح تاکتیکی و عملیاتی زنجیره‌ی تأمین مد نظر قرار داده‌اند. با بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی حمل‌ونقل براساس شبکه‌ی زمان ـ مکان[۱۱] مدلی برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و انتشارکربن در طی فرایند توزیع به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شد. محققین مسئله‌ی حمل‌ونقل تحت برنامه‌ی مبادله‌ی انتشارکربن را به‌کمک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم ژنتیک توسعه دادند[۱۲] و نشان دادند که استفاده از الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی شبکه‌ی حمل‌ونقل با لحاظ کردن انتشارکربن امکان‌پذیر است. بررسی یک مدل بازپرسازی برای یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی، با در نظر گرفتن سیاست‌های مختلف کنترل انتشارکربن[۱۳] نشان داد که کاهش انتشارکربن بدون صرف مبالغ بالا و با به‌کارگیری سیاست‌های کنترلی امکان‌پذیر است. همچنین بررسی یک مدل ساده‌ی تعیین اندازه‌ی انباشته در زنجیره‌ی تأمین، با لحاظ کردن سیاست‌های مختلف در راستای کنترل انتشارکربن[۱۴] نشان داد که با تصمیم‌گیری عملیاتی صحیح، می‌توان هزینه‌های ناشی از انتشارکربن را به‌طور چشمگیر کاهش داد.

مدیریت موجودی توسط فروشنده[۱]، سیاستی جهت بازپرسازی موجودی در زنجیره‌ی تأمین است که با بهره‌گیری از تکنولوژی اطلاعات فراهم شده است. این سیاست تأمین‌کنندگان را قادر می‌سازد تا با آگاهی از تقاضای مشتریان نهایی بتوانند درمورد سطح موجودی، میزان کالای ارسالی و زمان تحویل آن‌ها به خرده‌فروشان تصمیم‌گیری کنند. این امر سبب هماهنگی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و مدیریت موجودی در زنجیره‌ی تأمین شده و مزایای آن در مطالعه‌یی که توسط محققین انجام‌شد[۱۵] به تفصیل آمده است.

مسیریابی وسایل نقلیه از جمله مسائلی است که با لحاظ کردن گازهای گلخانه‌یی مدل‌سازی شده است. محققین مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه را، شامل انتشار کربن و با یک تابع هدف مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و نیز مطالعه‌ی موردی در زمینه‌ی توزیع مواد غذایی ارائه کردند.[۱۶] آنان مدلی برای مسئله‌ی مسیریابی و موجودی ارائه کردند که تأثیر زیست‌محیطی و اقتصادی تصمیم‌گیری در ارتباط با مسیریابی را در یک مطالعه‌ی موردی از صنعت پتروشیمی تحت سیاست مدیریت موجودی توسط فروشنده بررسی می‌کند.[۱۷] مطالعه‌ی آن‌ها با استفاده از وسایل نقلیه‌ی همگن بوده و نشان داده‌اند می‌توان هم‌زمان هزینه‌های حمل‌ونقل و انتشارکربن را کاهش داد. در آن مطالعه، به‌منظورکاهش مصرف سوخت، مسئله‌ی مسیریابی به مسئله‌ی مسیریابی با مسیرهای چندگانه توسعه یافت[۱۸] و با توجه به میزان انتشارکربن انتخاب مسیر انجام شد ــ با رعایت این فرض که میزان درخواست مشتریان همواره کم‌تر از ظرفیت وسایل نقلیه است و توسط چند وسیله‌ی نقلیه قابل ارسال نیست. در ادامه، محققین مسئله‌ی مسیریابی و موجودی چندکالایی چند دوره زمانی ــ شامل یک کارخانه و چند تأمین‌کننده ــ را با فرض امکان حمل‌ونقل بین گره‌ها و انتشارکربن[۱۹] بررسی و نشان دادند که با این پیش‌فرض می‌توان مسیر پیموده شده توسط وسیله‌ی نقلیه راکاهش داد. محققین با انجام مطالعه‌یی جامع در ارتباط با مسئله‌ی مسیریابی سبز وسایل نقلیه[۲۰] تأکید کردند که بیشتر پژوهش‌ها در این حوزه وسایل نقلیه‌ی همگن را مد نظر قرار داده و شکافی در زمینه‌ی استفاده از وسایل نقلیه‌ی ناهمگن وجود دارد.

اگرچه روند مطالعات در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین سبز رو به افزایش است، بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که در بین ۳۰۰ مقاله‌ی منتشره در ۱۵ سال اخیر، فقط ۱۲ درصد از مدل‌های کمی در این حوزه بهره گرفته‌اند و تعداد بسیارکمی از آن‌ها تأثیرگازهای گلخانه‌یی را لحاظ کرده‌اند.[۲۱] بیشتر پژوهش‌ها در این حوزه، انتشارکربن را در مسائل طراحی زنجیره‌ی تأمین و مسیریابی وسایل نقلیه در نظر گرفته‌اند. همچنین از نظر سطح برنامه‌ریزی در زنجیره‌ی تأمین، عمده‌ی پژوهش‌ها به سطح استراتژیک پرداخته‌اند و کم‌تر در سطوح تاکتیکی و عملیاتی و بهبود وضعیت موجود از نظر عملکرد زیست‌محیطی زنجیره‌ی تأمین تحقیقی انجام شده است. یکی از مسائلی که تاکنون کم‌تر در ادبیات موضوع به آن پرداخته شده است، لحاظ کردن هزینه‌ی کربن درکنار سایر هزینه‌های عملیاتی زنجیره‌ی تأمین به‌منظور هماهنگی تصمیمات حمل‌ونقل و موجودی است. این پژوهش قصد دارد که به مسئله‌ی هماهنگی موجودی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و مدیریت ناوگان در سطح تاکتیکی و عملیاتی در زنجیره‌ی تأمین بپردازد. بدین منظور با در نظرگرفتن مدل ارائه شده توسط مهرجردی و انوار[۲۲] به‌عنوان مدل پایه (هماهنگی موجودی و حمل‌ونقل)، آن را چنین بسط داده‌اند:

۱. معمولاً در مقالات یک ظرفیت مشخص براساس تعداد محصول یا وزن برای وسایل نقلیه در نظر می‌گیرند. در این تحقیق برای اولین بار وزن و حجم برای هر محصول مشخص شده و ظرفیت وسایل نقلیه به‌صورت حجمی و وزنی در نظرگرفته شده و محدودیت‌های وزنی و حجمی به‌دلیل نزدیکی به آنچه در دنیای واقعی وجود دارد، به مدل اضافه شده است.

۲. در اکثر مقالات قبلی، ناوگان وسایل نقلیه همگن در نظرگرفته شده است. در این تحقیق از وسایل نقلیه‌ی ناهمگن در حوزه‌ی مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز استفاده شده و درکنار برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، مدیریت ناوگان نیز انجام خواهد شد.

۳. در تمامی مقالات و تحقیقاتی که تاکنون انجام‌شده[۱۶و۲۳-۲۵] برای محاسبات میزان انتشارکربن، وزن وسیله‌ی نقلیه به‌طور مستقیم در مدل آورده نشده و در حالات خاص همچون بدون بار، متوسط بار و ظرفیت تکمیل محاسبات انجام شده است. در این تحقیق برای اولین بار عامل انتشارکربن به‌صورت پویا در نظرگرفته شده و با توجه به نوع ماشین و وزن بار حمل شده در هر دوره زمانی متغیر خواهد بود. همچنین، تحقیق حاضر یک مدل کمی را به‌منظور مدیریت انتشارکربن در سطوح تاکتیکی و عملیاتی زنجیره‌ی تأمین ارائه می‌کند. بدین منظور در بخش دوم، تعریف مسئله‌ی هماهنگی موجودی و حمل‌ونقل ارائه شده و در بخش سوم با لحاظ‌کردن انتشارکربن به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی می‌شود. بخش چهارم به حل مسئله و ارائه‌ی چند سناریو و بحث و بررسی نتایج اختصاص دارد. و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه می‌شود.

۲. مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و موجودی

مسئله‌ی مورد بررسی در این پژوهش، مسئله‌ی هماهنگی توزیع و موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی چندکالایی با چند دوره زمانی شامل یک تأمین‌کننده و چند خرده‌فروش است که ملاحظات زیست‌محیطی را علاوه بر سایر معیارهای مرسوم عملکرد زنجیره‌ی تأمین در نظر می‌گیرد. تأمین‌کننده در فاصله‌ی نسبتاً دوری از خرده‌فروش‌ها قرارگرفته، به‌طوری‌که فاصله‌ی خرده‌فروش‌ها از تأمین‌کننده ثابت است. علاوه بر این، خرده‌فروش‌ها در یک منطقه‌ی جغرافیایی با فاصله‌های تقریباً یکسان از هم قرارگرفته‌اند و می‌توان فرض کرد که فاصله‌ی بین آن‌ها هم تقریباً ثابت است. میزان تقاضای خرده‌فروش‌ها پویاست ولی تأمین‌کننده به‌سبب سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده، پیشاپیش از آن آگاه است و موظف به تصمیم‌گیری در زنجیره‌ی تأمین است. تأمین‌کننده با توجه به اطلاع از میزان تقاضای خرده‌فروش‌ها از قبل مسئولیت تعیین اندازه‌ی محموله، تعداد و نوع کالای ارسالی و زمان ارسال آن‌ها به هر خرده‌فروش را بر عهده دارد. همچنین با توجه به ناوگان دراختیار، نوع وسیله‌ی نقلیه را با توجه به میزان ظرفیت حمل و میزان انتشارکربن آن در هر دوره زمانی تعیین می‌کند. هدف کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع شامل هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه و هزینه‌ی جابه‌جایی کالاها و نگه‌داری موجودی در خرده‌فروشی‌ها به همراه مدیریت ناوگان حمل‌ونقل است. بدین‌منظور مسئله‌ی هماهنگی موجودی و حمل‌ونقل ارائه شده توسط محققین[۲۲] با مفروضات ذیل تعمیم داده شده است:

۱. زنجیره‌ی تأمین چندکالایی است و تأمین‌کننده درمورد اندازه‌ی محموله‌ی ارسالی توسط هر وسیله‌ی نقلیه و میزان کالای تحویلی به هر خرده‌فروش و زمان تحویل آن تصمیم‌گیری می‌کند.

۲. طبق گزارش دفتر حمل‌ونقل و کیفیت هوای سازمان محیط‌زیست آمریکا، ۹۶ درصد گازهای گلخانه‌یی که در بخش حمل‌ونقل تولید می‌شود به دی اکسید کربن اختصاص دارد.[۲۶] بدین منظور برای در نظرگرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، میزان انتشارگاز دی اکسید کربن از وسایل نقلیه در مدل‌سازی آورده شده است.

۳. وسایل نقلیه‌ی ناهمگن از نظر ظرفیت حجمی و وزنی به تعداد کافی برای حمل تمام کالاها در هر دوره زمانی موجود است. همچنین میزان انتشار کربن آن‌ها متفاوت است که بر انتخاب نوع وسیله‌ی نقلیه توسط تأمین‌کننده تأثیر می‌گذارد و مدیریت ناوگان با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی انجام می‌گیرد.

۴. مسیر حرکت هر وسیله‌ی نقلیه از تأمین‌کننده به سمت خرده‌فروش‌هاست و در هر سفری که با وسیله‌ی نقلیه انجام می‌شود، می‌توان آن را به چند خرده‌فروش کالا تحویل داد و سپس به تأمین‌کننده برگرداند.

۵. هزینه‌ی حمل‌ونقل از دو بخش هزینه‌ی ثابت وسیله‌ی نقلیه (شامل دستمزد راننده، هزینه‌ی سوخت و تعمیر و نگه‌داری) و هزینه‌ی ثابت جابه‌جایی محصولات در خرده‌فروش‌ها هنگام تحویل آن‌ها تشکیل شده است.

۶. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی میزان کربن منتشره توسط وسایل نقلیه وجود دارد که به‌طورکلی به دو روش مبتنی بر فاصله و مبتنی بر سوخت تقسیم می‌شود.[۲۷] میزان کربن منتشره توسط یک وسیله‌ی نقلیه به عواملی همچون فنّاوری ساخت آن، نوع و کیفیت سوخت مصرفی، تعداد سال‌هایی که مورد استفاده قرارگرفته (عمر وسیله‌ی نقلیه)، متوسط سرعت، نوع جاده، ترافیک، وزن وسیله‌ی نقلیه و میزان بار آن، مسافت طی شده و شرایط آب و هوایی بستگی دارد.[۱۸،۲۵] در اینجا از روش مبتنی بر فاصله برای محاسبه‌ی میزان انتشارکربن استفاده شده است. در این روش، میزان انتشارکربن برابر با حاصل‌ضرب عامل انتشارکربن هر نوع وسیله‌ی نقلیه در مسافت طی شده است. همچنین عامل انتشارکربن با توجه به وزن محصول و نوع ماشین به‌صورت پویا تعریف شده است.

۳. مدل‌سازی مسئله با در نظرگرفتن انتشارکربن

در ابتدا پارامترها و متغیرهای مدل ارائه شده و سپس مدل مسئله به شکل یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط توسعه داده می‌شود.

الف) مجموعه‌ها

i: مجموعه انواع محصولات $(i = ۱, ۲, \ldots, I)$؛

j: مجموعه خرده‌فروش‌ها $(j = ۱, ۲, \ldots, J)$؛

p: مجموعه انواع وسایل نقلیه $(p = ۱, ۲, \ldots, P)$؛

k: مجموعه وسایل نقلیه $(k = ۱, ۲, \ldots, K)$؛

t: مجموعه دوره‌های زمانی $(t = ۱, ۲, \ldots, T)$.

ب) پارامترها

d_{ijt}: میزان تقاضای خرده‌فروش j برای محصول i در دوره زمانی t؛

h_{ijt}: هزینه‌ی واحد نگه‌داری موجودی محصول i در خرده‌فروش j در پایان دوره زمانی t (EUR)؛

A_p: هزینه‌ی ثابت حمل‌ونقل وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p (EUR)؛

L_{jp}: هزینه‌ی ثابت جابه‌جایی محصولات برای خرده‌فروش j وقتی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p آن را ملاقات می‌کند (EUR)؛

W_p: ظرفیت وزنی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p (kg)؛

V_p: ظرفیت حجمی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p ($m^۳$)؛

w_i: وزن محصول نوع i (kg)؛

v_i: حجم محصول نوع i ($m^۳$)؛

M: عدد خیلی بزرگ؛

dsr: متوسط مسافت بین تأمین‌کننده و خرده‌فروش‌ها (km)؛

drr: متوسط مسافت بین خرده‌فروش‌ها (km)؛

TX: مالیات انتشارکربن (EUR/kg $CO_۲$)؛

$E_p^{\min}$: کم‌ترین مقدار عامل انتشارکربن وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p (وقتی که وسیله‌ی نقلیه خالی باشد) (kg $CO_۲$/km)؛

$E_p^{\max}$: بیشترین مقدار عامل انتشارکربن وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع p (وقتی‌که وسیله‌ی نقلیه کاملاً پر باشد) (kg $CO_۲$/km).

ج) متغیرها

x_{ijpkt}: تعداد محصولات تحویلی نوع i به خرده‌فروش j توسط وسیله‌ی نقلیه kام از نوع p در دوره زمانی t؛

y_{pkt}: تعداد محصولات حمل شده توسط وسیله‌ی نقلیه kام از نوع p در دوره زمانی t؛

I_{ijt}: سطح موجودی انبار محصول i در خرده‌فروش j در پایان دوره زمانی t؛

X_{jpkt}: متغیر باینری که اگر $\sum_i x_{ijpkt} > ۰$ برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است؛

Y_{pkt}: متغیر باینری که اگر $\sum_i \sum_j x_{ijpkt} > 0$ برابر y_{pkt} برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است؛

n_{pkt}: تعداد خرده‌فروش‌های ملاقات شده توسط وسیله‌ی نقلیه kام از نوع pدر دوره زمانی t؛

E_{pkt}: مقدار عامل انتشارکربن وسیله‌ی نقلیه kام از نوع p در دوره زمانی t (kg CO_2/km)؛

Csr_t: میزان انتشارکربن در مسیر بین تأمین‌کننده و خرده‌فروش‌ها در دوره زمانی t؛

Crr_t: میزان انتشارکربن در مسیر بین خرده‌فروش‌ها در دوره زمانی t؛

Ce_t: میزان انتشارکربن در طول زنجیره‌ی تأمین در دوره زمانی t.

د) محاسبه‌ی عامل انتشارکربن در مدل

به باور محققین[۲۳] رابطه‌ی بین مصرف سوخت (FC)[۲] و میزان انتشار (ER)[۳] یک رابطه‌ی خطی مستقیم است، و نیز بین مصرف سوخت و میزان بار حمل شده توسط وسیله‌ی نقلیه رابطه خطی و مستقیم برقرارست.[۲۷] دراین تحقیق می‌خواهیم به‌جای محاسبه‌ی میزان انتشار از روی میزان مصرف سوخت، عامل انتشار را به‌صورت پویا تعریف کنیم و از آن طریق میزان انتشار را محاسبه کنیم. بدین منظور، با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که عامل انتشار با میزان بار حمل شده توسط وسیله‌ی نقلیه رابطه‌ی خطی و مستقیم دارد؛ لذا با فرض ثابت بودن سایر عوامل، رابطه‌ی ۱ برقرار است:

$$EF_{net\ load} = EF_{empty} + (EF_{full} - EF_{empty}) (\text{load weight/load capacity}) \quad (1)$$

که در آن EF_{empty} و EF_{full} به‌ترتیب میزان عامل انتشار در حالت خالی یا پربودن وسیله‌ی نقلیه است. load weight وزن بار حمل شده توسط وسیله‌ی نقلیه و load capacity ظرفیت حمل وسیله‌ی نقلیه است و $EF_{net\ load}$ عامل انتشار با توجه به میزان بار حمل شده است.

اگر عامل انتشار کربن را وقتی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع P خالی یا پر باشد به ترتیب با $E_p^{\min}$ و $E_p^{\max}$ نمایش دهیم، مقدار عامل انتشار در مسیر رفت از سمت تأمین‌کننده به خرده‌فروش‌ها (E_{pkt}^{SR}) با توجه به رابطه‌ی ۱ برابر است با:

$$E_{pkt}^{SR} = E_p^{\min} + \left(E_p^{\max} - E_p^{\min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \quad (2)$$

و در مسیر بازگشت از سمت خرده‌فروش‌ها به تأمین‌کننده (E_{pkt}^{RS}) که خالی برمی‌گردد برابر است با:

$$E_{pkt}^{RS} = E_p^{\min} \quad (3)$$

با توجه به این که هر وسیله‌ی نقلیه حتماً مسیر رفت و برگشت را طی می‌کند می‌توان برای سهولت، به‌جای استفاده از E_{pkt}^{SR} در مسیر رفت و E_{pkt}^{RS} در مسیر بازگشت، از متوسط آن‌ها درکل مسیر برای محاسبه‌ی عامل انتشارکربن استفاده کرد:

$$E_{pkt} = \frac{1}{2}\left(E_{pkt}^{SR} + E_{pkt}^{RS}\right) = E_p^{\min} + \frac{1}{2}\left(E_p^{\max} - E_p^{\min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \quad (4)$$

هـ) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

با توجه به مطالب بیان‌شده در بخش‌های الف) تا د)، به‌منظور هماهنگی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و مدیریت موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی چندکالایی و چند دوره زمانی همراه با در نظرگرفتن انتشارکربن مدل زیر توسعه داده شده است:

$$\text{Min}Z = \sum_p \sum_k \sum_t A_p Y_{pkt} + \sum_j \sum_p \sum_k \sum_t L_{jp} X_{jpkt} + \sum_i \sum_j \sum_t h_{ijt} I_{ijt} + TX \sum_t Ce_t \quad (5)$$

Subject to :

$$\sum_p \sum_k x_{ijpkt} + I_{ij,t-1} - d_{ijt} = I_{ijt} \quad \forall i,j,t; \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt} \le W_p \quad \forall p,k,t; \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_j v_i x_{ijpkt} \le V_p \quad \forall p,k,t; \quad (8)$$

$$x_{jpkt} = \sum_i x_{ijpkt} \quad \forall j,p,k,t; \quad (9)$$

$$x_{jpkt} \le M X_{jpkt} \quad \forall j,p,k,t; \quad (10)$$

$$y_{pkt} = \sum_i \sum_j x_{ijpkt} \quad \forall p,k,t; \quad (11)$$

$$y_{pkt} \le M Y_{pkt} \quad \forall p,k,t; \quad (12)$$

$$n_{pkt} = \sum_j X_{jpkt} \quad \forall p,k,t; \quad (13)$$

$$E_{pkt} = E_p^{\min} + \frac{1}{2}\left(E_p^{\max} - E_p^{\min}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \quad \forall p,k,t; \quad (14)$$

$$Csr_t = 2dsr \sum_p \sum_k E_{pkt} Y_{pkt} \quad \forall t; \quad (15)$$

$$Crr_t = drr \sum_p \sum_k E_{pkt}(n_{pkt} - Y_{pkt}) \quad \forall t; \quad (16)$$

$$Ce_t = Csr_t + Crr_t \quad \forall t; \quad (17)$$

$$x_{ijpkt}, I_{ijt}, y_{pkt}, x_{jpkt}, n_{pkt}, E_{pkt}, Csr_t, Crr_t, Ce_t \ge 0 \quad \forall i,j,p,k,t; \quad (18)$$

$$X_{jpkt}, Y_{pkt} \in \{0,1\} \quad \forall j,p,k,t; \quad (19)$$

تابع هدف مدل شامل چهار بخش است: ۱. مجموع هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه؛ ۲. مجموع هزینه‌های جابه‌جایی محصولات در خرده‌فروش‌ها؛ ۳. مجموع هزینه‌های نگه‌داری موجودی؛ ۴. مجموع هزینه‌های انتشارکربن. محدودیت ۶ تعادل موجودی برای هر خرده‌فروش را مشخص می‌کند به‌طوری‌که مجموع کمیت محصولات تحویل داده‌شده به خرده‌فروش به‌علاوه‌ی موجودی باقی‌مانده‌ی آن‌ها از دوره زمانی قبل منهای میزان تقاضای جاری هر محصول برابر موجودی مانده هریک برای دوره بعدی خواهد شد. محدودیت‌های ۷ و ۸ تضمین می‌کنند که تعداد محصولات حمل شده توسط وسیله‌ی نقلیه در یک دوره زمانی معین، فراتر از ظرفیت بارگیری آن وسیله‌ی نقلیه نیست. محدودیت‌های ۹ تا ۱۲ مقدار متغیرهای باینری را برآورده می‌کنند.

معادله‌ی ۱۳ تعداد خرده‌فروش‌های ملاقات شده توسط انواع وسیله‌ی نقلیه در هر دوره زمانی را مشخص می‌کند. معادله‌ی ۱۴ میزان انتشار کربن را با توجه به میزان بار حمل شده و نوع وسیله‌ی نقلیه‌ی استفاده شده در هر دوره زمانی تعیین می‌کند. معادلات ۱۵ تا ۱۷ متغیرهایی را تعیین می‌کنند که برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انتشار کربن در تابع هدف کاربرد دارند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی متغیرهای غیر منفی و باینری مسئله‌اند.

چنان که مشاهده می‌شود با توجه به محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶ که غیرخطی‌اند، مدل پیشنهادی غیرخطی است. برای خطی‌سازی این روابط، با تعریف عامل انتشار متغیر (E^{var}_{pkt}) که در محدودیت ۱۴ آمده را به‌صورت مجموع دو عامل انتشار کمینه و متغیر (رابطه‌ی ۲۰) نوشته و با جایگزینی در محدودیت غیرخطی ۱۵ خواهیم داشت:

$$E^{\text{var}}_{pkt} = \frac{1}{2}\left(E^{\max}_{p} - E^{\min}_{p}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ijpkt}}{W_p}\right) \geq 0 \rightarrow$$

$$E_{pkt} = E^{\min}_{p} + E^{\text{var}}_{pkt} \qquad \forall p,k,t; \tag{۲۰}$$

$$\begin{aligned} Csr_t &= 2dsr \sum_p \sum_k (E^{\min}_{p} + E^{\text{var}}_{pkt}) Y_{pkt} \\ &= 2dsr \sum_p \sum_k E^{\min}_{p} Y_{pkt} + 2dsr \sum_p \sum_k E^{\text{var}}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t; \end{aligned} \tag{۲۱}$$

با توجه به پیوست مقاله، متغیرهای E^{var}_{pkt} و Y_{pkt} هم‌زمان برابر صفرند و با توجه به باینری بودن Y_{pkt}، رابطه‌ی ۲۱ خطی می‌شود:

$$Csr_t = 2dsr \sum_p \sum_k (E^{\min}_{p} Y_{pkt} + E^{\text{var}}_{pkt}) \qquad \forall t; \tag{۲۲}$$

برای خطی‌سازی محدودیت ۱۶ با جایگزینی رابطه‌ی ۲۰ در آن داریم:

$$Crr_t = drr \sum_p \sum_k (E^{\min}_{p} + E^{\text{var}}_{pkt})(n_{pkt} - Y_{pkt}) \qquad \forall t; \tag{۲۳}$$

$$\begin{aligned} Crr_t =& drr \sum_p \sum_k E^{\min}_{p}(n_{pkt} - Y_{pkt}) + drr \sum_p \sum_k E^{\text{var}}_{pkt} n_{pkt} \\ & - drr \sum_p \sum_k E^{\text{var}}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t; \end{aligned} \tag{۲۴}$$

$$\begin{aligned} Crr_t =& drr \sum_p \sum_k E^{\min}_{p}(n_{pkt} - Y_{pkt}) + drr \sum_p \sum_k \sum_j E^{\text{var}}_{pkt} X_{jpkt} \\ & - drr \sum_p \sum_k E^{\text{var}}_{pkt} Y_{pkt} \qquad \forall t; \end{aligned} \tag{۲۵}$$

رابطه‌ی ۲۵ از سه بخش تشکیل شده است که بخش اول آن خطی است و با توجه به پیوست بخش سوم آن نیز خطی می‌شود؛ برای خطی سازی بخش دوم آن متغیر S_{jpkt} را چنین تعریف می‌کنیم:

$$S_{jpkt} = E^{\text{var}}_{pkt} \cdot X_{jpkt} \qquad S_{jpkt} \geq 0 \qquad \forall j,p,k,t; \tag{۲۶}$$

$$S_{jpkt} - M \cdot X_{jpkt} \leq E^{\text{var}}_{pkt} \qquad \forall j,p,k,t; \tag{۲۷}$$

$$S_{jpkt} + M(1 - X_{jpkt}) \geq E^{\text{var}}_{pkt} \qquad \forall j,p,k,t; \tag{۲۸}$$

متغیر X_{jpkt} باینری است و وقتی برابر صفر باشد S_{jpkt} صفر است، و زمانی هم که برابر ۱ است S_{jpkt} برابر E^{var}_{pkt} خواهد بود؛ لذا می‌توان با اضافه کردن دو محدودیت خطی ۲۷ و ۲۸ به مدل با توجه به تابع هدف رابطه‌ی غیرخطی ۲۶ را خطی کرد. در این صورت رابطه‌ی ۲۵ تبدیل می‌شود به:

$$\begin{aligned} Crr_t =& drr \sum_p \sum_k E^{\min}_{p}(n_{pkt} - Y_{pkt}) \\ & + drr \left(\sum_j \sum_p \sum_k S_{jpkt} - \sum_p \sum_k E^{\text{var}}_{pkt}\right) \qquad \forall t; \end{aligned} \tag{۲۹}$$

با جایگزین کردن روابط ۲۰، ۲۲ و ۲۷ تا ۲۹ به‌جای روابط ۱۵ و ۱۶ مدل به‌صورت خطی درخواهد آمد.

۴. آزمایش‌های محاسباتی

برای درک بهتر مدل پیشنهادی در عمل، مثال‌هایی در ابعاد کوچک و متوسط در این بخش حل شده و با توجه به سناریوهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفته تا تأثیر پارامترهای مختلف بر مدل تصمیم‌گیری و میزان انتشار کربن در زنجیره‌ی تأمین، درکنار سایر عوامل معمول هزینه‌یی روشن‌تر شود.

۱.۴. تعیین داده‌های اولیه

مسئله‌یی که به حل آن می‌پردازیم، خرده‌فروش‌هایی با متوسط فاصله‌ی ۱۰ کیلومتر نسبت به هم را شامل می‌شود، که در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از تأمین‌کننده قرار دارند. داده‌های مربوط به هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین از متوسط اعداد واقعی در اروپا اخذ شده است. داده‌های مربوط به عملکرد زیست‌محیطی وسایل نقلیه و میزان انتشارکربن آن‌ها و ظرفیت حجمی و وزنی آن‌ها از شبکه‌یی برای حمل‌ونقل و محیط‌زیست (NTM) گرفته شده، که یک سازمان غیرانتفاعی با هدف تولید مقادیر پایه برای محاسبه عملکرد زیست‌محیطی صور مختلف حمل‌ونقل است.[۲۸] سایر پارامترهای مورد نیاز عبارت است از:

۱. سه نوع محصول در نظر گرفته شده که وزن آن‌ها به‌ترتیب برابر ۰/۵، ۱ و ۳ کیلوگرم و حجم متناظر آن‌ها برابر ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۲۷ مترمکعب است.

۲. میزان تقاضا به‌صورت تصادفی از توزیع یکنواخت گسسته در فاصله‌ی (۵۰۰, ۱۰۰) تولید شده است.

۳. شش نوع وسیله‌ی نقلیه‌ی ناهمگن با توجه به ظرفیت حجمی و وزنی و استاندارد آلایندگی مختلف در نظر گرفته شده که پارامترهای مربوط به آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

۴. میزان هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات برای هر خرده‌فروش از حاصل‌ضرب حجم وسیله‌ی نقلیه در توزیع یکنواخت پیوسته در فاصله‌ی (۱/۲, ۰/۸) تولید شده است.

۵. مقدار هزینه‌ی نگه‌داری هر محصول از حاصل‌ضرب مبلغ ۰/۱ یورو در توزیع یکنواخت پیوسته در فاصله‌ی (۱/۲, ۰/۸) تولید شده است.

۶. مالیات انتشارکربن با توجه به مقادیر پیشنهادی[۲۹] برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ که به ترتیب ۴۵ و ۷۰ یورو بر تن بوده، برای سال ۲۰۱۴ به‌صورت انترپولاسیون خطی مقادیر پیشنهادی، ۵۵ یورو بر تن معادل ۰/۰۵۵ یورو به کیلوگرم محاسبه شده است.

جدول ۱. پارامترهای مرتبط با وسایل نقلیه.

اندیس نوع وسیله‌ی نقلیه (p)	نوع وسیله‌ی نقلیه	استاندارد آلایندگی	نوع سوخت	$E_p^{\min}$	$E_p^{\max}$	V_p	W_p	A_p
۱	Pick-up	Euro ۱	دیزل	۰٫۲۱۳۸	۱٫۰۶۹۰	۶	۶۰۰	۶۶
۲	Pick-up	Euro ۵	دیزل	۰٫۱۸۰۳	۰٫۹۰۱۵	۶	۶۰۰	۶۹٫۳
۳	Van	Euro ۱	دیزل	۰٫۲۷۲۶	۱٫۳۶۳۰	۱۷	۱۵۰۰	۷۸
۴	Van	Euro ۵	دیزل	۰٫۲۲۷۸	۱٫۱۳۹۰	۱۷	۱۵۰۰	۸۱٫۹
۵	Small Truck	Euro ۱	دیزل	۰٫۳۳۶۹	۰٫۸۴۲۲	۳۵	۵۰۰۰	۱۴۶
۶	Small Truck	Euro ۵	دیزل	۰٫۳۳۳۱	۰٫۸۳۲۷	۳۵	۵۰۰۰	۱۵۳٫۳

جدول ۲. تأثیر تعداد دوره زمانی برنامه‌ریزی بر مدل در حالت وجود دو خرده‌فروش.

تعداد دوره برنامه‌ریزی (T)	هزینه‌ی کل	هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه	هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات	هزینه‌ی نگه‌داری موجودی	هزینه‌ی انتشار کربن	تعداد وسیله‌ی نقلیه مورد استفاده از نوع (p) در کل دوره‌های زمانی					
						۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱۱۷٫۷۳۸	۷۸	۳۰٫۵۳۵	۰	۹٫۲۰۳	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۲	۳۹۶٫۱۸۸	۳۰۰	۵۵٫۸۲۷	۱٫۴۴۹	۳۸٫۹۱۱	۱	۰	۳	۰	۰	۰
۳	۵۶۳٫۰۱۷	۳۸۳٫۹۰۰	۱۳۶٫۱۹۳	۸٫۱۵۴	۳۴٫۷۷۰	۰	۰	۲	۱	۱	۰
۴	۷۷۵٫۳۷۹	۴۴۸	۲۰۲٫۵۶۳	۸۹٫۰۴۲	۳۵٫۷۷۴	۰	۰	۲	۰	۲	۰
۵	۹۵۶٫۷۰۰	۶۰۴	۲۲۴٫۰۵۸	۷۲٫۵۵۰	۵۶٫۰۹۱	۰	۰	۴	۰	۲	۰
۶	۱۰۹۳٫۹۷۵	۷۴۸	۲۴۴٫۲۰۳	۲۸٫۰۲۱	۷۳٫۷۵۱	۱	۰	۵	۰	۲	۰
۷	۱۳۵۵٫۰۷۴	۹۰۴	۲۸۱٫۳۶۰	۷۳٫۳۸۱	۹۶٫۳۳۳	۱	۰	۷	۰	۲	۰
۸	۱۵۰۹٫۶۷۱	۱۰۷۱٫۷۰۰	۲۹۵٫۳۱۳	۳۳٫۶۷۹	۱۰۸٫۹۷۹	۱	۰	۶	۳	۲	۰
۹	۱۷۳۶٫۹۴۸	۱۲۱۶	۳۴۹٫۵۷۵	۳۴٫۸۵۸	۱۳۶٫۵۱۶	۱	۰	۱۱	۰	۲	۰
۱۰	۱۹۵۱٫۵۴۴	۱۳۳۸	۴۲۰٫۱۲۲	۵۴٫۰۰۱	۱۳۹٫۴۲۱	۳	۰	۹	۰	۳	۰

۷. موجودی اولیه برای هریک از محصولات در هر خرده‌فروش‌از توزیع یکنواخت گسسته در فاصله‌ی (۰ ,۲۰۰) محاسبه شده است.

مسئله در نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی و به‌کمک حل‌کننده‌ی CPLEX ۱۲٫۰٫۲٫۱ برای سناریوهای مختلف که در ادامه می‌آید حل، و نتایج ارائه شده است.

۲.۴. تأثیر تغییر تعداد دوره زمانی برنامه‌ریزی

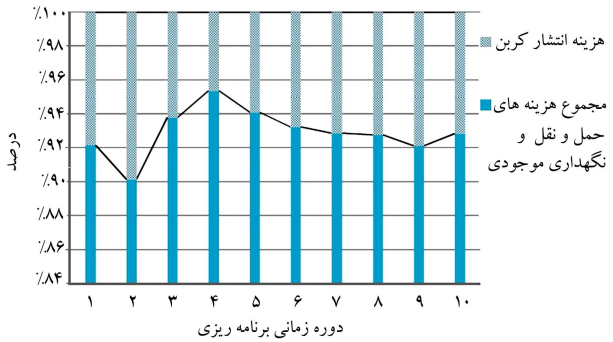
برای فهم تأثیر تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی، مدل در حالتی‌که دو و سه خرده‌فروش وجود داشته باشد به‌ازای ۱۰ دوره زمانی حل، و نتایج حاصل از آن در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد دوره زمانی هزینه‌ی کل و هزینه‌های حمل‌ونقل اعم از هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه و هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات روند کاملاً افزایشی دارد ولی برای هزینه‌های نگه‌داری موجودی و انتشار کربن این موضوع صادق نیست. برای هزینه‌ی انتشارکربن می‌توان این‌گونه استنباط کرد که تأمین‌کننده تا زمانی که بتواند از انواع وسایل نقلیه با میزان آلایندگی بالاتر ولی ارزان‌تر، نظیر ۱، ۳ و ۵ برای حمل محصولات استفاده کند به سراغ انواع وسایل نقلیه با استاندارد آلایندگی بالاتر، نظیر ۲، ۴ و ۶ نمی‌رود؛ یعنی تمایل به استفاده از انواع وسایل نقلیه‌ی استاندارد پایین است مگر آن که هزینه‌ی کل کمینه نشود. ضمناً حجم و وزن محصولات نیز در انتخاب ناوگان حمل آن‌ها مؤثر است. مثلاً وقتی دو خرده‌فروش داریم در حالت $T=2$ از یک وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۱ و سه وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۳ استفاده شده، ولی در حالت $T=3$ از یک وسیله‌ی نوع ۴ به‌جای یک وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۳ و از وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۵ به‌جای وسیله‌ی نوع ۱ استفاده شده که بیشترین مقدار عامل انتشار آن کم‌تر از نوع ۱ است ($E_5^{\max} < E_1^{\max}$)؛ این امر اگرچه هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه را افزایش می‌دهد ولی باعث کاهش هزینه‌ی انتشارکربن خواهد شد. با توجه به جدول ۳ وقتی سه خرده‌فروش داریم نیز چنین استدلالی را می‌توان برای تفاوت هزینه‌ی انتشارکربن بین حالت $T=8$ و $T=9$ که ناشی از تغییر دو وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع ۳ به نوع ۵ با توجه به تفاوت بیشترین مقدار عامل انتشار آن‌ها ($E_5^{\max} < E_3^{\max}$) است، به کار برد.

هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در حالت دو خرده‌فروش ($T=4$) حداکثر ۱۱٫۵ درصد است، و در مابقی دوره‌های زمانی کم‌تر از ۱۰ درصد است. در حالت سه خرده‌فروش ($T=7$ یا $T=8$) هزینه‌ی نگه‌داری موجودی برابر ۲٫۴ درصد بوده و در بقیه دوره‌های زمانی کم‌تر از ۲٫۴ درصد است. همچنین در حالت برنامه‌ریزی به‌صورت یک دوره‌یی ($T=1$) چنان که از جداول ۲ و ۳ پیداست هزینه‌ی نگه‌داری موجودی برابر صفر شده که نشان می‌دهد میزان کالای تحویلی به هر خرده‌فروش برابر ($d_{ij1} - I_{ij0}$) است؛ این موضوع لزوماً در دوره زمانی اول حالت‌های دیگر برنامه‌ریزی صادق نیست.

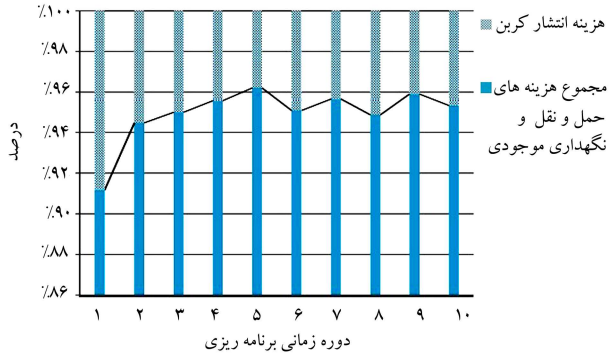
با افزایش تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی تمایل به استفاده از وسایل نقلیه با

جدول ۳. تأثیر تعداد دوره زمانی برنامه‌ریزی بر مدل در حالت وجود سه خرده‌فروش.

تعداد دوره برنامه‌ریزی (T)	هزینه‌ی کل	هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه	هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات	هزینه‌ی نگه‌داری موجودی	هزینه‌ی انتشار کربن	تعداد وسیله‌ی نقلیه مورد استفاده از نوع (p) در کل دوره‌های زمانی					
						۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۲۳۸٫۰۱۵	۱۵۶	۶۱٫۰۷۴	۰	۲۰٫۹۴۱	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۲	۵۰۷٫۴۰۶	۳۱۳٫۲۰۰	۱۶۵٫۰۳۲	۱٫۲۶۶	۲۷٫۹۰۸	۰	۰	۱	۱	۰	۱
۳	۷۱۷٫۹۰۴	۴۴۸	۲۳۲٫۰۵۸	۲٫۰۲۲	۳۵٫۸۲۵	۰	۰	۲	۰	۲	۰
۴	۱۰۰۰٫۵۲۴	۵۹۴	۳۵۱٫۴۳۲	۱۰٫۷۶۱	۴۴٫۳۳۱	۰	۰	۲	۰	۳	۰
۵	۱۲۱۸٫۵۲۶	۷۴۳٫۹۰۰	۴۲۸٫۵۲۳	۰	۴۶٫۱۰۳	۰	۰	۱	۱	۴	۰
۶	۱۴۵۰٫۳۰۸	۸۹۹٫۹۰۰	۴۷۴٫۴۴۱	۴٫۷۹۲	۷۱٫۱۷۴	۰	۰	۳	۱	۴	۰
۷	۱۷۹۳٫۹۷۹	۱۰۴۹٫۸۰۰	۶۲۳٫۶۱۶	۴۲٫۷۵۱	۷۷٫۸۱۱	۰	۰	۲	۲	۵	۰
۸	۱۹۹۶٫۸۶۶	۱۱۹۸	۶۴۹٫۰۰۹	۴۷٫۷۸۵	۱۰۲٫۰۷۲	۰	۰	۶	۰	۵	۰
۹	۲۲۴۶٫۷۸۲	۱۳۳۴	۸۰۴٫۱۲۳	۱۶٫۶۰۰	۹۲٫۰۵۸	۰	۰	۴	۰	۷	۰
۱۰	۲۴۴۲٫۰۴۲	۱۴۷۷٫۵۰۰	۸۲۵٫۴۰۱	۲۵٫۰۹۵	۱۱۴٫۰۴۶	۰	۰	۴	۳	۰	۶



شکل ۱. نسبت هزینه‌ی کربن به سایر هزینه‌های زنجیره در حالت وجود دو خرده‌فروش در دوره‌های مختلف زمانی.



شکل ۲. نسبت هزینه‌ی کربن به سایر هزینه‌های زنجیره در حالت وجود سه خرده‌فروش در دوره‌های مختلف زمانی.

ظرفیت بالاتر بیشتر است؛ به‌عنوان مثال در حالت‌های $T = ۱$ و $T = ۲$ برای وقتی که دو خرده‌فروش داریم و حالت $T = ۱$ برای وقتی که سه خرده‌فروش داریم از وسایل نقلیه‌ی نوع ۵ و ۶ استفاده نشده، و برای حالت‌های دیگر هرچه تعداد دوره زمانی برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد از وسایل نقلیه با ظرفیت بالاتر بیشتر استفاده خواهد شد.

درصد هزینه‌ی انتشار کربن نسبت به سایر هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین برای دوره‌های مختلف زمانی در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است. چنان که در نمودار شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، کم‌تر از ۱۰ درصد هزینه‌ی کل در تمامی دوره‌های زمانی برای هر دو حالت دو و سه خرده‌فروش به هزینه‌ی انتشار کربن اختصاص یافته است.

اگر بخواهیم به‌گونه‌یی برنامه‌ریزی کنیم که هزینه‌ی انتشار کربن نسبت به هزینه‌ی کل زنجیره کمینه شود با توجه به شکل ۲ در حالتی که دو خرده‌فروش داریم، در $T = ۴$ این رویداد رخ می‌دهد و میزان هزینه‌ی کربن ۴٫۶٪ هزینه‌ی کل می‌شود. در حالت حضور سه خرده‌فروش، در $T = ۵$ این رویداد رخ داده و میزان هزینه‌ی کربن ۳٫۷٪ هزینه‌ی کل است. یعنی برای کاهش هزینه‌های انتشار کربن در زنجیره‌ی تأمین در حالتی که دو خرده‌فروش داریم بهتر است دوره‌های برنامه‌ریزی به‌صورت چهاردوره‌یی و در حالتی که سه خرده‌فروش داریم بهتر است دوره‌های برنامه‌ریزی به‌صورت پنج‌دوره‌یی انتخاب شود.

۳.۴. تأثیر تغییر وزن و حجم محصولات

اگر (w_i, v_i) وزن و حجم متناظر با محصول i باشد، با تغییر آن‌ها مدل در دو حالت $(J, T) = (۲, ۲)$ و $(J, T) = (۳, ۲)$ حل و نتایج حاصله در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. همچنین نوع و تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در کل دوره زمانی برنامه‌ریزی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شرایط نتایج زیر استخراج می‌شود:

۱. در هر دو حالت وقتی وزن و حجم محصولات $(\frac{۱}{۲}w_i, \frac{۱}{۲}v_i)$ باشد کم‌ترین هزینه‌ی کل، و به‌ازای $(۲w_i, ۲v_i)$ بیشترین هزینه‌ی کل حاصل می‌شود.

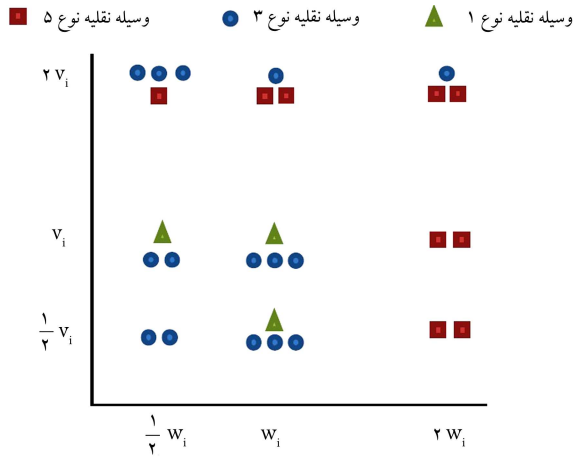
۲. در حالت $(J, T) = (۲, ۲)$ با توجه به جدول ۴ وضعیت‌های (w_i, v_i) و $(w_i, \frac{۱}{۲}v_i)$ همچنین $(۲w_i, v_i)$ و $(۲w_i, \frac{۱}{۲}v_i)$ کاملاً مشابه‌اند. چنان که مشاهده می‌شود وزن محصولات یکسان و تنها تفاوت در حجم آن‌هاست؛ لذا با توجه به وزن محصولات، وسایل نقلیه‌انتخاب می‌شود (شکل ۳) که در این وضعیت تعداد و انواع وسایل نقلیه یکسان است. البته مطابق شکل ۳ در وضعیت‌های $(w_i, ۲v_i)$ و $(۲w_i, ۲v_i)$ تعداد و انواع وسایل نقلیه یکسان است ولی مشابه نیستند؛ زیرا با توجه به تفاوت وزن محصولات، و نیز با توجه به این که طبق مدل وزن محموله در میزان انتشار کربن تأثیر مستقیم دارد، میزان انتشار کربن در این وضعیت‌ها متفاوت است و بنابراین هزینه‌ی کل آن‌ها متفاوت خواهد بود.

جدول ۴. تأثیر وزن و حجم محصولات بر مدل در حالت دو خرده‌فروش.

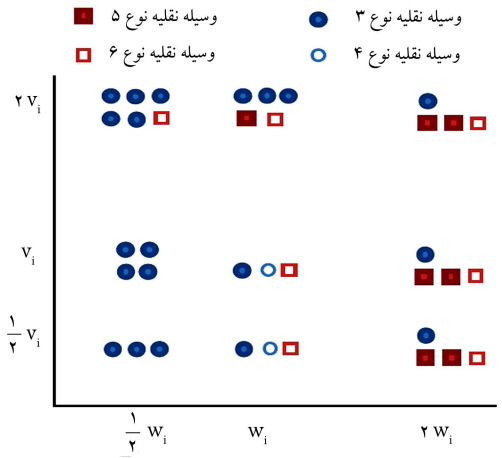
وزن و حجم محصولات	هزینه‌ی کل	هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه	هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات	هزینه‌ی نگه‌داری موجودی	هزینه‌ی انتشار کربن	میزان انتشار کربن	درصد هزینه‌ی انتشار کربن به هزینه‌ی کل
(w_i, v_i)	۳۹۶٫۱۸۸	۳۰۰	۵۵٫۸۲۷	۱٫۴۴۹	۳۸٫۹۱۱	۷۰۷٫۴۷۸	۹٫۸۲
$(2w_i, v_i)$	۴۵۹٫۳۵۵	۲۹۲	۱۴۱٫۱۴۷	۱۰٫۳۱۹	۱۵٫۸۸۹	۲۸۸٫۸۸۸	۳٫۴۶
$(w_i, 2v_i)$	۵۲۳٫۱۶۲	۳۷۰	۱۱۷٫۴۵۵	۱۷٫۵۸۷	۱۸٫۱۲۰	۳۲۹٫۴۵۵	۳٫۴۶
$(2w_i, 2v_i)$	۵۲۸٫۶۰۴	۳۷۰	۱۱۷٫۴۵۵	۱۷٫۵۸۷	۲۳٫۵۶۲	۴۲۸٫۴۰۵	۴٫۴۶
$(\frac{1}{2}w_i, v_i)$	۳۰۹٫۴۰۷	۲۲۲	۶۴٫۷۸۳	۰	۲۲٫۶۲۵	۴۱۱٫۳۵۷	۷٫۳۱
$(w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۳۹۶٫۱۸۸	۳۰۰	۵۵٫۸۲۷	۱٫۴۴۹	۳۸٫۹۱۱	۷۰۷٫۴۷۸	۹٫۸۲
$(\frac{1}{2}w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۲۳۵٫۱۲۶	۱۵۶	۵۵٫۷۱۷	۰	۱۹٫۴۰۸	۳۵۲٫۸۸۱	۸٫۲۵
$(\frac{1}{2}w_i, 2v_i)$	۵۱۶٫۴۲۱	۳۸۰	۹۱٫۴۲۹	۲۲٫۱۱۱	۲۲٫۸۸۱	۴۱۶٫۰۱۵	۴٫۴۳
$(2w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۴۵۹٫۳۵۵	۲۹۲	۱۴۱٫۱۴۷	۱۰٫۳۱۹	۱۵٫۸۸۹	۲۸۸٫۸۸۸	۳٫۴۶

جدول ۵. تأثیر وزن و حجم محصولات بر مدل در حالت سه خرده‌فروش.

وزن و حجم محصولات	هزینه‌ی کل	هزینه‌ی ثابت وسایل نقلیه	هزینه‌ی جابه‌جایی محصولات	هزینه‌ی نگه‌داری موجودی	هزینه‌ی انتشار کربن	میزان انتشار کربن	درصد هزینه‌ی انتشار کربن به هزینه‌ی کل
(w_i, v_i)	۵۰۷٫۴۰۶	۳۱۳٫۲۰۰	۱۶۵٫۰۳۲	۱٫۲۶۶	۲۷٫۹۰۸	۵۰۷٫۴۲۲	۵٫۵۰
$(2w_i, v_i)$	۷۴۰٫۸۶۰	۵۲۳٫۳۰۰	۱۸۵٫۱۳۵	۰٫۱۸۱	۳۲٫۲۴۴	۵۸۶٫۲۵۳	۴٫۳۵
$(w_i, 2v_i)$	۷۷۴٫۱۵۱	۵۳۳٫۳۰۰	۲۰۰٫۲۲۰	۳٫۶۳۰	۳۷٫۰۰۱	۶۷۲٫۷۴۵	۴٫۷۸
$(2w_i, 2v_i)$	۷۹۵٫۷۳۶	۵۲۳٫۳۰۰	۲۳۷٫۲۷۲	۱٫۲۶۶	۳۳٫۸۹۷	۶۱۶٫۳۱۲	۴٫۲۶
$(\frac{1}{2}w_i, v_i)$	۴۵۹٫۳۸۳	۳۱۲	۱۰۳٫۷۴۰	۱۱٫۲۶۸	۳۲٫۳۷۵	۵۸۸٫۶۴۳	۷٫۰۵
$(w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۵۰۷٫۴۰۶	۳۱۳٫۲۰۰	۱۶۵٫۰۳۲	۱٫۲۶۶	۲۷٫۹۰۸	۵۰۷٫۴۲۲	۵٫۵۰
$(\frac{1}{2}w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۳۶۷٫۱۱۵	۲۳۴	۱۰۳٫۷۴۰	۰	۲۹٫۳۷۶	۵۳۴٫۱۰۸	۸
$(\frac{1}{2}w_i, 2v_i)$	۷۶۵٫۶۵۱	۵۴۳٫۳۰۰	۱۸۱٫۰۴۰	۵٫۲۳۴	۳۶٫۰۷۷	۶۵۵٫۹۳۶	۴٫۷۱
$(2w_i, \frac{1}{2}v_i)$	۷۴۰٫۸۶۰	۵۲۳٫۳۰۰	۱۸۵٫۱۳۵	۰٫۱۸۱	۳۲٫۲۴۴	۵۸۶٫۲۵۳	۴٫۳۵



شکل ۳. تأثیر وزن و حجم محصولات در نحوه‌ی به‌کارگیری بهینه‌ی انواع وسیله‌ی نقلیه در حالتی که $(J, T) = (۲, ۲)$.



شکل ۴. تأثیر وزن و حجم محصولات در نحوه‌ی به‌کارگیری بهینه‌ی انواع وسیله‌ی نقلیه در حالتی که $(J, T) = (۳, ۲)$.

۳. در حالت $(J,T)=(۲,۲)$ کم‌ترین میزان انتشار کربن برابر ۲۸۸٫۸۸۸ کیلوگرم و در وضعیت‌های (w_i, v_i) و $(۲w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ است، و بیشترین میزان انتشار کربن برابر ۷۰۷٫۴۷۸ کیلوگرم و در وضعیت‌های (w_i, v_i) و $(w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ حاصل می‌شود.

۴. در حالت $(J,T)=(۳,۲)$ با توجه به جدول ۵، وضعیت‌های $(۲w_i, v_i)$ و $(۲w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ به‌دلیل یکسان بودن وزن محصولات و تنها تفاوت در حجم کاملاً مشابه‌اند (شکل ۴)؛ در این وضعیت‌ها تعداد و انواع وسایل نقلیه یکسان است. وضعیت $(۲w_i, ۲v_i)$ با دو وضعیت قبلی اگرچه یکسان است، هزینه‌ی ثابت حمل‌ونقل در مابقی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین متفاوت است. دلیل این تفاوت در وزن محموله‌ها و تعداد جابه‌جایی محصولات در خرده‌فروش‌هاست (جداول ۶ و ۷). براین اساس، جابه‌جایی محصولات در خرده‌فروش‌ها در وضعیت‌های $(۲w_i, v_i)$ و $(۲w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ شش بار و در وضعیت $(۲w_i, ۲v_i)$ هشت بار اتفاق می‌افتد.

۵. در حالت $(J,T)=(۳,۲)$ با توجه به جدول ۵ وضعیت‌های (w_i, v_i) و $(w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ طبق استدلال مشابه بند ۲ کاملاً یکسان‌اند.

۶. در حالت $(J,T)=(۳,۲)$ کم‌ترین میزان انتشار کربن برابر ۵۰۷٫۴۲۲ کیلوگرم و در وضعیت‌های (w_i, v_i) و $(w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ به وجود آمده است؛ بیشترین میزان انتشار کربن نیز برابر ۶۷۲٫۷۴۵ کیلوگرم است که در وضعیت $(w_i, ۲v_i)$ حاصل می‌شود.

۷. در هر دو حالت در وضعیت $(\frac{1}{۲}w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ اگرچه کم‌ترین هزینه‌ی کل را شاهدیم، کم‌ترین میزان انتشار کربن به وجود نمی‌آید زیرا $E_p^{\max}$ از سایر $E_۳^{\max}$ بیشتر است.

۸. در حالت سه خرده‌فروش بیشترین میزان انتشار کربن کم‌تر از حالت دو خرده‌فروش است؛ علت آن است که در این حالت بیشتر از وسایل نقلیه با ظرفیت بالا (شکل‌های ۳ و ۴) استفاده شده است.

۹. چنان که از جداول ۴ و ۵ استنباط می‌شود، سهم هزینه‌ی انتشار کربن به‌ازای تغییر وزن و حجم کالاها از حدود ۳ درصد تا ۱۰ درصد در نوسان است.

جدول ۶. نحوه‌ی کالارسانی به خرده‌فروش‌ها در وضعیت‌های $(۲w_i, v_i)$ و $(۲w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ در حالت $(J,T)=(۳,۲)$.

وسیله‌ی نقلیه نوع (p)	دوره زمانی اول	دوره زمانی دوم
۳	(۲)*	—
۵	—	(۱)، (۲،۳)
۶	(۳،۱)	—

*پرانتز نشان دهنده محموله و اعداد داخل آن شماره خرده‌فروش‌هایی است که کالا دریافت می‌کنند.

جدول ۷. نحوه‌ی کالارسانی به خرده‌فروش‌ها در وضعیت‌های $(۲w_i, ۲v_i)$ در حالت $(J,T)=(۳,۲)$.

وسیله‌ی نقلیه نوع (p)	دوره زمانی اول	دوره زمانی دوم
۳	(۲،۳)*	—
۵	(۲،۱)	(۲،۱)
۶	—	(۳،۱)

*پرانتز نشان دهنده محموله و اعداد داخل آن شماره خرده‌فروش‌هایی است که کالا دریافت می‌کنند.

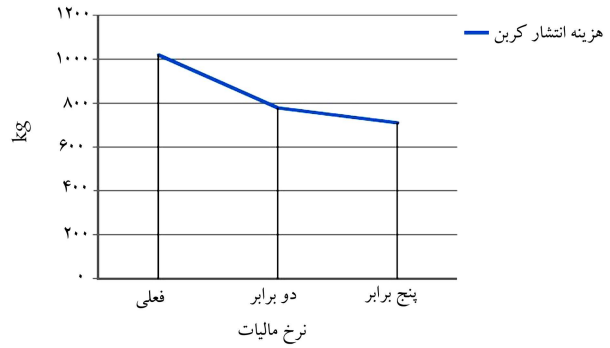
۱۰. مطابق شکل ۴ به دلیل حجم کم‌تر کالاها در وضعیت $(\frac{1}{۲}w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ نسبت به وضعیت $(\frac{1}{۲}w_i, v_i)$ از یک وسیله‌ی نقلیه کم‌تر استفاده شده است. با توجه به جدول ۵ درمی‌یابیم غیر از هزینه‌ی جابه‌جایی سایر هزینه‌های آن‌ها متفاوت است. علت آن است که در وضعیت $(\frac{1}{۲}w_i, \frac{1}{۲}v_i)$ به‌سبب حجم کم‌تر محموله در دوره زمانی اول از یک وسیله‌ی نقلیه برای خدمت‌رسانی به هر سه خرده‌فروش استفاده شده در حالی که در وضعیت $(\frac{1}{۲}w_i, v_i)$ از دو وسیله‌ی نقلیه استفاده شده است، ولی تعداد جابه‌جایی در هر دو وضعیت یکسان است.

۴.۴. تأثیر تغییر مالیات انتشار کربن

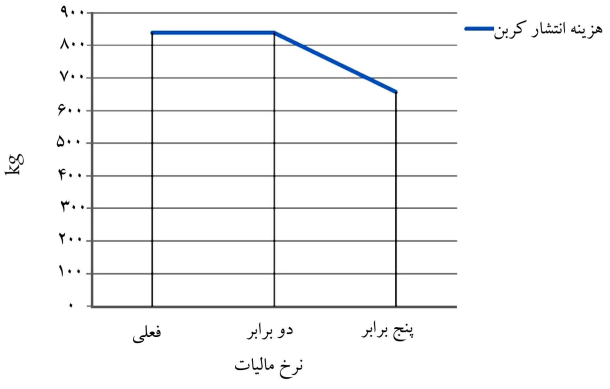
چنان‌که در بخش ۱.۴ گفته شد، مالیات انتشار کربن با توجه به مقادیر پیشنهادی[۲۹] برابر ۵۵٫۰ یورو برای هرکیلوگرم محاسبه شده است. در حال حاضر روند قانون‌گذاری در این زمینه رو به گسترش است و در سال‌های آتی با توجه به نگرانی عمومی نسبت به افزایش آلایندگی‌ها مقررات سخت‌گیرانه‌تری توسط دولت‌ها اتخاذ خواهد شد.

برای درک بهتر این موضوع که افزایش مالیات انتشار کربن چه تأثیری بر میزان انتشار آن دارد در دو حالت $(J,T)=(۲,۵)$ و $(J,T)=(۳,۵)$ نرخ مالیات را افزایش داده و نتایج آن بر هزینه‌های انتشار کربن، هزینه‌ی کل، و نیز تعداد و انواع وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده در جدول ۸ ارائه شده است. میزان انتشار کربن در سه وضعیت فعلی، دو برابر و پنج برابر نیز در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده است.

مطابق جدول ۸ با افزایش نرخ مالیات، هزینه‌ی کل و هزینه‌ی انتشار کربن افزایش می‌یابد و میزان انتشار کربن نزولی است. در حالت $(J,T)=(۲,۵)$ (شکل ۵) و با افزایش نرخ مالیات، میزان انتشار کربن به‌ترتیب از ۱۰۱۹٫۸۴ کیلوگرم



شکل ۵. تأثیر نرخ مالیات انتشار کربن در حالت $(J,T)=(۲,۵)$.



شکل ۶. تأثیر نرخ مالیات انتشار کربن در حالت $(J,T)=(۳,۵)$.

جدول ۸. تأثیر نرخ مالیات بر هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده.

(J,T)	نرخ مالیات	هزینه‌ی کل	هزینه‌ی انتشار کربن	میزان انتشار کربن	درصد هزینه‌ی انتشار کربن به هزینه‌ی کل	تعداد وسیله‌ی نقلیه مورد استفاده از نوع (p) در کل دوره‌های زمانی					
						۱	۲	۳	۴	۵	۶
(۲, ۵)	فعلی	۹۵۶٫۷۰۰	۵۶٫۰۹۱	۱۰۱۹٫۸۴۰	۵٫۸۶	۰	۰	۴	۰	۲	۰
	دو برابر	۱۰۰۲٫۱۳۴	۸۵٫۶۲۴	۷۷۸٫۴۰۰	۸٫۵۴	۰	۰	۲	۰	۳	۰
	پنج برابر	۱۱۲۲٫۵۲۸	۱۹۵٫۵۸۰	۷۱۱٫۲۰۰	۱۷٫۴۲	۰	۰	۰	۲	۳	۰
(۳, ۵)	فعلی	۱۲۱۸٫۵۲۶	۴۶٫۱۰۳	۸۳۸٫۲۳۳	۳٫۷۸	۰	۰	۱	۱	۴	۰
	دو برابر	۱۲۶۴٫۶۲۹	۹۲٫۲۰۶	۸۳۸٫۲۳۳	۷٫۲۹	۰	۰	۱	۱	۴	۰
	پنج برابر	۱۳۸۹٫۹۱۷	۱۸۰٫۸۲۲	۶۵۷٫۵۳۵	۱۳٫۰۱	۰	۰	۰	۰	۵	۰

به ۷۱۱٫۲ کیلوگرم می‌رسد که این کاهش به دلیل استفاده‌ی بیشتر از وسایل نقلیه با استاندارد بالاتر است. در حالت $(J,T) = (۳, ۵)$ با توجه به شکل ۶ افزایش دو برابری نرخ مالیات تأثیری بر میزان انتشارکربن ندارد ولی پنج برابر شدن این نرخ موجب کاهش انتشارکربن می‌شود. به‌طورکلی نمودار میزان انتشارکربن در زنجیره با افزایش نرخ مالیات، نزولی خواهد بود و به‌مرور با افزایش نرخ مالیات از وسایل نقلیه با آلایندگی کم‌تر استفاده خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری و مطالعات آتی

در نوشتار حاضر به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی چندمحصولی چند دوره زمانی، با در نظرگرفتن انتشارکربن پرداخته‌ایم. دراین مسئله تقاضای خرده‌فروش‌ها به‌صورت قطعی و پویاست و تأمین‌کننده به سبب آگاهی از آن توسط سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده موظف به تصمیم‌گیری در ارتباط با میزان کالای ارسالی و زمان ارسال آن‌هاست. نوآوری این تحقیق علاوه بر چندکالایی بودن، در نظرگرفتن وسایل نقلیه‌ی ناهمگن برای حمل‌ونقل، عامل انتشار کربن پویا و اضافه کردن وزن و حجم محصولات در مدل‌سازی است. بدین منظور مدلی به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی با عدد صحیح مختلط توسعه داده شده که توسط روش‌هایی خطی شده است. هدف از این کار به دست آوردن جواب دقیق برای مثال‌هایی در ابعاد کوچک و متوسط بوده تا کاربرد مدل با توجه به سناریوهای مختلف در عمل نشان داده شود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش تعداد دوره زمانی برنامه‌ریزی هزینه‌ی کل و هزینه‌های حمل‌ونقل روند کاملاً افزایشی داشته و تمایل به استفاده از انواع وسایل نقلیه با ظرفیت بالاتر بیشتر می‌شود، ضمن آن که هزینه‌ی انتشارکربن همواره کم‌تر از ۱۰ درصد است. تغییر وزن و حجم کالاها در مدل بر هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین تأثیر می‌گذارد؛ حتی زمانی که وزن کل محموله ثابت باشد این امر درصد هزینه‌ی انتشارکربن به هزینه‌ی کل را تغییر می‌دهد. با افزایش وزن و حجم محصولات هزینه‌ی کل افزایش می‌یابد ولی درمورد هزینه‌ی انتشارکربن چنین نیست و فقط وزن و نوع وسیله‌ی نقلیه بر آن اثرگذار هستند. با افزایش نرخ مالیات، هزینه‌ی کل و هزینه‌ی انتشارکربن افزایشی و میزان انتشار کربن کاهشی خواهد بود و به‌مرور با افزایش نرخ مالیات از وسایل نقلیه با استاندارد آلایندگی بالاتر استفاده خواهد شد.

در این مدل با توجه به نوع وسیله‌ی نقلیه و وزن باری که توسط آن حمل می‌شود عامل انتشارکربن مشخص شده است. یکی از راه‌های توسعه‌ی مدل اضافه‌کردن مسیریابی به مدل است که در آن صورت مشخصات مسیر نظیر طول، ترافیک و شیب آن نیز بر عامل انتشارکربن تأثیر خواهد گذاشت. در نظرگرفتن انتشارکربن در بخش‌های دیگر زنجیره‌ی تأمین همچون نگه‌داری موجودی، سایر متغیرهای زیست‌محیطی و اقتصادی و شرایط عدم قطعیت می‌تواند مدل را کامل‌تر کند. تفکیک هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مدل و بازنویسی آن به‌صورت یک مدل چندهدفه از دیگر راه‌های توسعه‌ی این مدل است. در پایان توسعه‌ی روش حل برای مدلی در ابعاد واقعی و انجام مطالعه‌ی موردی را می‌توان پیشنهاد کرد.

پانوشت‌ها

1. vendor-managed inventory
2. fuel consumption
3. emission rate

منابع (References)

1. Srivastava, S.K. "Green supply chain management: A state-of-the-art literature review", *Int. J. Manag. Rev.*, **9**(1), pp. 53-80 (2007).
2. Plambeck, E.L. "Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management", *Energy Econ.*, **34**, pp. S64-S74 (2012).
3. Carbone, V. and Moatti, V. "Towards greener supply chains: an institutional perspective", *Int. J. Logist. Res. Appl.*, **14**(3), pp. 179-197 (2011).
4. Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. and Novais, A.Q. "Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances", *Comput. Chem. Eng.*, **35**(8), pp. 1454-1468 (2011).
5. Quariguasi Frota Neto, J., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Nunen, J. and Van Heck, E. "Designing and evaluating sustainable logistics networks", *Int. J. Prod. Econ.*, **111**(2), pp. 195-208 (2008).

6. Ramudhin, A., Chaabane, A. and Paquet, M. "Carbon market sensitive sustainable supply chain network design", *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.*, **5**(1), pp. 30-38 (2010).
7. Wang, F., Lai, X. and Shi, N. "A multi-objective optimization for green supply chain network design", *Decis. Support Syst.*, **51**(2), pp. 262-269 (2011).
8. Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M. "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme", *Int. J. Prod. Econ.*, **135**(1), pp. 37-49 (2012).
9. Paksoy, T., Pehlivan, N.Y. and Özceylan, E. "Fuzzy multi-objective optimization of a green supply chain network with risk management that includes environmental hazards", *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.*, **18**(5), pp. 1120-1151 (2012).
10. Abdallah, T., Farhat, A., Diabat, A. and Kennedy, S. "Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment", *Appl. Math. Model.*, **36**(9), pp. 4271-4285 (2012).
11. Xue, Y. and Irohara, T. "A time-space network based international transportation scheduling problem incorporating CO_2 emission levels", *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, **11**(12), pp. 927-932 (2010).
12. Sadegheih, A., Drake, P.R., Li, D. and Sribenjachot, S. "Global supply chain management under the carbon emission trading program using mixed integer programming and genetic algorithm", *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, **24**(1), pp. 37-53 (2011).
13. Zeng, W., Wang, C. and Zhou, H. "Study on supply chain operations under carbon emission regulatory policies", *in International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII) 2012*, **2**, pp. 506-509 (2012).
14. Benjaafar, S., Li, Y. and Daskin, M. "Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, **10**(1), pp. 99-116 (2013).
15. Arun Kanda, A. and Deshmukh, S.G., "Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions", *Int. J. Prod. Econ.*, **115**(2), pp. 316-335 (2008).
16. Ubeda, S., Arcelus, F.J. and Faulin, J. "Green logistics at Eroski: A case study", *Int. J. Prod. Econ.*, **131**(1), pp. 44-51 (2011).
17. Treitl, S., Nolz, P.C. and Jammernegg, W. "Incorporating environmental aspects in an inventory routing problem. A case study from the petrochemical industry", *Flex. Serv. Manuf. J.*, **26**(1-2), pp. 143-169 (2014).
18. Gajanand, M.S. and Narendran, T.T. "Green route planning to reduce the environmental impact of distribution", *Int. J. Logist. Res. Appl.*, **16**(5), pp. 410-432 (2013).
19. Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J. and Rekik, Y. "Multi-product multi-period inventory routing problem with a transshipment option: A green approach", *Int. J. Prod. Econ.*, **157**, pp. 80-88 (2014).
20. Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H. and Lam, H.Y. "Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends", *Expert Syst. Appl.*, **41**(4), pp. 1118-1138 (2014).
21. Seuring, S. "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management", *Decis. Support Syst.*, **54**(4), pp. 1513-1520 (2013).
22. Mehrjerdi, Y.Z. and Anvar, S.H. "A mixed integer programming model for coordination of multi-product two-echelon supply chain using meta-heuristic solu", *Ind. Eng. Manag.*, **02**(02), pp. 316-2169 (2013).
23. Bektaş, T. and Laporte, G. "The pollution-routing problem", *Transp. Res. Part B Methodol*, **45**(8), pp. 1232-1250 (2011).
24. Kwon, Y.-J., Choi, Y.-J. and Lee, D.-H. "Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission", *Transp. Res. Part D Transp. Environ*, **23**, pp. 81-89 (2013).
25. Sathaye, N., Horvath, A. and Madanat, S. "Unintended impacts of increased truck loads on pavement supply-chain emissions," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, **44**(1), pp. 1-15 (2010).
26. US EPA, Greenhouse Gas Inventory Report, [Online]. Available: http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html. [Accessed: 03-Jan-2014].
27. Zadek, H. and Schulz, R. "Methods for the calculation of CO_2 emissions in logistics activities", In Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics, Springer, pp. 263-268 (2010).
28. NTM, *NTM Calc*, [Online]. Available: http://www.ntm-calc.org/index.html. [Accessed: 18-Dec-2013].
29. Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H.P., Boon, B.H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B. and Bak, M., *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector*, Delft, Netherlands (2008).

پیوست

قضیه: برای هر $\hat{p} \in p, \hat{k} \in k, \hat{t} \in t$ اگر و فقط اگر $Y_{\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0$ آنگاه $E^{\text{var}}_{\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0$.

اثبات:

$$Y_{\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0 \longleftrightarrow y_{\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0 \longleftrightarrow \sum_i \sum_j x_{ij\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0 \xleftarrow{x_{ijpkt} \geq 0}$$

$$x_{ij\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0;\ \forall i,j \longleftrightarrow w_i x_{ij\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0;\ \forall i,j \xleftarrow{x_{ijpkt} \geq 0}$$

$$\sum_i \sum_j w_i x_{ij\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0 \longleftrightarrow \frac{1}{2}\left(E^{\max}_{\hat{p}} - E^{\min}_{\hat{p}}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_i x_{ij\hat{p}\hat{k}\hat{t}}}{W_{\hat{p}}}\right) = 0$$

$$\longleftrightarrow E^{\text{var}}_{\hat{p}\hat{k}\hat{t}} = 0$$