ارائه یک مدل دوسطحی جهت تعیین مالیات بر کربن در یک زنجیره‌تامین سبز با در نظر گرفتن تقاضای حساس به قیمت و انتشار کربن

پگاه مصرزاده اوغاز[۱]، فرزاد دهقانیان[۲]
[۱]کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد؛ pegah.mesrzade@yahoo.com
[۲]دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد؛ f.dehghanian@mail.um.ac.ir

چکیده
امروزه صنعت‌گران و سیاست‌گذاران تحت فشارهای فزاینده‌ای قرار دارند تا به‌طور مداوم اثرات منفی انتشار آلاینده‌های ناشی از زنجیره‌های تامین خود را کاهش دهند. در این پژوهش با تلفیق زنجیره‌تامین سبز به همراه سیاست مالیات کربن به دنبال تعیین سطح بهینه‌ای از قیمت کربن هستیم که از طریق اخذ مالیات کربن بتوان تضمین نمود میزان انتشار گازهای آلاینده تحت کنترل بوده و روند کاهشی خواهند داشت. بدین منظور از یک مدل دوسطحی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جهت برنامه‌ریزی شبکه زنجیره‌تامین با درنظرگرفتن سیاست مالیات کربن استفاده شده‌است که تقاضا متاثر از قیمت محصول نهایی و حساسیت مصرف‌کنندگان به میزان انتشار کربن درنظر گرفته شده‌است. نتایج حاصل از حل یک مطالعه موردی نشان می‌دهد که با افزایش قیمت کربن، زنجیره به سمت کاهش انتشار از طریق استفاده از ظرفیت های سبز تمایل نشان می‌دهد و هرچه این قیمت بالاتر رود، زنجیره‌تامین ترجیح می‌دهد با کاهش تولید، زمینه کاهش انتشار را فراهم سازد.
کلمات کلیدی: مالیات کربن، قیمت‌گذاری کربن، زنجیره‌تامین سبز، سیاست‌های کاهش انتشار کربن، برنامه‌ریزی دوسطحی

A bi-level model to determine carbon tax in a green supply chain considering price-sensitive demand and carbon emission

Pegah Mesrzade Oghaz[1], Farzad Dehghanian[2]
[1]MSc, Ferdowsi University of Mashhad; pegah.mesrzade@yahoo.com
[2]Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad; f.dehghanian@um.ac.ir

ABSTRACT
Currently, industrialists and policymakers are increasingly under pressure to continuously reduce the negative effects of pollutants emitted from their supply chains. In this research, we aim to determine the optimal level of carbon pricing through the integration of a green supply chain with a carbon tax policy. The carbon price level achieved through carbon taxation can ensure control over pollutant emissions and facilitate a downward trend. For this purpose, a bi-level mixed integer programming model is used to plan the supply chain network, considering the carbon tax policy and the demand influenced by factors such as the price of the final product and consumer sensitivity to carbon emissions. The results obtained from a case study demonstrate that as the carbon price increases, the supply chain tends towards emission reduction by using green capacities. The higher the carbon price goes, the more the supply chain prefers to reduce production and create conditions for emission reduction.
Keywords: carbon tax, carbon pricing, emission reduction policies, A bi-level planning

۱- مقدمه و مروری بر ادبیات

۱-۱- مقدمه

تغییرات آب‌وهوایی و تاثیرات مخرب آن بر روی کره‌زمین و بشریت همواره در حال افزایش است و یکپارچگی و امنیت اقتصادی و کیفیت زندگی اقشار آسیب‌پذیر را تهدید می‌کند [۱]. در سال ۱۹۹۵، هیئت بین‌المللی تغییرات آب‌وهوایی[۱] (IPCC) اشاره کرد که افزایش دمای سطح زمین عمدتاً به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر است، یعنی افزایش گازهای گلخانه‌ای مبتنی بر دی‌اکسیدکربن عامل اصلی گرمایش جهانی کره‌زمین معرفی شده‌است [۲].

گسترش حمل‌ونقل و شبکه‌های تامین و توزیع به منظور جابجایی کالاها، روش‌های مختلف تولید و نگهداری در مراکز صنعتی باعث شده‌است تا فعالیت‌های زنجیره‌های تامین به عنوان عوامل موثر در افزایش انتشار کربن شناسایی شوند [۳].

[1]Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC پیشنهاد می‌کند می‌توان از تغییرات شدید آب‌وهوا با اعمال مالیات بر کربن ۸۰ دلاری به ازای انتشار هر تن دی‌اکسیدکربن جلوگیری کرد. بنابراین، شرکت‌ها امروزه دریافته‌اند که باید به عنوان استراتژی‌های معمول، هزینه‌های انتشار خود را تحت مالیات کربن بپردازند [۱]. با این حال، از آنجایی که اعمال سیاست مالیات بر کربن دولت تاثیر مهمی بر رفتارهای خرد شرکت‌ها دارد، نحوه طراحی سیاست مالیات کربن بهینه از دیدگاه دولت چالش‌زاست، چراکه تعیین سطح مناسب میزان انتشار کربن جهت اخذ مالیات به‌طوری که هدف آن حداکثر رساندن کاهش انتشار و به حداقل رساندن تاثیرات مخرب اقتصادی باشد، باید توسط دولت درنظر گرفته شود [۴].

همچنین برای حمایت از صنایع تولیدی و تولید محصولات کاربردی، دولت و سازمان‌های خصوصی سرمایه‌گذاری‌های تحقیق و توسعه ای مختلفی را در فناوری‌های پاک انجام داده‌اند. از این‌رو فناوری سبز با انتشار کربن کمتر و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتر را جایگزین فناوری عادی با انتشار کربن بیشتر و هزینه سرمایه‌گذاری کمتر کرده‌اند.

علاوه براین، تعداد فزاینده‌ای از مصرف‌کنندگان آگاه به محیط‌زیست، رقابت بین شرکت‌ها را برای تهیه محصولات سبزتر و در نتیجه افزایش سهم بازار آن‌ها افزایش می‌دهند. [5, 6]. از این‌رو یکی از عواملی که به صورت موثر در کاهش انتشار کربن مورد بررسی قرار گرفته است، آگاهی زیست‌محیطی مشتریان از میزان انتشار کربن در محصولات است. برخی از محققان نیز ارتباط مثبتی بین رفتار مصرف‌کنندگان و شیوه‌های تولید پیدا کرده‌اند و از آنجا که رفتار مصرف‌کننده به طور فزاینده‌ای تحت تاثیر آگاهی محیطی قرار دارد، زنجیره‌های تامین برای پاسخ‌دادن به این تغییر عمده تحت فشار مداوم هستند [۷].

در کنار حساسیت تقاضا به میزان آلایندگی محصول، قیمت نهایی محصول نیز از جمله مواردی است که مشتریان را ترغیب به خرید محصول کرده و همچنین می‌تواند به عنوان عامل بازدارنده در خرید محسوب گردد [۸]. اهمیت این موضوع باعث شده‌است در این تحقیق تقاضای مشتریان علاوه بر حساسیت به انتشار کربن، نسبت به قیمت محصول نهایی نیز متفاوت باشد تا بر اساس خواسته مصرف‌کنندگان قیمت منصفانه‌ای برای محصول نهایی ارائه گردد.

بنابراین اگرچه نتایج نشان داده‌است ایجاد اینگونه سیاست‌ها درکاهش انتشار کربن موثر بوده‌است اما مسئله‌ای که بایستی برای اعمال اینگونه سیاست‌ها درنظر گرفته شود، میزان قیمت تعیین‌شده برای کربن، حد آستانه انتشار کربن، هزینه اجرای تکنولوژی‌های سبز و چالش سودآوری سازمان‌ها، تاثیرات بر بخش‌های مختلف اقتصاد و میزان کاهش انتشار کربن است [۹]. از این رو در تحقیق پیش رو بهینه‌سازی تصمیمات قیمت‌گذاری کربن از طریق یک بازی دو طرفه مطرح شده‌است که دولت به عنوان رهبر این بازی با تعیین آستانه انتشار کربن تولیدشده در زنجیره به دنبال تعیین قیمت کربنی است که این قیمت در جهت اخذ مالیات از سازمان‌ها در مدل پیرو قرار می‌گیرد و مدل پیرو نیز با هدف افزایش سودآوری بنگاه‌ها سیاست مالیات کربن را در جهت کاهش انتشار کربن لحاظ کرده‌است.

۱-۲-مروری بر ادبیات

مقالات پیشینه تحقیق حاضر، از منظر طرح‌های کاهش انتشار به سه دسته تقسیم‌بندی شده‌اند، در بخش اول مقالات با هدف ایجاد تکنولوژی‌های سبز و طراحی زنجیره‌تامین سبز، در بخش دوم مقالات با هدف ایجاد سیاست‌های کاهش انتشار کربن و در بخش سوم مقالاتی مطرح شده‌است که به صورت چندسطحی می‌باشند و با استفاده از تئوری بازی‌ها مدل‌سازی شده‌اند.

اولین مطالعاتی که با هدف کاهش انتشار کربن انجام شده‌اند، به طراحی زنجیره‌تامین سبز و اصلاح تکنولوژی حمل‌ونقل، تکنولوژی تولید و نگهداری پرداخته‌اند. López و همکارانش در سال ۲۰۱۸ دریافتند نوآوری‌های جدیدی چون حمل‌ونقل برقی و حمل‌ونقل بدون آلایندگی بایستی در زنجیره‌های تامین در اولویت قرار گیرند تا موجب کاهش انتشار کربن گردد [۱۰].

پس از آن Jennifer در تحقیقی نشان داد فناوری سبز مانند تکنولوژی جذب کربن، مدیریت کردن زباله و فناوری تولید برق به طور قابل‌توجهی بحران‌های انرژی، محیط زیست و تغییرات آب‌وهوایی جهان را در آینده کاهش خواهد داد [۱۱].

اعمال سیاست‌های کم‌کربن و مالیاتی چون تجارت کربن و مالیات کربن به صورت گسترده‌ای توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. Sundarkani و همکارانش در تحقیقی نشان دادند که کربن انتشار یافته از یک زنجیره‌تامین می‌بایست طی دو جنبه تقسیم‌بندی گردد: جنبه اول شامل منابع مستقیم مانند انتشار حاصل از تولید و نگهداری و جنبه دوم منابع غیر ثابت مانند حمل‌ونقل و تدارکات می باشد. هدف آن‌ها افزایش سودآوری زنجیره است در حالیکه ریسک انتشار کربن را از طریق اعمال سیاست مالیات کربن کاهش می‌دهد [۱۲].

Kaiying Cao و همکاران در تحقیقی دو سیاست کم‌کربن مالیاتی و یارانه‌ای را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها به بررسی اینکه کدام یک از سیاست های CTP[2] و LCSP[3] و برای جامعه مناسب‌تر است پرداخته‌اند [۱۳].

Zakeri و همکاران در تحقیقی یک مدل تحلیلی برنامه‌ریزی زنجیره‌تامین را ارائه داده‌اند. آن‌ها روی مقایسه عملکرد اقتصادی و انتشار کربن تحت طرح‌های قیمت‌گذاری کربن و تجارت کربن متمرکز شده‌اند. بنابراین از دو تابع هدف کاهش انتشار تحت سیاست تجارت کربن و دیگری تحت سیاست مالیات کربن و سپس از داده‌های واقعی شرکتی در استرالیا جهت حل مدل خود استفاده کردند [۱۴].

بررسی آگاهی مصرف کنندگان از انتشار کربن و حساسیت تقاضا به انتشار توسط Shaofu Du و همکارانش انجام شده است. در پژوهش آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی چندمحصولی برای کالای معمولی و کم‌کربن با درنظر گرفتن آگاهی زیست‌محیطی مصرف‌کنندگان تعریف شده است. آن‌ها آستانه‌های مجازی را برای تولید کربن شناسایی کردند که تولید کم‌کربن در آن آستانه‌ها سودآور بوده‌است [۱۵].

باتوجه به اینکه در زنجیره‌تامین سبز مکان‌یابی تسهیلات از اهمیت بالایی در کاهش انتشار کربن برخوردار است تحقیقات مفیدی در این حوزه انجام شده است. Bilir و همکارانش با استفاده از طراحی یک زنجیره‌تامین سه‌سطحی و تقاضای حساس به قیمت و انتشار کربن به دنبال مکان‌یابی بهینه‌ای هستند که در آن کمترین فاصله میان مرکز توزیع و مشتری ایجاد شود و میزان انتشار کربن کاهش یابد [۱۶].

در مطالعه‌ای که توسط Zhaofu Hong و همکارانش انجام شده‌است، از یک مدل‌سازی دوسطحی برای کاهش انتشار کربن استفاده شده‌است که در این مقاله دولت هدف کاهش انتشار گازهای منطقه را تعیین می‌کند و شرکت‌ها تولید خود را مطابق با کمک‌هزینه‌های خود برنامه‌ریزی می‌کنند. هدف آن‌ها به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی منطقه و سود هر شرکت می‌باشد [۱۷].

لذا با مطالعه تحقیقات پیشین، یکی از مواردی که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است و هدف اصلی مقاله پیش‌رو خواهد بود، تعیین قیمت بهینه کربن جهت اخذ مالیات کربن از طریق یک مدل دوسطحی است که در کنار تقاضای حساس به قیمت محصول نهایی و انتشار کربن به صورت جامع‌تری به کاهش انتشار کربن بپردازد.

۲- تعریف مساله

زنجیره‌تامین مورد بررسی در این پژوهش به صورت تک کالایی و چند دوره‌ای شامل سه سطح تولید کننده، مرکز نگهداری و مشتری می‌باشد. مدل تحقیق به صورت دوسطحی رهبر و پیرو است که در سطح اول مدل، رهبر درجایگاه بالاتری نسبت به پیرو قرار دارد و براساس سیاست مدل خود که کمینه‌سازی قیمت کربن می‌باشد به دنبال یافتن بهترین راهبرد جهت تعیین قیمت کربن است و پیرو در سطح دوم می‌بایست بر اساس قیمتی که رهبر تعیین نموده‌است سود زنجیره‌تامین را افزایش دهد. این چرخه تاجایی ادامه پیدا خواهد کرد که محدودیت مدل رهبر برقرار شود.

۲-۱-مجموعه‌ها و پارامترها

مجموعه‌های مورد استفاده در مساله به شرح زیر می‌باشند:

I مجموعه سایت‌های تولیدی، J مجموعه انبارهای نگهداری محصول نهایی، K مجموعه مشتریان، V مجموعه روش‌های حمل‌ونقل، L مجموعه بازه‌های تعریف شده جهت خطی‌سازی رابطه انتشار کربن، Q مجموعه حالات قیمت نهایی محصول

پارامترهای ورودی مدل مساله به شرح زیر می‌باشند:

PC_{it} هزینه تولید هر واحد محصول نهایی در سایت i در دوره t (دلار بر واحد کالا)

FC_{it} هزینه اورهال سایت i در دوره t (دلار)

FC'_{jt} هزینه بازگشایی انبار j در دوره t (دلار)

HC_{jt} هزینه نگهداری هر واحد محصول نهایی در انبار j در دوره t (دلار بر واحد کالا)

TC_{ijvt} هزینه انتقال هر واحد محصول نهایی از سایت i به انبار j با روش حمل‌ونقل v در دوره t (دلار بر واحد کالا)

TC'_{jkvt} هزینه انتقال هر واحد محصول نهایی از انبار j به مشتری k با روش حمل‌ونقل v در دوره t (دلار بر واحد کالا)

[2] Cap-and-Trade Policy
[3] Low Carbon Subsidy Policy

SH_{kt} هزینه به ازای هر واحد کمبود محصول نهایی برای مشتری k در دوره t (دلار بر واحد کالا)

α_{it} حداکثر ظرفیت تولیدی سایت i برای تولید محصول نهایی در دوره t (ساعت)

α'_{jt} حداکثر ظرفیت انبار j برای نگهداری محصول نهایی در دوره t (واحد کالا)

c_{it} زمان مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی در سایت i در دوره t (ساعت)

λ_j سطح موجودی محصول نهایی در انبار j در شروع افق برنامه‌ریزی (t=0) (واحد کالا)

λ'_j سطح موجودی محصول نهایی در انبار j درپایان افق برنامه‌ریزی (t=0) (واحد کالا)

S_{kt}^{max} حداکثر میزان مجاز کمبود محصول نهایی برای مشتری k در دوره t (واحد کالا)

R_{it} حداکثر مواد خام موجود در سایت i برای تولید محصول نهایی در دوره t (واحد کالا)

β_{ijvt} حداکثر مجاز ارسال محصول نهایی از سایت i به انبار j با روش حمل‌ونقل v در دوره t (واحد کالا)

β'_{jkvt} حداکثر مجاز ارسال محصول نهایی از انبار j به مشتری k با روش حمل‌ونقل v در دوره t (واحد کالا)

$e1_{it}$ میزان کربن منتشر شده به ازای تولید هر واحد محصول نهایی در سایت i در دوره t (کیلوگرم بر واحد کالا)

$e2_{jt}$ میزان کربن منتشر شده به ازای نگهداری هر واحد محصول نهایی در انبار j در دوره t (کیلوگرم بر واحد کالا)

$e3_{ijvt}$ میزان کربن منتشر شده به ازای ارسال هر واحد محصول نهایی از سایت i به انبار j با روش حمل‌ونقل v در دوره t (کیلوگرم بر واحد کالا)

$e4_{jkvt}$ میزان کربن منتشر شده به ازای ارسال هر واحد محصول نهایی از انبار j به مشتری k با روش حمل‌ونقل v در دوره t (کیلوگرم بر واحد کالا)

θ_{kt} میزان تقاضای بالقوه برای مشتری k در دوره t (واحد کالا)

ρ_q درصد حساسیت مشتریان به انتخاب قیمت q

δ_t ضریب حساسیت تقاضا به میزان انتشار کربن در دوره t

pr_q قیمت تعیین‌شده حالت q برای محصول نهایی (دلار)

$E0_t$ آستانه انتشار کربن به ازای هر واحد محصول در دوره t (کیلوگرم)

$\emptyset$ ضریب کاهش انتشار کربن در مدل رهبر

π قیمت پیشنهاد شده برای کربن (دلار)

M عدد بزرگ

متغیرهای مساله به شرح زیر می‌باشند:

X_{jkvt} مقدار محصول ارسال شده از انبار j به مشتری k با روش حمل‌ونقل v در دوره t

X'_{ijvt} مقدار محصول ارسال شده از سایت i به انبار j با روش حمل‌ونقل v در دوره t

D_{kt} مقدار تقاضای مشتری k در دوره t

I_{it} مقدار محصول تولید شده در سایت i در دوره t

I'_{jt} مقدار موجودی محصول نهایی در انبار j در انتهای دوره t

S_{kt} مقدار کمبود برای مشتری k در دوره t

TE_t مقدار کل کربن منتشر شده در زنجیره در دوره t

E_t مقدار کربن منتشر شده به ازای هر واحد محصول نهایی در در دوره t

B_{kt} تعداد مشتریان k که در دوره t از خرید محصول منصرف می‌شوند

P قیمت فروش محصول نهایی

Y_{it} اگر سایت i در دوره t مورد استفاده قرار گیرد ۱ در غیر این‌صورت ۰

Y'_{jt} اگر انبار j دوره t مورد استفاده قرار گیرد ۱ در غیر این‌صورت ۰

g'_q اگر قیمت حالت q انتخاب شود ۱ در غیر این‌صورت ۰

W_{ijvt} اگر محصول نهایی از سایت i به انبار j با روش حمل‌ونقل v در دوره t حمل شود ۱ در غیر این‌صورت ۰

W'_{jkvt} اگر محصول نهایی از انبار j به مشتری k با روش حمل‌ونقل v در دوره t حمل شود ۱ در غیر این‌صورت ۰

متغیرهای خطی‌سازی مدل مساله به شرح زیر می‌باشند:

g'_q متغیر خطی‌سازی رابطه درآمد و جایگزین متغیر X_{jkvt}

η_l متغیر خطی سازی رابطه تقسیم میزان کل انتشار کربن بر مجموع محصولات ارسال شده، درصورتی که متغیر $\sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv}$ در بازه تعریف شده قرار گرفت، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰

۲-۲-مدل مساله

تابع هدف مدل پیرو از دو بخش درآمد و هزینه‌ها تشکیل شده‌است و هدف آن بیشینه‌سازی سود زنجیره‌تامین می‌باشد که از اختلاف درآمد و هزینه‌ها محاسبه می‌گردد. درآمد زنجیره‌تامین با Z_1 نمایش داده شده‌است که طبق رابطه زیر از حاصل‌ضرب قیمت فروش محصول نهایی در میزان محصول ارسال‌شده به مشتریان بدست خواهد آمد. این عبارت به علت ضرب دو متغیر پیوسته درهم یک رابطه غیرخطی است.

$$Z_1 = (P \times \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t X_{jkvt}) \quad (۱)$$

برای اطمینان از بهینه بودن جواب مسئله، بایستی روابط غیرخطی را به عبارات خطی تبدیل نماییم. لذا باتوجه به اینکه قیمت نهایی محصول از قیمت‌های تعیین شده انتخاب خواهد شد، بنابراین رابطه درآمد را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\sum_q pr_q g_q \times \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t X_{jkvt} \quad (۲)$$

حال باتوجه به اینکه این عبارت متشکل از یک متغیر باینری (g_q) و یک متغیر پیوسته (X_{jkvt}) است، همچنان غیرخطی است [۱۸]. بدین منظور یک متغیر به صورت g'_q بجای متغیر پیوسته X_{jkvt} تعریف می‌کنیم و قیود زیر را جهت خطی شدن عبارت فوق به مدل مسئله اضافه می‌کنیم:

$$\begin{cases} M \times (g_q - 1) + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t X_{jkvt} \le g'_q \le \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t X_{jkvt} \\ g'_q \le M \times g_q \end{cases} \quad ;\forall q \quad (۳)$$

در معادلات هنگامی که متغیر g_q مقدار ۱ بگیرد، طبق رابطه اول برابر با مقدار کالای ارسال شده به مشتریان می‌شود و درصورتی که مقدار صفر گرفته‌باشد از معادلات بالا می‌توان نتیجه گرفت مقدار g'_q برابر با صفر است. لذا معادله درآمد به شکل رابطه (۴) بازنویسی و جایگزین رابطه (۲) می‌شود که این رابطه، یک رابطه خطی است.

$$Z_1 = \sum_q pr_q \times g'_q \quad (۴)$$

هزینه‌های زنجیره‌تامین مطابق با رابطه Z_2 به ترتیب شامل هزینه ثابت اورهال سایت‌های تولیدی، هزینه تولید محصول نهایی در سایت های تولیدی، هزینه ارسال محصول نهایی به انبارها، هزینه ثابت بازگشایی انبارها، هزینه نگهداری محصول نهایی در انبارها، هزینه ارسال محصول نهایی به مشتریان، هزینه کمبود و هزینه انتشار کربن می‌باشد.

$$Z_2 = \left[\left(\sum_i \sum_t FC_{it} Y_{it}\right) + \left(\sum_i \sum_t PC_{it} I_{it}\right) + \left(\sum_i \sum_j \sum_v \sum_t TC_{ijvt} X'_{ijvt}\right) + \left(\sum_j \sum_t FC'_{jt} Y'_{jt}\right) + \left(\sum_j \sum_t HC_{jt} I'_{jt}\right) + \left(\sum_j \sum_k \sum_v \sum_t TC'_{jkvt} X_{jkvt}\right) + \left(\sum_k \sum_t SH_{kt} S_{kt}\right) + \pi\left(\sum_t TE_t\right)\right] \quad (۵)$$

بنابراین مقدار بیشینه‌سازی سود زنجیره‌تامین طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$max: Z = Z_1 - Z_2 \quad (۶)$$

محدودیت کربن منتشر شده در زنجیره‌تامین به ازای هر دوره از افق برنامه‌ریزی از چهار جزء تشکیل شده‌است، جزء اول میزان کربن منتشر شده حاصل از تولید محصول نهایی در کارخانجات، جزء دوم میزان کربن منتشر شده حاصل از نگهداری محصولات در انبارها و جزء سوم و چهارم میزان کربن منتشر شده حاصل از حمل‌ونقل محصول نهایی از سایت به انبار و از انبار به مشتری را نشان می‌دهد.

$$TE_t = \left(\sum_i I_{it} e1_{it}\right) + \left(\sum_j I'_{jt}\, e2_{jt}\right) + \left(\sum_i \sum_j \sum_v X_{ijvt} e3_{ijvt}\right) + \left(\sum_j \sum_k \sum_v X_{jkvt} e4_{jkvt}\right) \quad (۷)$$

تابع تقاضا در مدل مساله وابسته به قیمت فروش و میزان کربن منتشر شده می‌باشد که با تغییر قیمت فروش محصول نهایی و میزان کربن منتشر شده به ازای هر واحد محصول تغییر می‌کند. رابطه (8) برگرفته از تابع تقاضا در مدل مسئله Shaofu Du می‌باشد [۱۹].

$$D_{kt} = \theta_{kt} - B_{kt} + \delta_t (E0_t - E_t) \quad (۸)$$

رابطه (۹) براساس قیمت‌های تعیین‌شده برای محصول نهایی می‌باشد و تعداد مشتریانی که از خرید محصول منصرف می‌شوند را نشان می‌دهد. سپس از طریق رابطه (۱۰) و (۱۱) قیمت فروش محصول نهایی محاسبه خواهد شد که انتخاب یکی از حالت‌های قیمت می‌باشد.

$$B_{kt} = \theta_{kt} \times \sum_q \rho_q g_q \quad (۹)$$

$$P = \sum_q pr_q g_q \quad (۱۰)$$

$$\sum_q g_q = 1 \quad (۱۱)$$

میزان کربن منتشر شده به ازای واحد محصول از تقسیم کل کربن منتشر شده در زنجیره‌تامین بر میزان محصول ارسال شده به مشتریان محاسبه می‌گردد که این رابطه به علت تقسیم دو متغیر پیوسته یک عبارت غیرخطی خاص محسوب می‌گردد.

$$E_t = \frac{TE_t}{\sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv}} \quad ; \ \forall t \quad (۱۲)$$

جهت خطی‌سازی رابطه فوق از یک روش ابتکاری و تقریبی استفاده شده‌است. درابتدا فرض می‌کنیم مخرج کسر که مقدار محصول ارسال شده به هریک از مشتریان است در بازه رابطه (۱۳) قرار می‌گیرد:

$$1 \le \sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv} \le n \quad (۱۳)$$

مقدار n یک حد بالا برای عبارت $\sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv}$ می‌باشد. اگر مقدار محصول ارسال شده به مشتری را به $n-1$ بازه مساوی تقسیم نماییم و برای هریک از بازه‌ها با تعریف یک متغیر صفر و یک مانند η_l روابط را طوری ایجاد کنیم که اگر متغیر $\sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv}$ در آن بازه قرار گرفت، متغیر η_l مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ بگیرد. لذا طبق روابط زیر داریم:

$$1\eta_1 \le \sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv} \le 2 + M(1 - \eta_1) \quad (۱۴)$$

$$2\eta_2 \le \sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv} \le 3 + M(1 - \eta_2) \quad (۱۵)$$

$$(n-1)\eta_{n-1} \le \sum_j \sum_k \sum_v X_{jkv} \le n + M(1 - \eta_{n-1}) \quad (۱۶)$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} \eta_l = 1 \quad (۱۷)$$

حال مقدار E_t نیز در یکی از بازه‌های زیر قرار خواهد گرفت که حد بالایی از E_t را مشخص خواهد کرد:

$$E_t \le TE_t + M(1-\eta_1) \quad (۱۸)$$

$$E_t \le \frac{TE_t}{2} + M(1-\eta_2) \quad (۱۹)$$

$$E_t \le \frac{TE_t}{n-1} + M(1-\eta_{n-1}) \quad (۲۰)$$

بدیهی است هرچه طول بازه‌های تعریف‌شده مقادیر نزدیک‌تری به هم داشته باشند، مقدار حد بالا برای E_t دقیق‌تر خواهد بود.

باتوجه به اینکه اساس سیاست کاهش انتشار کربن در این تحقیق طبق سیاست مالیات کربن پایه‌ریزی شده‌است که می‌بایست میزان انتشار کربن حداکثر به میزان آستانه انتشار باشد. این موضوع در رابطه (۲۱) نشان داده شده‌است.

$$0 \le E_t \le E0_t \quad (۲۱)$$

طبق رابطه (۲۲) میزان محصول ارسال شده به ازای هر مشتری در هر دوره از افق برنامه‌ریزی می‌بایست حداکثر به میزان کل تقاضای مشتریان در هر دوره باشد.

$$\sum_j \sum_v X_{jkvt} \le D_{kt} \quad ; \forall k,t \quad (۲۲)$$

میزان محصول تولید شده در سایت‌های تولیدی مطابق با رابطه زیر نباید از مواد اولیه موجود در آن سایت تجاوز نماید.

$$I_{it} \le R_{it} \quad ; \forall i,t \quad (۲۳)$$

روابط زیر ظرفیت ساعات در دسترس در کارخانجات و ظرفیت نگهداری در انبارها را نشان می‌دهد.

$$I_{it} \times c_{it} \le \alpha_{it} \quad ; \forall i,t \quad (۲۴)$$

$$I'_{jt} \le \alpha'_{jt} \quad ; \forall j,t \quad (۲۵)$$

دو محدودیت زیر حداکثر مجاز ظرفیت ارسال محصول نهایی را نشان می‌دهند.

$$X'_{ijvt} \le \beta_{ijvt} \quad ; \forall i,j,v,t \quad (۲۶)$$

$$X_{jkvt} \le \beta'_{jkvt} \quad ; \forall j,k,v,t \quad (۲۷)$$

تعادل موجودی در انبارها براساس رابطه زیر نشان داده شده‌است.

$$I'_{jt} - I'_{j(t-1)} = \sum_i \sum_v X'_{ijvt} - \sum_k \sum_v X_{jkvt} \quad ; \forall j,t \quad (۲۸)$$

محدودیت (۲۹) نشانگر این است که کل تولید در سایت‌های تولیدی باید پاسخگوی تقاضا تا انتهای دوره زمانی برنامه‌ریزی باشد.

$$\sum_i \sum_t I_{it} = \sum_k \sum_t D_{kt} + \sum_j \lambda'_j - \sum_j \lambda_j \quad (۲۹)$$

مقدار تقاضای عقب‌افتاده براساس رابطه (۳۰) می‌بایست از حداکثر مجاز کمبود در نقطه مصرف‌کننده کمتر باشد.

$$S_{kt} \le S_{kt}^{max} \quad ; \forall k,t \quad (۳۰)$$

محدودیت زیر نشان می‌دهد تعادل موجودی در نقطه مصرف‌کننده نیز می‌بایست برقرار باشد.

$$\sum_j \sum_v X_{jkvt} = D_{kt} - S_{kt} + S_{k(t-1)} \quad ; \forall k,t \quad (۳۱)$$

محدودیت‌های (۳۲) و (۳۳) به ترتیب بیانگر این است که میزان موجودی در ابتدا و انتهای افق برنامه‌ریزی می‌بایست برابر با مقدار مشخصی باشد.

$$I'_{j0} = \lambda_j \quad ; \forall j \quad (۳۲)$$

$$I'_{jT} = \lambda'_j \quad ; \forall j \quad (۳۳)$$

محدودیت‌های (۳۴) تا (۳۹) حدود متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

$$0 \le I_{it} \le Y_{it} \times M \quad ;\forall i,t \qquad (۳۴)$$

$$0 \le X'_{ijvt} \le Y_{it} \times M \quad ;\forall i,j,v,t \qquad (۳۵)$$

$$0 \le X'_{ijvt} \le Y'_{jt} \times M \quad ;\forall i,j,v,t \qquad (۳۶)$$

$$0 \le X_{jkvt} \le Y'_{jt} \times M \quad ;\forall j,k,v,t \qquad (۳۷)$$

$$I'_{jt} \ge 0 \quad ;\forall j,t \qquad (۳۸)$$

$$S_{kt} \ge 0 \quad ;\forall j,t \qquad (۳۹)$$

در سطح دوم مدل مساله که به مدل رهبر معروف است، به دنبال یافتن کمترین قیمتی برای کربن هستیم تا میزان کربن منتشر شده در کل زنجیره به میزان مشخصی کاهش یابد. این حداقل قیمت تعیین‌شده برای کربن را با π نمایش می‌دهیم. مقدار $\emptyset$ ضریبی است که توسط دولت تعیین می‌گردد که نشان می‌دهد، با اعمال قیمت کربن و اخذ مالیات در ازای تولید، نگهداری و حمل محصولات در مدل پیرو، به دنبال چه مقدار کاهش کربن تولید شده در زنجیره‌تامین می‌باشد. این چرخه تا جایی ادامه خواهد یافت که محدودیت (۴۱) برقرار شود.

مدل رهبر به صورت تابع هدف (۴۰) و محدودیت (۴۱) می‌باشد:

$$\textbf{Leader:} \quad min\ \pi \qquad (۴۰)$$

$$\sum_t TE_t \le \emptyset \times (\sum_t TE_t)_{\pi=0} \qquad (۴۱)$$

۳- روش حل

مطالعه موردی مسئله یک زنجیره‌تامین سه‌سطحی شامل تولیدکننده، توزیع‌کننده و مصرف‌کننده یک کالای خاص در کشور استرالیا می‌باشد. برنامه ریزی این زنجیره در یک افق زمان‌بندی ۱۲ دوره‌ای انجام شده‌است. دو مرکز تولیدی در دو شهر مختلف استرالیا جهت تولید این محصول با ظرفیت‌های تولیدی و تکنولوژی تولیدی مشخصی احداث گردیده‌است که تکنولوژی تولید در یکی از این مراکز به علت قدیمی بودن آلایندگی بیشتری تولید می‌کند و در عوض کارخانه دیگر دارای تکنولوژی تولید جدیدتر و میزان انتشار آلایندگی کمتری می‌باشد. محصول تولید شده از طریق سه روش جاده‌ای، ریلی و یا دریایی به سه انبار در شهرهای مختلف ارسال می‌گردد که هر یک از این روش‌های انتقال میزان انتشار آلایندگی متفاوت و ظرفیت مشخصی دارند. در طراحی انبارها نیز همانند سایت‌های تولیدی از تکنولوژی عادی و سبز بهره گرفته شده‌است و درنهایت محصول نهایی به مشتریان ارسال می‌گردد.

جهت تخمین پارامترهای قیمت تمام‌شده برای محصول نهایی، مدل در نرم‌افزار گمز بدون درنظر گرفتن حساسیت تقاضا و انتشار کربن حل شده‌است و نقطه سربه‌سر سود مشخص گردید. براساس نتایج بدست‌آمده، سه قیمت مختلف ۲۸۰، ۲۹۰ و ۳۰۰ برای محصول نهایی درنظر گرفته شده‌است که با انتخاب قیمت اول ۱۰ درصد از مشتریان، با انتخاب حالت دوم ۳۰ درصد از مشتریان و با انتخاب حالت سوم قیمت ۵۰ درصد از مشتریان از خرید خود منصرف می‌شوند. جهت تخمین پارامتر مقدار آستانه انتشار کربن، در ابتدا مدل بدون درنظر گرفتن حساسیت تقاضا به انتشار کربن توسط نرم‌افزار گمز و با استفاده از دیتاهای موجود و قیمت‌های متفاوت حل شده‌است و نتایج جدول ۱ حاصل گردید که در این راستا میزان انتشار کربن به‌ازای واحد محصول در دوره‌های افق برنامه‌ریزی محاسبه و ماکزیمم آن‌ها به عنوان مبنا قرار گرفته‌است.

بیشترین مقدار انتشار به ازای محصول (kg)	مقدار انتشار کل (تن)	مقدار محصول ارسال شده به مشتری	مقدار سود ($)	قیمت تعین‌شده انتخاب شده ($)
۱۳۰	۱۲۸۱	۱۲۹۰۶	۹۳۶۶۶۵	۲۸۰
۱۱۵	۱۰۳۲	۱۰۰۳۸	۸۴۸۹۹۱	۲۹۰
۱۲۵	۷۴۲	۷۱۷۰	۵۹۷۸۹۶	۳۰۰

جدول۱- نتایج محاسباتی برای یافتن پارامتر آستانه انتشار کربن

پارامتر حساسیت مشتریان به انتشار کربن نیز با استفاده از ضریب δ_t و مقدار اولیه ۱۰ که ضریبی جهت افزایش تابع تقاضا با توجه به اختلاف میزان انتشار تولیدشده به ازای هر واحد نسبت به آستانه کربن تعیین شده است، می‌باشد. در مدل رهبر پارامتر π تحت عنوان قیمت کربن جهت تعیین کمترین قیمت ممکن برای تحقق محدودیت کاهش ۱۰ درصدی میزان کل انتشار در زنجیره می‌باشد که پارامتر ϕ=۰,۹ به‌منظور نشان‌دادن ضریب کاهش انتشار در کل زنجیره است.

برای حل مدل، در ابتدا مقدار قیمت کربن صفر (π=۰) درنظر گرفته شده‌است و درواقع هزینه‌ای جهت اخذ مالیات به‌ازای انتشار کربن به زنجیره تحمیل نشده‌است و زنجیره می‌تواند هر میزان انتشاری را تولید نماید که تاثیری در سود آن نخواهد داشت. لذا جهت کاهش قابل ملاحظه در انتشار کربن بایستی مقدار قیمت کربن را بر اساس سیاست تعیین‌شده توسط دولت که کاهش حداقل ۱۰ درصدی مقدار کل انتشار کربن در زنجیره می‌باشد، مطابق با مدل رهبر تعیین نماییم، از این‌رو با استفاده از روش شمارش کامل به ازای مقادیر مختلف و صعودی π مقادیر سود زنجیره و مقدار کل انتشار کربن در زنجیره محاسبه خواهد شد که نتایج آن براساس جدول ۲ خواهد بود.

قیمت محصول نهایی ($)	مقدار سود ($)	مقدار درامد ($)	مقدار کل هزینه ها ($)	مولفه های هزینه ($)					درصد کاهش انتشار کربن (٪)	مقدار کل انتشار (kg)	مولفه های انتشار کربن (kg)			قیمت کربن ($ per kg)
				انتشار	کمبود	حمل و نقل	نگهداری	تولید			حمل و نقل	نگهداری	تولید	
۳۰۰	۲۱۶۲۲۹۸	۵۶۸۸۰۰۰	۳۷۰۵۷۰۱	۰	۱۴۷۰	۳۵۵۹۴۹	۵۱۰۶۲۰	۲۸۳۷۶۶۲	۰	۲۰۹۳۹۶۹	۱۱۵۵۵۴۶	۱۵۰۰۰	۹۲۳۴۲۲	۰
۳۰۰	۱۹۵۲۲۳۲	۵۶۸۸۰۰۰	۳۹۱۵۷۶۷	۲۰۹۳۷۰	۱۴۷۰	۳۵۴۸۰۹	۵۱۲۴۵۴	۲۸۳۷۶۶۲	۰,۰۱	۲۰۹۳۷۰۴	۱۱۵۱۴۰۳	۱۸۸۷۷	۹۲۳۴۲۲	۰,۱
۳۰۰	۱۷۴۴۲۱۸	۵۶۸۸۰۰۰	۴۱۲۵۷۱	۴۱۸۰۲۵	۱۴۰۰	۳۵۳۹۰۵	۵۱۲۶۸۱	۲۸۳۷۷۷۰	۰,۱۸	۲۰۹۰۱۲۶	۱۱۴۸۰۸۷	۱۸۶۶۸	923370	۰,۲
۳۰۰	۱۵۶۱۰۹۲	۵۶۸۸۰۰۰	۴۳۰۶۹۰۷	۶۱۴۷۹۸	۱۴۷۰	۳۴۱۴۶۹	۵۱۱۲۰۹	۲۸۳۷۹۵۹	۲,۱	۲۰۴۹۳۲۹	۱۱۱۰۸۲۶	۱۵۰۸۰	۹۲۳۴۲۲	۰,۳
۳۰۰	۱۳۶۷۵۳۵	۵۶۸۸۰۰۰	۴۵۰۰۴۶۴	۸۱۳۶۵۱	۱۴۷۰	۳۳۷۶۹۵	۵۰۹۵۳۳	۲۸۳۸۱۱۳	۲,۹	۲۰۳۴۱۲۹	۱۰۹۸۹۹۱	۱۱۷۱۵	923422	۰,۴
۳۰۰	۱۱۷۲۳۲۰	۵۶۸۸۰۰۰	۴۶۹۵۶۷۹	۱۰۱۲۵۴۸	۱۳۳۰	۳۳۶۷۰۵	۵۰۶۸۹۴	۲۸۳۸۲۰۰	۳,۳	۲۰۲۵۰۹۶	۱۰۹۵۶۳۹	۶۱۳۹	923317	۰,۵
۳۰۰	۹۷۴۳۸۵	۵۸۶۲۰۰۰	۴۸۸۷۶۱۴	۱۲۱۰۳۵۰	۱۰۵۰	۳۳۵۴۹۷	۵۰۵۵۲۹	۲۸۳۵۱۸۷	۳,۷	۲۰۱۷۲۵۰	۱۰۹۲۰۲۱	۲۹۶۱	922267	۰۶
۳۰۰	۷۷۴۸۱۵	۵۸۵۳۰۰۰	۵۰۷۸۱۸۴	۱۴۰۶۹۸۲	۶۳۰	۳۳۴۳۲۱	۵۰۴۴۳۹	۲۸۳۱۸۱۲	۴	۲۰۰۹۹۷۴	۱۰۸۸۴۴۰	۸۴۲	920692	۰,۷
۳۰۰	۵۸۳۹۱۴	۵۶۷۰۰۰۰	۵۰۸۶۰۸۵	۱۵۴۶۶۴۰	۰	۳۱۵۹۹۷	۵۰۷۵۴۶	۲۷۱۵۹۰۰	۷,۷	۱۹۳۳۳۰۱	۱۰۳۲۱۷۲	۶۵۲۸	894600	۰,۸
۳۰۰	۴۲۳۰۳۵	۵۴۰۰۰۰۰	۴۹۷۶۹۶۴	۱۶۱۱۹۵۲	۰	۲۸۴۵۸۶	۵۰۵۵۲۵	۲۵۷۴۹۰۰	۱۴	۱۷۹۱۰۵۸	۹۳۱۱۸۵	۳۰۷۳	۸۵۶۸۰۰	۰,۹
۳۰۰	۲۲۳۸۳۶	۵۲۵۰۰۰۰	۵۰۲۶۱۶۳	۱۷۲۱۰۴۰	۰	۲۷۳۲۸۳	۵۰۷۹۴۰	۲۵۲۳۹۰۰	۱۷,۸	۱۷۲۱۰۴۰	۸۹۴۰۰۰	۸۰۴۰	819000	۱

جدول۲- نتایج حاصل از حل مدل مساله

همانطور که در نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، درحالتی که سیاست اخذ مالیات کربن وجود ندارد، مقدار انتشار کربن در کل زنجیره برابر با ۲۰۹۳۹۶۹ کیلوگرم می‌باشد، لذا برای پاسخ به محدودیت مدل رهبر که تعیین سیاست کاهش حداقل ۱۰ درصد از میزان انتشار در زنجیره می‌باشد، کمترین قیمت کربنی که می‌بایست به زنجیره تحمیل گردد برابر با ۰,۹ دلار به‌ازای هر کیلوگرم انتشار کربن خواهد بود و مقدار کل انتشار نیز به عدد ۱۷۹۱۰۵۸ کیلوگرم کاهش میابد، در این حالت مقدار سود زنجیره به میزان ۸۰٪ درصد کاهش خواهد یافت.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بسیاری از کشورها همزمان با توسعه اقتصاد خود با چالش دشوار کاهش آلودگی هوا و انتشار کربن مواجه هستند. برای کنترل موثر انتشار کربن، دولت‌ها استفاده از سیاست‌های متفاوتی را در دستور کار خود قرار داده‌اند که در میان آن‌ها، سیاست مالیات بر کربن روش کنترلی است که توسط دولت برای قیمت‌گذاری مستقیم انتشار دی‌اکسیدکربن شرکت‌ها، با پیروی از اصل اخذ مالیات ایجاد شده‌است. ظهور آگاهی زیست‌محیطی مشتریان نیز نشان از تغییر رفتار تابع تقاضا با تغییر رفتار مشتریان دارد که این تغییرات بازنگری در نحوه مدیریت و تصمیمات زنجیره‌های تامین را گریز ناپذیر کرده‌است. لذا در این مطالعه جهت برنامه‌ریزی یک زنجیره‌تامین سبز، از یک مدل دوسطحی رهبر و پیرو استفاده شده‌است. سیاست مدل رهبر ارائه کمترین قیمت کربنی است که با اعمال این قیمت به مدل پیرو، سیاست مالیات کربن اجرا شود و میزان انتشار کربن به میزان مشخصی کاهش یابد و مدل پیرو نیز با اجرای این سیاست همواره به دنبال افزایش سودآوری زنجیره می‌باشد.

نتایج حاصل از حل مثال عددی نشان داد با افزایش قیمت کربن میزان انتشار در زنجیره به دو علت کاهش میابد: در ابتدا زنجیره با استفاده از ظرفیت تکنولوژی سبز خود در جهت کاهش انتشار حرکت می‌کند و سپس با اعمال افزایش بیشتر قیمت کربن توسط رهبر به سمت کاهش تولیدات تمایل دارد. از این رو رهبر می‌بایست سیاست‌گذاری‌های خود را برای تعیین نرخ کاهش انتشار در کل زنجیره با در نظرگرفتن میزان سودآوری سازمان‌ها اعمال نماید تا سازمان‌ها را با چالش و تنش‌های اقتصادی مواجه نکند.

با توجه به اینکه زنجیره‌تامین مورد بررسی در این مطالعه تک‌محصولی می‌باشد، در پژوهش‌های آتی می‌توان از زنجیره‌تامین‌های چندمحصوله استفاده نمود. همچنین می‌توان سایر طرح‌های کاهش انتشار از جمله طرح تجارت کربن و خرید و فروش مجوزهای کربن را با مفروضات این مطالعه مدل‌سازی نمود.

تابع تقاضا نیز وابسته به مولفه‌های قیمت محصول نهایی و میزان حساسیت به انتشار کربن می‌باشد که در مطالعات آینده می‌توان مولفه های تاثیرگذار دیگری از جمله حساسیت مصرف‌کنندگان به کیفیت نهایی محصول را نیز در آن گنجاند.

مراجع

[1] Abdallah, T., et al., Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment. Applied Mathematical Modelling, ۲۰۱۲. ۳۶(۹): p. ۴۲۸۵-۴۲۷۱.

[2] Bruce, J.P., H. Lee, and E.F. Haites, Climate change ۱۹۹۵. . ۱۹۹۶: Economic and social dimensions of climate change.

[۳] Elhedhli, S. and R. Merrick, Green supply chain network design to reduce carbon emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, ۲۰۱۲. ۱۷(۵): p. ۳۷۹-۳۷۰.

[۴] Marron, D.B. and E.J. Toder, Tax policy issues in designing a carbon tax. American Economic Review, ۲۰۱۴. ۱۰۴(۵): p. ۵۶۸-۵۶۳.

[5] Du, S., et al., Game-theoretical analysis for supply chain with consumer preference to low carbon. International Journal of Production Research, ۲۰۱۵. ۵۳(۱۲): p. ۳۷۶۸-۳۷۵۳.

[۶] حیدری, et al., هماهنگی تصمیمات کیفیت زیست محیطی و کیفیت عملکردی محصولات در زنجیره تامین سبز دو سطحی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی, ۲۰۱۹. ۹(۱): p. ۸۷-۱۱۴.

[۷] Chen, C., Design for the environment: A quality-based model for green product development. Management Science, ۲۰۰۱. ۴۷(۲): p. ۲۶۳-۲۵۰.

[۸] Yang, L., C. Hao, and X. Yang, Pricing and carbon emission reduction decisions considering fairness concern in the big data era. Procedia CIRP, ۲۰۱۹. ۸۳: p. ۷۴۷-۷۴۳.

[۹] Marron, D.B. and E.J. Toder, Tax policy issues in designing a carbon tax. American Economic Review, ۲۰۱۴. ۱۰۴(۵): p. ۵۶۸-۵۶۳.

[۱۰] López, C., R. Ruíz-Benítez, and C. Vargas-Machuca, On the environmental and social sustainability of technological innovations in urban bus transport: The EU case. Sustainability, ۲۰۱۹. ۱۱(۵): p. ۱۴۱۳.

[۱۱] Morris, J., S. Paltsev, and A.Y. Ku, Impacts of China's emissions trading schemes on deployment of power generation with carbon capture and storage. Energy Economics, ۲۰۱۹. ۸۱: p. ۸۵۸-۸۴۸.

[۱۲] Sundarakani, B.G., Mark; de Souza, Robert; and Shun, Cai, Measuring carbon footprints across the supply chain. Environmental Logistics, ۲۰۱۰. ۵۶۲-۵۵۵.

[۱۳] Cao, K., et al., Optimal production and carbon emission reduction level under cap-and-trade and low carbon subsidy policies. Journal of cleaner production, ۲۰۱۷. ۱۶۷: p.۵۱۳-۵۰۵ .

[۱۴] Zakeri, A., et al., Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective. International Journal of Production Economics, ۲۰۱۵. ۱۶۴: p. ۲۰۵-۱۹۷.

[۱۵] Du, S., L. Hu, and M. Song, Production optimization considering environmental performance and preference in the cap-and-trade system. Journal of Cleaner Production, ۲۰۱۶. ۱۱۲: p. ۱۶۰۷-۱۶۰۰.

[۱۶] Bilir, C., S.O. Ekici, and F. Ulengin, An integrated multi-objective supply chain network and competitive facility location model. Computers Industrial Engineering, ۲۰۱۷. ۱۰۸: p. ۱۴۸-۱۳۶.

[۱۷] Hong, Z., et al., Optimizing an emission trading scheme for local governments: A Stackelberg game model and hybrid algorithm. International Journal of Production Economics, ۲۰۱۷. ۱۹۳: p. ۱۸۲-۱۷۲.

[۱۸] Asghari, M ,et al., Transformation and linearization techniques in optimization: A state-of-the-art survey. Mathematics, ۲۰۲۲. ۱۰(۲): p. ۲۸۳.

[۱۹] Du, S., L. Hu, and L. Wang, Low-carbon supply policies and supply chain performance with carbon concerned demand. Annals of Operations Research, ۲۰۱۷. ۲۵۵: p. ۵۹۰-۵۶۹.