

رویکرد تحلیل پوششی داده‌های متمرکز فازی برای تخصیص میزان انتشار با در نظر گرفتن

سیاست محدودیت و تجارت

احسان مومنی^۱، فرهاد حسین زاده لطفی^{۲*}، رضا فرضی پور صائن^۳

^۱گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۲گروه ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۳گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، ایران.

چکیده

امروزه توسعه پایدار به‌عنوان مهم‌ترین مسئله در مسیر توسعه اقتصادی کشورهاست. برای دستیابی به پایداری در توسعه، کشورها باید توجه ویژه‌ای به جنبه‌های زیست‌محیطی داشته باشند. جنبه زیست‌محیطی بر سلامت اکوسیستم متمرکز دارد. برای پایداری در توسعه کشورها، انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌بایست کنترل شده و کاهش یابد. سیاست محدودیت و تجارت از مؤثرترین رویکردها در کنترل و کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در سیاست محدودیت و تجارت، با توزیع مجوزهای انتشار بین کشورها، مقدار کل آلاینده‌گی کاهش می‌یابد. هدف از این مقاله، ارائه یک مدل متمرکز تحلیل پوششی داده‌ها برای توزیع عادلانه مجوزهای انتشار در سیاست محدودیت و تجارت با توجه به کارایی کشورها است. مدل ارائه شده کارایی کشورها را در حضور ورودی‌های قابل کنترل و غیرقابل کنترل برای توزیع مجوزهای انتشار ارزیابی می‌کند. عدم قطعیت پارامترها به وسیله اعداد فازی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در این مقاله میزان انتشار گازهای منتشر شده‌ای که می‌تواند کم شود، بدون کاهش سایر خروجی‌ها مشخص می‌شود. مطالعه موردی کاربرد مدل ارائه شده را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور بررسی تأثیر تغییرات پارامترها بر نتایج انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، انتشار گازهای گلخانه‌ای، محدودیت و تجارت، تحلیل پوششی داده‌ها، داده‌های فازی.

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳

اصلاح: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۴

Fuzzy centralized DEA approach for reallocation of emission permits under cap and trade regulation

Ehsan Momeni¹, Farhad Hosseinzadeh Lotfi^{2,*}, Reza Farzipoor Saen³

¹Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

²Department of Mathematics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, P. O. Box: 31485-313 Iran.

Abstract

Nowadays, sustainable development is the most important issue in the economic development of countries. To achieve sustainable development, countries must pay special attention to environmental aspects. Environmental aspect focuses on ecosystem stability and maintenance of ecologic functions. To make countries more sustainable, Greenhouse Gas (GHG) emission should be reduced and controlled. Cap and trade approach is one of the most effective approaches in controlling GHG emissions. In the cap and trade approach, the total amount of emissions are decreased by reallocating emission permits to countries. The objective of this paper is to propose a centralized Data Envelopment Analysis (DEA) model to reallocate emission permits in the cap and trade system given countries' efficiencies. Our model evaluates efficiencies of countries in the presence of discretionary and nondiscretionary inputs to reallocate emission permits. The fuzzy set considers uncertainties in parameters. Also, this paper determines the amount of emitted gases that can be reduced without reducing other outputs. A case study demonstrates the applicability of the proposed model. Sensitivity analysis is carried out to investigate the impact of parameters' variations on results.

Keywords: Sustainable development, Greenhouse gas emission, Cap and trade, Data envelopment analysis, Fuzzy data.



توسعه پایدار^۱ یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشورهای جهان است (وَنگ و وو، ۲۰۱۶؛ تانر و ولفینگ کست، ۲۰۰۳). پیوند بین توسعه اقتصادی و آلودگی محیط‌زیست باعث شده است که توسعه پایدار به‌عنوان یک مسئله کلیدی در سیاست‌های زیست‌محیطی و توسعه اقتصادی شناخته شود (ردکلیفت، ۲۰۰۵). کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از اهداف اصلی برای رسیدن به توسعه پایدار، بسیار مورد توجه واقع شده است (ژو و همکاران، ۲۰۰۸). میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای^۲ بر تغییرات آب‌وهوا و کیفیت محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد (اسپنگنبرگ، ۲۰۱۳). افزایش آگاهی جهانی در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای و فشار سازمان‌های حافظ محیط‌زیست منجر به توسعه معاهدات مربوط به تغییرات آب‌وهوا شده است. پروتکل کیوتو^۳ و توافقنامه پاریس^۴ مهم‌ترین دستاوردهای بین‌المللی با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. براساس پروتکل کیوتو، کشورهای صنعتی توافق کردند که شش گونه گاز گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن، هگزاfluorید گوگرد، فلوروکربن‌ها و هیدروفلوروکربن را نسبت به سطح ۱۹۹۰ به مقدار ۸ درصد در فاصله زمانی ۲۰۰۸-۲۰۱۲ کاهش دهند (آدیتی و اوشو، ۲۰۱۲). به‌دنبال پروتکل کیوتو، توافقنامه پاریس توسط ۱۹۵ کشور تحت نظارت کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات آب‌وهوا^۵ به تصویب رسید (متیو، ۲۰۱۷). براساس توافقنامه پاریس، کشورها متعهد به کاهش فعالیت‌های آلوده‌کننده شدند به‌گونه‌ای که بتوان شرایط اقلیمی قابل قبولی را برای کنترل افزایش دمای متوسط جهانی تا ۲ درجه سانتی‌گراد و ترجیحاً ۱/۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آورد (لو، ۲۰۱۸). رویکردهای مبتنی بر بازار به‌عنوان مؤثرترین روش‌ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است (بورترا و همکاران، ۲۰۱۴؛ ساچی و همکاران، ۲۰۱۴). برجسته‌ترین رویکردهایی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل مجوز انتشار قابل معامله^۶، مالیات بر آلودگی^۷، سیستم تجارت انتشار^۸ و سیاست محدودیت و تجارت^۹ است.

سیاست محدودیت و تجارت اقتصادی‌ترین و برترین رویکرد برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای معرفی شده است (بتسیل و هافمن، ۲۰۱۱؛ فیسچر و اسپرینگبورن، ۲۰۱۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۱؛ انیچیریکو و دی دیو، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۱۶). در این سیستم، به هر کشور سهمیه و مجوزی برای انتشار تخصیص داده شده و کشورها باید به‌اندازه مجوزهای انتشار خود، گاز منتشر کنند به‌طوری که مجموع میزان انتشار نباید از محدودیت تعیین‌شده فراتر رود. اگر مقادیر مجوزهای تعیین‌شده برای برخی از کشورها پایین‌تر از گازهای منتشرشده آن‌ها باشد، باید میزان انتشار گازهایشان را کاهش دهند، یا باید مجوزهای انتشار را از کشورهای دیگر بخرند. از طرف دیگر، کشورهایی که میزان گازهای گلخانه‌ای کم‌تری نسبت به مقدار مجوز انتشار دارند می‌توانند بیش‌تر از این مقدار کنونی منتشر کنند یا می‌توانند مجوزهای انتشار خود را به کشورهای دیگر بفروشند. این بدان معنی است که کشورها برای تحقق اهداف خود می‌توانند مجوزهای انتشار بخرند و یا بفروشند. در این تجارت، مقدار مجموع مجاز انتشار به‌عنوان محدودیت ثابت می‌باشد. بنابراین مسئله تخصیص عادلانه مجوزهای انتشار از اهمیت و ضرورت بسیاری برخوردار می‌باشد. تحلیل پوششی داده‌ها^{۱۰} برای حل مسئله تخصیص براساس عملکرد بسیار مناسب بوده (وو و همکاران، ۲۰۱۳؛ فنگ، ۲۰۱۵؛ آن و همکاران، ۲۰۱۷) و در مقالات بسیاری از این روش برای حل مسائل تخصیص استفاده شده است.

^۱Sustainable development

^۲Greenhouse gas emission

^۳Kyoto protocol

^۴Paris agreement

^۵United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

^۶Tradable emission permit

^۷Pollution tax

^۸Emission trading system

^۹Cap and trade

^{۱۰}Data envelopment analysis



هدف از این مقاله ارائه یک مدل تحلیل پوششی داده‌های متمرکز فازی برای کاهش مجموع میزان انتشار و تخصیص منصفانه مجوزهای انتشار براساس کارایی آن‌ها، با توجه به سیاست محدودیت و تجارت می‌باشد. در مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی ارائه‌شده، فرض بر این است که کشورها از دو نوع ورودی (ورودی‌های قابل کنترل^۱ و غیرقابل کنترل^۲) برای تولید دو نوع خروجی (خروجی مطلوب^۳ و نامطلوب^۴) استفاده می‌کنند. مجوزهای انتشار به‌عنوان خروجی نامطلوب در نظر گرفته شده و مقدار مجموع مجوزهای انتشار باید از یک محدودیت ازپیش تعیین شده کم‌تر باشد. ورودی‌های قابل کنترل و غیرقابل کنترل از هم‌دیگر مستقل فرض شده و نیز خروجی‌های مطلوب و نامطلوب نسبت به هم مستقل فرض شده‌اند. هم‌چنین بیش‌ترین میزان کاهش انتشاری که به سایر خروجی‌های مطلوب آسیب نرساند، تعیین می‌شود. مدل ما می‌تواند عدم قطعیت داده‌ها در ورودی‌ها و خروجی‌ها را نیز در نظر بگیرد. به‌طور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل می‌باشد:

- مدل ما می‌تواند عدم قطعیت‌ها را به‌صورت داده‌های فازی لحاظ کند.
- در مدل ما، کشورها مجاز به تجارت (خرید و فروش) مجوز انتشار هستند.
- مدل ما محدودیتی برای مقدار مجموع مجوزهای انتشار در نظر می‌گیرد.
- مدل ما می‌تواند حداکثر میزان کاهش مقدار انتشار را بدون کاهش سایر خروجی‌های مطلوب تعیین کند.

ادامه این مقاله به‌شرح زیر سازماندهی شده است: مرور ادبیات گذشته در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ مقدمات مدل‌سازی و مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی جدید برای تخصیص مجوزهای انتشار را ارائه می‌دهیم. مطالعه موردی و تجزیه و تحلیل حساسیت^۵ در بخش ۴ آمده است. نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

۱-۲- توسعه پایدار

تعاریف توسعه پایدار متعدد و متنوع است. معروف‌ترین و شناخته‌شده‌ترین تعریف از توسعه پایدار به‌شرح زیر می‌باشد: "توسعه‌ای که نیازهای حال را برآورده سازد بدون آن‌که توانایی نسل‌های آینده در برآورده‌سازی نیازهایشان از بین ببرد (ضروریات استراتژیک^۶، ۱۹۸۷). مفهوم توسعه پایدار در جامعه علمی بین‌المللی توجهات گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (آزپاجیک و همکاران، ۲۰۰۴). سه رکن اساسی توسعه پایدار، همان‌گونه که براتلند (۱۹۸۷) به آن پرداخته است شامل عوامل اقتصادی، محیطی و اجتماعی می‌باشد. مفهوم توسعه پایدار تأکید می‌کند که توسعه باید سازگار با محیط‌زیست، عادلانه نسبت به اجتماع و از نظر اقتصادی بادوام باشد (ردکلیفت، ۲۰۰۵). ال‌کینگتن (۱۹۹۷) در مقاله خود بحث کرده است که برای رسیدن به توسعه پایدار سه رکن باید در نظر گرفته شود که "خط پایین سه‌گانه^۷ یا "مردم، سیاره، سود" نامیده می‌شوند. پپه‌لک (۱۹۹۹) اظهار داشت که هم‌زیستی ابعاد مختلف مانند محیط‌زیست، اقتصادی و اجتماعی اجتناب‌ناپذیر است و این توسعه مشترک به‌عنوان یک توسعه پایدار در نظر گرفته می‌شود. کانگ و همکاران (۲۰۱۷) بحث کرد که توسعه پایدار موضوعی اساسی است زیرا تضمین می‌کند که نسل‌های آینده به منابع خود برای پیشرفت تمدن دسترسی خواهند داشت. سنگاپتا و همکاران (۲۰۲۰) عنوان کردند که توسعه پایدار نشان‌دهنده تمرکز و تفکر بر آینده بوده و به‌عنوان هدف بلندمدت برای سیاره ما می‌باشد.

^۱Discretionary

^۲Non-discretionary

^۳Desirable

^۴Undesirable

^۵Sensitivity analysis

^۶Strategic Imperatives

^۷Three bottom line



براساس نظر بسیاری از محققان می‌توان اظهار داشت که برای رسیدن به توسعه پایدار باید به ابعاد زیست محیطی اهمیت ویژه‌ای داده شود (اسپنگنبرگ، ۲۰۱۳؛ راکستروم و همکاران، ۲۰۰۹؛ مداس و همکاران، ۱۹۹۲؛ د روم و مداس، ۱۹۷۲). با توجه به مطالعات ذکر شده در بالا، برای درک بهتر نسبت به توسعه پایدار، باید پایداری زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، تعاریف جدید پایداری به دنبال گسترش این تعریف در ورای جنبه زیست محیطی است زیرا در اثر آسیب‌های زیست محیطی، آلودگی و تغییرات آب‌وهوایی، مردم و جامعه از نزدیک تحت تأثیر قرار می‌گیرند (عسگری و همکاران، ۲۰۰۷). اسپنگنبرگ (۲۰۱۳) بحث کرده که توسعه پایدار باید عوامل محیطی را در نظر بگیرد. زو و ژا (۲۰۱۴) اظهار داشتند که پایداری محیط زیست نه تنها توانایی نسل آینده را حفظ می‌کند بلکه نیازهای فعلی را نیز برآورده می‌کند. هم چنین مقاله گاپتا و گاپتا (۲۰۲۰) به کشف تأثیر پایداری محیط زیست بر ابعاد مختلف عملکردی شرکت‌ها و سازمان‌ها پرداخته است و به این نتیجه رسیده‌اند که پایداری زیست محیطی تأثیر بسزایی در توسعه پایدار دارد.

۲-۳- پروتکل‌ها و توافقنامه‌ها

چندین کنوانسیون بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منعقد شده است. بسیاری از محققان، هیات بین‌المللی تغییرات آب‌وهوا^۲ را به عنوان پیشرو در زمینه تغییرات آب‌وهوا می‌دانند (پیلک، ۱۹۹۸). این سازمان توسط سازمان جهانی هواشناسی^۳ در سازمان ملل برای ارزیابی علمی در مورد علت و تأثیر تغییرات آب‌وهوا و هم چنین راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به وجود آمده است (ساینهائر، ۲۰۰۳). کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییر آب‌وهوا^۴ یکی دیگر از معاهدات بین‌المللی است که مشکل انتشار گازهای گلخانه‌ای را معرفی کرده است، این پیمان در ریو دژانیرو در سال ۱۹۹۲ اتفاق افتاد. هدف اصلی این کنوانسیون "تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو در سطحی است که از تداخل خطرناک انسان با سیستم آب‌وهوا جلوگیری کند" (<http://newsroom.unfccc.int/>). اصلی‌ترین پروتکل در این زمینه در ۱۱ دسامبر ۱۹۹۷ در کیوتو ژاپن ایجاد شد و در ۱۶ فوریه ۲۰۰۵ اجرا شد که به عنوان "پروتکل کیوتو" خوانده می‌شود، اصل کلی در این پروتکل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط کشورها است. این پروتکل اهداف الزام‌آور را برای شرکت‌کنندگان تعیین می‌کند که آن‌ها می‌بایست میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را تا ۸ درصد کاهش دهند (ویتمارش، ۲۰۱۱). پروتکل کیوتو سه مکانیسم مختلف مبتنی بر بازار^۵ را برای کشورها برای دستیابی به اهداف کاهش آلودگی پیشنهاد داده است. یکی از این رویکردها، تجارت و مبادله انتشار^۶ است. این نخستین رویکرد مبتنی بر بازار برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده و کشورها مجاز هستند تا مجوز انتشار خود را دادوستد کنند (سیبرگ-البرفلد، ۲۰۰۹). توافقنامه پاریس توسط ۱۹ کشور عضو کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییر آب‌وهوا در بیست و یکمین کنفرانس آن‌ها در پاریس در دسامبر ۲۰۱۵ تصویب شد و در سال ۲۰۱۶ لازم‌الاجرا شد. در این توافقنامه تشخیص داده شده که اکثر کشورهای توسعه‌یافته مسئول انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده و باید به دنبال کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشند تا به توسعه پایدار دست پیدا کنند (هان و همکاران، ۲۰۱۷). این توافق‌نامه روشن می‌کند که کشورها باید افزایش دمای جهان را کنترل کنند (پارکر و کارلسون، ۲۰۱۰).

۲-۴- محدودیت و تجارت

چندین سیاست کاهش میزان انتشار کربن مبتنی بر بازار از جمله مجوز انتشار قابل معامله، مالیات بر آلودگی، سیستم تجارت انتشار و سیاست محدودیت و تجارت وجود دارد. برخی از مطالعات، این سیاست‌ها را تحلیل و مقایسه کردند (جین و همکاران، ۲۰۱۴). سیاست محدودیت و تجارت مزایای بسیاری دارد، زیرا از مشوق‌های اقتصادی استفاده کرده و از مکانیسم موثر براساس بازار برای صرفه‌جویی در منابع عمومی استفاده می‌کند (براول و لارسن، ۲۰۰۴؛ جوهانسون، ۲۰۰۶؛ کوپر، ۲۰۰۷). دو و همکاران (۲۰۱۶) بحث کرده است که سیاست محدودیت و تجارت عنصر اصلی سیاست بین‌المللی آینده در مورد تغییرات زیست محیطی خواهد بود.

^۱Environmental sustainability

^۲Inter-Governmental Panel on Climate Change (IPCC)

^۳World Meteorological Organization (WMO)

^۴United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

^۵Market based

^۶Emission trading



وو و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که سیاست و تجارت بهتر از سایر سیاست‌های مبتنی بر بازار است. این رویکرد بر تخصیص کارآمد مقادیر انتشار برای کنترل مجموع انتشار کشورها متمرکز است. میسرا و همکاران (۲۰۲۰) به کنترل زباله و انتشار کربن برای مدیریت زنجیره پایدار حلقه بسته با استفاده از سیاست تجارت و تجارت پرداختند. به این ترتیب، نیاز است که محدودیت مقدار کل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای منتهی به همه کشورها بر سر آن توافق داشته باشند. هم‌چنین مقادیر مجوزهای انتشار برای کشورها برای تجارت و مبادله با یکدیگر اختصاص یابد؛ بنابراین مجوزها برای تولید گازهای گلخانه‌ای برای خرید و یا فروش مشخص شده و در نتیجه می‌تواند معامله صورت پذیرد. کشورها موظف هستند که انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را به مقامات ناظر گزارش دهند تا آن‌ها را متقاعد کنند که مقادیر انتشار آن‌ها درست می‌باشد. اگر مقادیر مجوزهای تخصیص یافته از میزان انتشار فعلی آن‌ها باشد، باید میزان انتشار را کاهش دهند یا باید مجوزهای انتشار در بازار تجارت از دیگران بخرند. بالعکس، اگر عملکرد زیست محیطی یک کشور خوب بوده و میزان انتشار گاز کم‌تری نسبت به مجوز تخصیص یافته داشته باشد، پس انداز آن برای آینده مجاز بوده یا می‌تواند مجوز مازاد خود را به کشورهای دیگر بفروشد. این موضوع به کشورها این امکان را می‌دهد تا راه‌های اقتصادی برای جابجایی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای پیدا کنند. از این رو، روش تخصیص مجوز انتشار مهم‌ترین قسمت سیاست محدودیت و تجارت است (پردان و آزاچیک، ۲۰۱۱).

۲-۵- تخصیص مقادیر انتشار

همان‌طور که گفته شد مهم‌ترین قسمت مربوط به سیاست محدودیت و تجارت، تخصیص عادلانه مجوزهای انتشار بین کشورهاست. یک روش متداول در تخصیص انتشار، روش پدربزرگ^۱ است که در آن میزان مجوزهای انتشار براساس سطح انتشار گذشته اعضا اختصاص می‌یابد (گالدِر و همکاران، ۱۹۹۹). بنابراین، روش پدربزرگ منصفانه نیست زیرا واحدهای "کثیف" نسبت به واحدهای "تمیز" مقادیر تخصیص بیش‌تری دریافت خواهند کرد (آهمن و همکاران، ۲۰۰۷). بر همین اساس، کشورهای اروپایی مایل به استفاده از این روش نیستند (استرن و مالر، ۲۰۰۸). روش دیگر تخصیص مقادیر انتشار، روش تخصیص دوره‌ای^۲ می‌باشد. در این روش، شرکت‌کنندگان باید خروجی‌های خود را طوری تنظیم کنند تا مقادیر بیش‌تری به خود تخصیص دهند. همان‌طور که توسط لوزانو و همکاران (۲۰۰۹) به این موضوع پرداخته شده است، این روش هزینه‌های بالای اداری و پیچیدگی بیش‌تری دارد. فیسچر و فاکس (۲۰۰۴) روشی را با عنوان تخصیص مبتنی بر خروجی^۳ برای بهبود نقص‌های روش‌های قبلی ارائه دادند. این روش براساس خروجی‌ها عمل می‌کند و ورودی‌های تولید را نادیده می‌گیرد. بنابراین روش تخصیص مبتنی بر خروجی منجر به تولید بیش‌تر و افزایش کل میزان انتشار خواهد شد. در نتیجه، لازم است از رویکردی استفاده شود که هم ورودی و هم خروجی را به‌طور هم‌زمان در نظر بگیرد.

تحلیل پوششی داده‌ها، یک روش برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری^۴ است. این روش توسط چارلز و همکاران (۱۹۷۸) معرفی شد و در زمینه‌های مختلفی به کار رفته است. امیر تیموری و کردستمی (۲۰۰۵) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های مبتنی بر عملکرد برای حل مشکلات تخصیص مقادیر انتشار پیشنهاد دادند. اندرسن و بوگتوف (۲۰۰۷) مدل تحلیل پوششی داده‌ها را برای تخصیص سهمیه میزان صید به گروهی از ماهی‌گیران پیشنهاد کردند. آن‌ها تأثیر سهمیه قابل معامله در توانایی شرکت برای کاهش ورودی و افزایش خروجی‌ها را ارزیابی کردند. ملک محمدی و همکاران (۲۰۰۹) از مدل تحلیل پوششی داده‌ها برای تخصیص منابع بانک‌ها در مالزی استفاده کردند. امیر تیموری و تبار (۲۰۱۰) یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها برای تخصیص منابع با هزینه‌های ثابت در مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری ارائه دادند. لطفی و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل تخصیص تحلیل پوششی داده‌ها براساس روش وزن‌های مشترک دوگان^۵ ارائه دادند. چنگ و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های متمرکز برای تجزیه و تحلیل عملکرد پایانه‌ها برای اختصاص منابع به آن‌ها ارائه دادند. برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در تخصیص منابع، وو و همکاران (۲۰۱۳)

^۱Grandfathering

^۲Periodic reallocation

^۳Output-based allocation

^۴Decision making units

^۵Common dual weights

مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های وابسته به متن^۱ و برنامه‌نویسی خطی چندهدفه^۲ ارائه دادند. چو و همکاران (۲۰۱۶) مدل تحلیل پوششی داده‌ها برای تخصیص منابع در یک سیستم ابری^۳ توسعه دادند. مومنی و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های متمرکز^۴ در حالت قطعی برای تخصیص مجوزهای انتشار با توجه به سیاست محدودیت و تجارت پیشنهاد کرده‌اند. مقاله نعمتی و متین (۲۰۱۹) با در نظر گرفتن تأثیرات مابین ورودی‌ها و خروجی‌ها در مدل تحلیل پوششی داده‌ها، رویکرد جدیدی را برای تخمین کارایی و تخصیص منابع واحدهای تولیدی پیشنهاد کرده و از روش پیشنهادی برای به دست آوردن تخصیص منابع در شرکت‌های تولید کننده لوازم خانگی استفاده می‌کند. آن و همکاران (۲۰۱۷) به تشریح اهمیت تخصیص هزینه‌های ثابت بین واحدهای مختلف پرداخته و از تحلیل پوششی داده‌ها برای تخصیص مقادیر هزینه‌های ثابت در مجموعه‌های دوسطحی با در نظر گرفتن روابط بین آن‌ها پرداخته است.

در این مقاله، یک مدل تحلیل پوششی داده‌های متمرکز فازی با توجه به سیاست محدودیت و تجارت به منظور تخصیص مجوزهای انتشار در بین کشورها توسعه داده شده است. در مدل تحلیل پوششی داده‌ها، به وزن معیارها نیازی نیست و تخصیص مجوزهای انتشار در بین کشورها براساس کارایی کشورها و به صورت عادلانه انجام می‌پذیرد. رویکرد متمرکز باعث می‌شود که همه کشورها باهم در نظر گرفته شوند. ورودی‌ها به صورت قابل کنترل و غیرقابل کنترل بوده و هم چنین خروجی‌های مطلوب و نامطلوب در مدل گنجانیده شده است که در این جا، مقدار گاز منتشر شده به عنوان خروجی نامطلوب می‌باشد. هم چنین فرض بر این می‌باشد که خروجی‌های نامطلوب مستقل از خروجی‌های مطلوب بوده و نیز ورودی‌های قابل کنترل از ورودی‌های غیرقابل کنترل مستقل می‌باشند. به دلیل قطعی نبودن پارامترها در مسائل دنیای واقعی، از منطق فازی برای به دست آوردن نتایج واقع‌بینانه‌تر استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که میزان کل مقادیر انتشار مجاز به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود. اگر گازهای منتشر شده کشورها بیش‌تر از مقدار مجوز تخصیص داده شده باشند، کشورها باید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را کاهش دهند، یا باید در بازار معاملات، مجوزهای انتشار از سایر کشورها را خریداری کنند. از طرف دیگر، کشورهایی که میزان انتشار گاز کم‌تری دارند می‌توانند مجوزهای خود را برای آینده ذخیره کنند یا آن‌ها را بفروشند. بنابراین، امکان تجارت بین کشورها وجود دارد. علاوه بر این، حداکثر کاهش مجاز خروجی‌های نامطلوب کل را شناسایی می‌کنیم به گونه‌ای که این کاهش به سایر خروجی‌های مطلوب آسیب نرساند.

۶-۲- شکاف دانش

با بررسی ادبیات گذشته، هیچ مرجعی وجود ندارد که به تخصیص مجوز انتشار متمرکز در حضور داده‌های فازی پردازد. هم چنین، مرجعی برای تعیین حداکثر میزان کاهش انتشار بدون کاهش سایر خروجی‌های مطلوب وجود ندارد. این شکاف‌ها در دانش باید به منظور تقویت پایداری زیست محیطی و رسیدن به توسعه پایدار برطرف شود.

۳- ارائه مدل

۳-۱- تئوری مجموعه فازی

نظریه مجموعه فازی توسط زاده (۱۹۶۵) برای مواجهه با مفهوم مقادیر غیرقطعی معرفی شده است که در آن ممکن است ارزش حقیقی بین "کاملاً درست" تا "کاملاً نادرست" باشد. ثابت شده است که این یک ابزار مفید برای رسیدگی به عدم دقت و عدم اطمینان در مشکلات دنیای واقعی بسیار کاربردی است. بنابراین، در بسیاری از رشته‌ها و برنامه‌های کاربردی مانند هوش مصنوعی، نظریه تصمیم‌گیری، سیستم‌های خبره و تحقیقات عملیات مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا، ما به ارائه برخی از تعاریف اساسی در نظریه مجموعه فازی برای نشان دادن مقادیر مبهم می‌پردازیم:

^۱Context-dependent DEA

^۲Multiple objective linear programming

^۳Cloud system

^۴Centralized



تعریف ۱- تابع مشخصه μ_A مربوط به مجموعه دقیق $A \subseteq X$ مقدار ۰ یا ۱ را به هر عضو در X اختصاص می‌دهد. این مشخصه را می‌توان به تابع $\mu_{\tilde{A}}$ تعمیم داد به گونه‌ای که مقدار اختصاص داده شده به عنصر مجموعه جهانی X در یک محدوده مشخص $[0, 1]$ قرار گیرد. این مقدار نشان‌دهنده درجه عضویت عنصر در مجموعه A می‌باشد. تابع $\mu_{\tilde{A}}$ به نام تابع عضویت و مجموعه $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X\}$ به نام مجموعه فازی نامیده می‌شود.

تعریف ۲- یک مجموعه فازی $\tilde{A}$ که بر روی مجموعه جهانی اعداد واقعی R تعریف شده است. اگر تابع عضویت آن دارای خصوصیات زیر باشد، عدد فازی است:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \text{ که } x \in R \text{ وجود دارد به طوری که}$$

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min\{\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)\}, \lambda \in [0, 1]$$

تابع $\mu_{\tilde{A}}$ پیوسته می‌باشد.

تعریف ۳- عدد فازی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ به عنوان عدد فازی مثلثی نامیده می‌شود اگر تابع عضویت آن به صورت $\mu_{\tilde{A}} : R \rightarrow [0, 1]$ بوده و نیز خصوصیت زیر را داشته باشد:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 & x = a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \end{cases}$$

تعریف ۴- در یک عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ ، اگر $a_1 = a_2$ and $a_2 = a_3$ باشد آنگاه آن عدد به عدد قطعی a تبدیل می‌شود. از طرف دیگر، یک عدد قطعی a می‌تواند به عنوان عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a, a, a)$ در نظر گرفت.

تعریف ۵- یک عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ به عنوان عدد غیر منفی شناخته می‌شود، اگر و تنها اگر $a_1 \geq 0$.

تعریف ۶- فرض کنید که $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ و $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ دو عدد فازی مثلثی تعریف شده در مجموعه جهانی R بوده و $k \in R$ عدد قطعی می‌باشد. برخی از عملیات محاسباتی در بین اعداد مثلثی فازی به شرح زیر است:

$$k \cdot \tilde{A} = (ka_1, ka_2, ka_3) \text{ if } k \geq 0.$$

$$k \cdot \tilde{A} = (ka_3, ka_2, ka_1) \text{ if } k \leq 0.$$

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3).$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3).$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1).$$

تعریف ۷- دو عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ و $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ در صورتی باهم برابر هستند $\tilde{A} = \tilde{B}$ اگر و تنها اگر $a_1 = b_1, a_2 = b_2$ and $a_3 = b_3$ همچنین در صورتی $\tilde{A} \geq \tilde{B}$ است که $a_1 \geq b_1, a_2 \geq b_2$ and $a_3 \geq b_3$ و بالعکس.



تحلیل پوششی داده‌ها برای اندازه‌گیری کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. واحدهای تصمیم‌گیری از m ورودی $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ استفاده می‌کنند تا s خروجی $Y = (y_1, y_2, \dots, y_s)$ تولید کنند. مجموعه امکان تولید^۱ به‌عنوان مجموعه ای از کلیه ترکیبات ورودی-خروجی تعریف می‌شود که به شرح زیر امکان‌پذیر است:

$$T = \{(x, y) | x \text{ can produce } y\}.$$

حالت‌های مختلفی از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها بر اساس خصوصیات مختلف مجموعه امکان تولید وجود دارد. دو مدل اصلی تحلیل پوششی داده‌ها به نام‌های CCR^2 و BCC^3 هستند که به ترتیب توسط چارنس و همکاران (۱۹۷۸) و بنکر و همکاران (۱۹۸۴) ارائه شده است. دو تعریف ممکن از کارایی وجود دارد. اولین دسته از مدل‌ها بر کاهش متناسب کلیه ورودی‌ها بدون کاهش خروجی متمرکز بوده که به نام ورودی-محور معروف هستند $E = \min \{\theta_p | (\theta_p x, y) \in T\}$. دومین دسته سعی در بالا بردن متناسب کلیه خروجی‌ها بدون افزایش ورودی‌ها دارد که به خروجی-محور شناخته می‌شوند $E = \max \{\theta_p | (x, \theta_p y) \in T\}$. در این مقاله ما یک مدل جدید تحلیل پوششی داده‌های ورودی محور ارائه می‌کنیم که تمامی واحدهای تصمیم‌گیری را به‌صورت یکجا در نظر می‌گیرد.

۳-۳- مدل پیشنهادی تحلیل پوششی داده‌های متمرکز فازی برای تخصیص

فرض کنید که تعداد n واحد تصمیم‌گیری (کشورها) وجود دارند $DMU_j (j = 1, 2, \dots, n)$ که تحت نظارت یک مرکز می‌باشند. هر واحد تصمیم‌گیری تعداد m ورودی مصرف می‌کند که q تای آن قابل کنترل بوده $X_j^D = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{qj})$ و $m - q$ تای آن غیرقابل کنترل $X_j^{ND} = (x_{q+1j}, \dots, x_{mj})$ می‌باشد. واحدهای تصمیم‌گیری تعداد s خروجی خواهند داشت که $s - 1$ تای آن خروجی مطلوب بوده $Y_j = (y_{2j}, y_{3j}, \dots, y_{sj})$ و یکی از خروجی‌ها به‌عنوان خروجی نامطلوب (گازهای منتشره) می‌باشد. جدول ۱ نام‌گذاری‌های موجود در مدل را نشان می‌دهد:

جدول ۱- نمادها و تعاریف.

Table 1- Symbols and definitions.

نماد	تعریف	نماد	تعریف
$j, p = 1, 2, \dots, n$	مجموعه واحدهای تصمیم‌گیری	α	محدودیت مجموع میزان انتشار
$i = 1, 2, \dots, m$	مجموعه ورودی‌ها	n'	کاهش مجموع میزان انتشار
$i = 1, 2, \dots, q$	مجموعه ورودی‌های قابل کنترل	p'	کاهش بیش‌ازحد میزان انتشار
$i = q+1, \dots, m$	مجموعه ورودی‌های غیرقابل کنترل	x_{ij}^d, x_{ip}^d	ورودی قابل کنترل i ام برای واحد p و j
$r = 1$	شمارنده مربوط به خروجی نامطلوب	x_{ij}^n, x_{ip}^n	ورودی غیرقابل کنترل i ام برای واحد p و j
$r = 2, 3, \dots, s$	مجموعه خروجی‌های مطلوب	y_{rj}, y_{rp}	خروجی مطلوب i ام برای واحد p و j
λ_{jp}	بردار شدت مربوط به واحد j و p	y_{1j}, y_{1p}	خروجی نامطلوب برای واحد p و j
S_{ip}^+	متغیر مازاد i امین ورودی برای واحد p	θ_p	مقدار کارایی نسبی برای واحد p و j
S_{ip}^-	متغیر کمبود r امین خروجی مطلوب برای واحد p	ε	عدد مثبت بسیار کوچک غیر ازشمیدسی
n_{ip}^-	خروجی نامطلوب مربوط به واحد p که باید کاهش یابد	n_{ip}^+	خروجی نامطلوب مربوط به واحد p که می‌تواند افزایش یابد

^۱Production Possibility Set (PPS)

^۲Charnes, Cooper and Rhodes

^۳Banker Charnes and Cooper



مشخص است که هر کشور (واحد تصمیم‌گیری) مایل به تولید بیشترین خروجی‌های مطلوب و کمترین خروجی‌های نامطلوب است. واحدهای تصمیم‌گیری می‌خواهند کارایی نسبی خود را افزایش دهند، برای این منظور، آن‌ها باید ضمن ثابت نگه‌داشتن ورودی‌های غیرقابل کنترل، حداقل ورودی‌های قابل کنترل را مصرف کنند تا حداکثر خروجی مطلوب و حداقل خروجی‌های نامطلوب را به وجود آورند. با این حال، مجموع خروجی‌های نامطلوب نباید از مقدار از پیش تعیین‌شده (α) تجاوز کند. مدل تخصیص مجوز انتشار متمرکز در حضور ورودی‌های قابل کنترل / غیرقابل کنترل و خروجی‌های مطلوب / نامطلوب به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z &= \sum_{p=1}^n \theta_p + \varepsilon \cdot \left(\sum_{p=1}^n c \cdot n_{1p}^+ - \sum_{p=1}^n c \cdot n_{1p}^- \right) + \varepsilon \cdot p', (1.a) \\
 \text{st : } &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} x_{ij}^d = \theta_p x_{ip}^d - S_{ip}^- \quad i = 1, 2, \dots, q \quad p = 1, 2, \dots, n, (1.b) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} x_{ij}^n = x_{ip}^n - S_{ip}^- \quad i = q+1, \dots, m \quad p = 1, 2, \dots, n, (1.c) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} y_{rj} = y_{rp} + S_{rp}^+ \quad r = 2, 3, \dots, s \quad p = 1, 2, \dots, n, (1.d) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} y_{1j} = y_{1p} + n_{1p}^+ - n_{1p}^- \quad p = 1, 2, \dots, n, (1.e) \\
 &\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{jp} y_{1j} = \alpha - n' + p', (1.f) \\
 &\theta_p \leq 1 \quad p = 1, 2, \dots, n, (1.g) \\
 &\sum_{j=1}^n y_{1j} - \alpha \geq \sum_{p=1}^n n_{1p}^- - \sum_{p=1}^n n_{1p}^+, (1.h) \\
 &\lambda_{jp} \geq 0, S_{ip}^- \geq 0, S_{rp}^+ \geq 0, n_{1p}^+ \geq 0, n_{1p}^- \geq 0, n' \geq 0, p' \geq 0, (1.i)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

تابع هدف مدل (1.a) به دنبال به حداقل رساندن ورودی‌های قابل کنترل واحدهای تصمیم‌گیری به صورت شعاعی (متناسب) بدون کاهش خروجی‌های مطلوب است. همچنین میزان انتشار قابل فروش و کاهش بیش‌ازحد خروجی نامطلوب را به حداقل می‌رساند. نهایتاً، مدل (1.a) تلاش می‌کند تا میزان انتشاری که واحدها باید کاهش دهند را افزایش دهد. در اینجا θ_p ، به عنوان نمره کارایی نسبی p امین واحد تعریف شده است که کمتر از ۱ است. متغیرهای کمکی S_{ip}^- ، S_{rp}^+ در محدودیت‌ها تفاوت بین ورودی‌ها / خروجی‌ها و ورودی‌ها / خروجی‌های مناسب واحدها را بیان می‌کنند. محدودیت (1.b) مربوط به کاهش شعاعی پارامترهای ورودی‌های قابل کنترل و رساندن آن به سطح مطلوب بوده و محدودیت (1.c) نیز برای ورودی‌های غیرقابل کنترل می‌باشد. محدودیت (1.d) مربوط به رساندن خروجی‌های مطلوب به سطح موردنظر می‌باشد و همچنین محدودیت (1.e) مربوط به مشخص کردن مقدار کمبود و یا مازاد خروجی نامطلوب (گازهای منتشره) یعنی مشخص کردن مقداری که باید کاهش و یا افزایش یابد می‌باشد. در محدودیت (1.e) مقادیر n_{1p}^+ و n_{1p}^- به ترتیب نشان‌دهنده مقدار کاهش و افزایش است. محدودیت (1.f) نشان می‌دهد که مجموع گازهای خروجی کشورها نباید از یک محدودیت مقداری از پیش تعیین‌شده (α) تجاوز کند تا به سایر خروجی‌ها آسیب نرساند. اگر کاهش مشخص‌شده زیاد باشد، برای جلوگیری از کاهش خروجی‌های مطلوب متغیر p'_k مقدار مثبت به خود می‌گیرد. محدودیت (1.g) نشان می‌دهد که مقادیر کارایی نسبی نباید بیشتر از ۱ باشد. محدودیت (1.h) تضمین می‌کند که تفاوت بین مجموع میزان انتشار گاز و محدودیت موردنظر، بزرگ‌تر یا مساوی با تفاوت بین کاهش و افزایش مقادیر گازهای منتشره می‌باشد.

توجه داشته باشید که α باید کمتر از کل میزان خروجی نامطلوب $(\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{jp} y_{1j})$ باشد.

توجه داشته باشید که برخی ورودی‌ها و خروجی‌ها ممکن است فازی باشند. انواع مختلفی از توابع عضویت فازی را می‌توان برای مدل‌سازی اعداد فازی استفاده کرد. ما فرض می‌کنیم که همه ورودی‌ها و خروجی‌های مدل (۱) اعداد مثلثی فازی هستند. با جایگزینی اعداد فازی، مدل (۱) به مدل (۲) به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z &= \sum_{p=1}^n \theta_p + \varepsilon \cdot \left(\sum_{p=1}^n c \cdot \tilde{n}_{1p}^+ - \sum_{p=1}^n c \cdot \tilde{n}_{1p}^- \right) + \varepsilon \cdot \tilde{p}', (2.a) \\
 \text{st : } &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \tilde{x}_{ij}^d = \theta_p \tilde{x}_{ip}^d - \tilde{S}_{ip}^- \quad i = 1, 2, \dots, q \quad p = 1, 2, \dots, n, (2.b) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \tilde{x}_{ij}^n = \tilde{x}_{ip}^n - \tilde{S}_{ip}^- \quad i = q+1, \dots, m \quad p = 1, 2, \dots, n, (2.c) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \tilde{y}_{rj} = \tilde{y}_{rp} + \tilde{S}_{rp}^+ \quad r = 2, 3, \dots, s \quad p = 1, 2, \dots, n, (2.d) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \tilde{y}_{1j} = \tilde{y}_{1p} + \tilde{n}_{1p}^+ - \tilde{n}_{1p}^- \quad p = 1, 2, \dots, n, (2.e) \\
 &\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \tilde{y}_{1j} = \alpha - \tilde{n}' + \tilde{p}', (2.f) \\
 &\theta_p \leq 1 \quad p = 1, 2, \dots, n, (2.g) \\
 &\sum_{j=1}^n \tilde{y}_{1j} - \alpha \geq \sum_{p=1}^n \tilde{n}_{1p}^- - \sum_{p=1}^n \tilde{n}_{1p}^+, (2.h) \\
 &\lambda_{jp} \geq 0, \tilde{S}_{ip}^- \geq 0, \tilde{S}_{rp}^+ \geq 0, \tilde{n}_{1p}^+ \geq 0, \tilde{n}_{1p}^- \geq 0, \tilde{n}' \geq 0, \tilde{p}' \geq 0. (2.i)
 \end{aligned}
 \tag{۲}$$

مدل (۲) یک رویکرد متمرکز فازی برای تخصیص مجوزهای انتشار است که در آن $\tilde{x}_i^d$ و $\tilde{x}_i^n$ نشان‌دهنده i امین ورودی قابل کنترل و غیرقابل کنترل فازی هستند. همچنین $\tilde{y}_1$ ، خروجی نامطلوب و مطلوب فازی هستند. از آن‌جا که کلیه ورودی‌ها و خروجی‌ها اعداد مثلثی فازی در نظر گرفته شده‌اند، متغیرهایی که در ادامه نامبرده می‌شوند نیز عدد مثلثی فازی هستند: (الف) متغیرهای کمکی ورودی‌ها و خروجی‌ها $(\tilde{S}_{ip}^-, \tilde{S}_{rp}^+)$ ، (ب) میزان کاهش و کاهش بیش از حد خروجی نامطلوب $(\tilde{n}', \tilde{p}')$ و (ج) مقدار خروجی نامطلوب که قابل معامله باشد $(\tilde{n}_{1p}^+, \tilde{n}_{1p}^-)$. برای حل مدل (۲)، همه محدودیت‌های فازی و تابع هدف باید به شکل قطعی تبدیل شوند. با استفاده از اعداد فازی مثلثی، مدل (۲) می‌تواند به صورت زیر اصلاح شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z &= \sum_{p=1}^n \theta_p + \varepsilon \cdot \left(\sum_{p=1}^n c \cdot (n_{1p,1}^+, n_{1p,2}^+, n_{1p,3}^+) - \sum_{p=1}^n c \cdot (n_{1p,1}^-, n_{1p,2}^-, n_{1p,3}^-) \right) + \varepsilon \cdot (p'_1, p'_2, p'_3), (3.a) \\
 \text{st : } &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \cdot (x_{ij,1}^d, x_{ij,2}^d, x_{ij,3}^d) = \theta_p \cdot (x_{ip,1}^d, x_{ip,2}^d, x_{ip,3}^d) - (S_{ip,1}^-, S_{ip,2}^-, S_{ip,3}^-) \quad i = 1, \dots, q \quad p = 1, \dots, n, (3.b) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \cdot (x_{ij,1}^n, x_{ij,2}^n, x_{ij,3}^n) = (x_{ip,1}^n, x_{ip,2}^n, x_{ip,3}^n) - (S_{ip,1}^-, S_{ip,2}^-, S_{ip,3}^-) \quad i = q+1, \dots, m \quad p = 1, \dots, n, (3.c) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \cdot (y_{rj,1}, y_{rj,2}, y_{rj,3}) = (y_{rp,1}, y_{rp,2}, y_{rp,3}) \oplus (S_{rp,1}^+, S_{rp,2}^+, S_{rp,3}^+) \quad r = 2, \dots, s \quad p = 1, \dots, n, (3.d) \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \cdot (y_{1j,1}, y_{1j,2}, y_{1j,3}) = (y_{1p,1}, y_{1p,2}, y_{1p,3}) \oplus (n_{1p,1}^+, n_{1p,2}^+, n_{1p,3}^+) - (n_{1p,1}^-, n_{1p,2}^-, n_{1p,3}^-) \quad p = 1, \dots, n, (3.e) \\
 &\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{jp} \cdot (y_{1j,1}, y_{1j,2}, y_{1j,3}) = \alpha - (n'_1, n'_2, n'_3) + (p'_1, p'_2, p'_3), (3.f) \\
 &\theta_p \leq 1 \quad p = 1, 2, \dots, n, (3.g) \\
 &\sum_{j=1}^n (y_{1j,1}, y_{1j,2}, y_{1j,3}) - \alpha \geq \sum_{p=1}^n (n_{1p,1}^-, n_{1p,2}^-, n_{1p,3}^-) - \sum_{p=1}^n (n_{1p,1}^+, n_{1p,2}^+, n_{1p,3}^+), (3.h) \\
 &\lambda_{jp} \geq 0, (3.i) \\
 &S_{ip,1}^- \geq 0, S_{ip,2}^- - S_{ip,1}^- \geq 0, S_{ip,3}^- - S_{ip,2}^- \geq 0, (3.j) \\
 &S_{rp,1}^+ \geq 0, S_{rp,2}^+ - S_{rp,1}^+ \geq 0, S_{rp,3}^+ - S_{rp,2}^+ \geq 0, (3.k) \\
 &n_{1p,1}^+ \geq 0, n_{1p,2}^+ - n_{1p,1}^+ \geq 0, n_{1p,3}^+ - n_{1p,2}^+ \geq 0, (3.l) \\
 &n_{1p,1}^- \geq 0, n_{1p,2}^- - n_{1p,1}^- \geq 0, n_{1p,3}^- - n_{1p,2}^- \geq 0, (3.m) \\
 &n'_1 \geq 0, n'_2 - n'_1 \geq 0, n'_3 - n'_2 \geq 0, (3.n) \\
 &p'_1 \geq 0, p'_2 - p'_1 \geq 0, p'_3 - p'_2 \geq 0, (3.o)
 \end{aligned}
 \tag{۳}$$



منفی نبودن $\tilde{p}'$, $\tilde{n}'$, $\tilde{n}_{ip}^-$, $\tilde{n}_{ip}^+$, $\tilde{S}_{ip}^+$, $\tilde{S}_{ip}^-$ از طریق محدودیت (3.j) تا محدودیت (3.o) در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از محاسبات فازی مورد بحث در تعریف (4.e) و (4.g)، تابع هدف و محدودیت‌های هدف مدل (۳) به معادلات زیر تبدیل می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{MinZ} &= \sum_{p=1}^n \theta_p + \varepsilon \cdot \left(\sum_{p=1}^n c \cdot (n_{ip,1}^+ - n_{ip,3}^-) + p'_1, \sum_{p=1}^n c \cdot (n_{ip,2}^+ - n_{ip,2}^-) + p'_2, \sum_{p=1}^n c \cdot (n_{ip,3}^+ - n_{ip,1}^-) + p'_3 \right), (4.a) \\ \text{st : } &\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ij,1}^d, \lambda_{jp} x_{ij,2}^d, \lambda_{jp} x_{ij,3}^d) = (\theta_p x_{ip,1}^d - S_{ip,3}^-, \theta_p x_{ip,2}^d - S_{ip,2}^-, \theta_p x_{ip,3}^d - S_{ip,1}^-) \quad i = 1, \dots, q \quad p = 1, 2, \dots, n, (4.b) \\ &\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ij,1}^n, \lambda_{jp} x_{ij,2}^n, \lambda_{jp} x_{ij,3}^n) = (x_{ip,1}^n - S_{ip,3}^-, x_{ip,2}^n - S_{ip,2}^-, x_{ip,3}^n - S_{ip,1}^-) \quad i = q+1, \dots, m \quad p = 1, 2, \dots, n, (4.c) \\ &\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{ij,1}, \lambda_{jp} y_{ij,2}, \lambda_{jp} y_{ij,3}) = (y_{ip,1} + S_{ip,1}^+, y_{ip,2} + S_{ip,2}^+, y_{ip,3} + S_{ip,3}^+) \quad r = 2, \dots, s \quad p = 1, 2, \dots, n, (4.d) \\ &\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1j,1}, \lambda_{jp} y_{1j,2}, \lambda_{jp} y_{1j,3}) = (y_{1p,1} + n_{1p,1}^+ - n_{1p,3}^-, y_{1p,2} + n_{1p,2}^+ - n_{1p,2}^-, y_{1p,3} + n_{1p,3}^+ - n_{1p,1}^-) \quad p = 1, \dots, n, (4.e) \\ &\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1j,1}, \lambda_{jp} y_{1j,2}, \lambda_{jp} y_{1j,3}) = (\alpha - n'_3 + p'_3, \alpha - n'_2 + p'_2, \alpha - n'_1 + p'_1), (4.f) \\ &\theta_p \leq 1 \quad p = 1, \dots, n, (4.g) \\ &\sum_{j=1}^n (y_{1j,1} - \alpha, y_{1j,2} - \alpha, y_{1j,3} - \alpha) \geq \sum_{p=1}^n (n_{1p,1}^- - n_{1p,3}^+, n_{1p,2}^- - n_{1p,2}^+, n_{1p,3}^- - n_{1p,1}^+), (4.h) \\ &\lambda_{jp} \geq 0, (4.i) \\ &S_{ip,1}^- \geq 0, S_{ip,2}^- - S_{ip,1}^- \geq 0, S_{ip,3}^- - S_{ip,2}^- \geq 0, (4.j) \\ &S_{ip,1}^+ \geq 0, S_{ip,2}^+ - S_{ip,1}^+ \geq 0, S_{ip,3}^+ - S_{ip,2}^+ \geq 0, (4.k) \\ &n_{ip,1}^+ \geq 0, n_{ip,2}^+ - n_{ip,1}^+ \geq 0, n_{ip,3}^+ - n_{ip,2}^+ \geq 0, (4.l) \\ &n_{ip,1}^- \geq 0, n_{ip,2}^- - n_{ip,1}^- \geq 0, n_{ip,3}^- - n_{ip,2}^- \geq 0, (4.m) \\ &n'_1 \geq 0, n'_2 - n'_1 \geq 0, n'_3 - n'_2 \geq 0, (4.n) \\ &p'_1 \geq 0, p'_2 - p'_1 \geq 0, p'_3 - p'_2 \geq 0. (4.o) \end{aligned} \quad (4)$$

تابع هدف مدل (۴) و محدودیت (4.b) تا محدودیت (4.h) از طریق ضرب، جمع و تفریق اعداد مثلثی فازی به دست آمده است. براساس رابطه نابرابری فازی، محدودیت (4.h) به نابرابری‌های زیر تغییر یافته است:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n y_{1j,1} - \alpha &\geq \sum_{p=1}^n n_{1p,1}^- - n_{1p,3}^+, \\ \sum_{j=1}^n y_{1j,2} - \alpha &\geq \sum_{p=1}^n n_{1p,2}^- - n_{1p,2}^+, \\ \sum_{j=1}^n y_{1j,3} - \alpha &\geq \sum_{p=1}^n n_{1p,3}^- - n_{1p,1}^+. \end{aligned}$$

بنابراین، با استفاده از تعریف برابری و نابرابری دو عدد فازی، می‌توانیم تابع هدف و محدودیت‌های مدل (۴) را به شکل زیر بازنویسی کنیم:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z &= \sum_{p=1}^n \theta_p + \varepsilon \cdot \left(\sum_{p=1}^n c \cdot (n_{1pk}^+ - n_{1p4-k}^-) + p'_k \right) \quad k=1,2,3, \quad (5.a) \\
 \text{st : } & \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ijk}^d) = (\theta_p x_{ipk}^d - S_{ip4-k}^-) \quad i=1,\dots,q \quad p=1,2,\dots,n \quad k=1,2,3, \quad (5.b) \\
 & \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ijk}^n) = (x_{ipk}^n - S_{ip4-k}^-) \quad i=q+1,\dots,m \quad p=1,2,\dots,n \quad k=1,2,3, \quad (5.c) \\
 & \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{rjk}) = (y_{rpk} + S_{rpk}^+) \quad r=2,\dots,s \quad p=1,2,\dots,n \quad k=1,2,3, \quad (5.d) \\
 & \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1jk}) = (y_{1pk} + n_{1pk}^+ - n_{1p4-k}^-) \quad p=1,\dots,n \quad k=1,2,3, \quad (5.e) \\
 & \sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1jk}) = (\alpha - n'_{4-k} + p'_{4-k}) \quad k=1,2,3, \quad (5.f) \\
 & \theta_p \leq 1 \quad p=1,\dots,n, \quad (5.g) \\
 & \sum_{j=1}^n (y_{1jk} - \alpha) \geq \sum_{p=1}^n (n_{1pk}^- - n_{1p4-k}^+) \quad k=1,2,3, \quad (5.h) \\
 & \lambda_{jp} \geq 0, \quad (5.i) \\
 & S_{ip1}^- \geq 0, S_{ip2}^- - S_{ip1}^- \geq 0, S_{ip3}^- - S_{ip2}^- \geq 0, \quad (5.j) \\
 & S_{rp1}^+ \geq 0, S_{rp2}^+ - S_{rp1}^+ \geq 0, S_{rp3}^+ - S_{rp2}^+ \geq 0, \quad (5.k) \\
 & n_{1p1}^+ \geq 0, n_{1p2}^+ - n_{1p1}^+ \geq 0, n_{1p3}^+ - n_{1p2}^+ \geq 0, \quad (5.l) \\
 & n_{1p1}^- \geq 0, n_{1p2}^- - n_{1p1}^- \geq 0, n_{1p3}^- - n_{1p2}^- \geq 0, \quad (5.m) \\
 & n'_1 \geq 0, n'_2 - n'_1 \geq 0, n'_3 - n'_2 \geq 0, \quad (5.n) \\
 & p'_1 \geq 0, p'_2 - p'_1 \geq 0, p'_3 - p'_2 \geq 0. \quad (5.o)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

مدل (۵) تمامی واحدهای تصمیم‌گیری را در یکجا در نظر گرفته و بنابراین تخصیص مجوز هر واحد را جداگانه تعیین نمی‌کند. در نتیجه، **مدل (۵)** واحدهایی که میزان انتشار اولیه آن‌ها پایین‌تر از مقدار مجوز تخصیص داده شده است ($n_{1p4-k}^+ > 0$) را مشخص می‌کند. این واحدها مجاز به افزایش خروجی‌های نامطلوب خود هستند تا سایر خروجی‌های مطلوب نیز افزایش یافته و بتوانند به مرز کارایی برسند. از طرف دیگر، این واحدها می‌توانند مجوز انتشار خود را به کشورهای دیگر بفروشند یا برای آینده خود ذخیره نمایند.

مدل (۵) همچنین واحدهایی که دارای مقادیر انتشار اضافی هستند ($n_{1pk}^- > 0$) را مشخص می‌کند. این واحدها می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را کاهش داده یا مجوز انتشار اضافی را خریداری کنند. این موارد در **محدودیت (5.e)** **مدل (۵)** گنجانده شده است. **محدودیت (5.f)** نشان می‌دهد که مجموع گازهای خروجی کشورها نباید از یک محدودیت مقداری از پیش تعیین شده (α) تجاوز کند تا به سایر خروجی‌ها آسیب نرساند. اگر کاهش مشخص شده زیاد باشد، برای جلوگیری از کاهش خروجی‌های مطلوب متغیر p'_k مقدار مثبت به خود می‌گیرد. همان‌طور که در **محدودیت (5.g)** نشان داده شده است، مقادیر کارایی نسبی نباید بیشتر از ۱ باشد. **محدودیت (5.h)** تضمین می‌کند که تفاوت بین مجموع میزان انتشار گاز و محدودیت موردنظر، بزرگ‌تر یا مساوی با تفاوت بین کاهش و افزایش مقادیر گازهای منتشره می‌باشد. تابع هدف **مدل (۵)** نرخ ورودی‌ها (θ_p) و انتشار گازهای اضافی (n_{1pk}^-) را به حداقل می‌رساند. همچنین تابع هدف، کاهش بیش‌ازحد مقادیر انتشار را که بر خروجی‌های مطلوب تأثیر می‌گذارد (p'_k) را کمینه می‌کند و نهایتاً مقادیر مجوزهای قابل فروش (n_{1p4-k}^+) توسط تابع هدف بیشینه می‌گردد. در ادامه به ارائه چند قضیه در مورد مدل می‌پردازیم:

قضیه ۱- مدل (۵) همیشه یک جواب شدنی دارد.

اثبات- اگر مقادیر $\tilde{n}_p^+ = \tilde{0}$, $\tilde{n}_p^- = \tilde{0}$, $\tilde{S}_p^- = \tilde{0}$, $\theta_p = 1$, $\lambda_p = e_p$ $\forall p$: اختصاص دهیم که در آن $\tilde{0} = (0, 0, 0)$ صفر سینگلتون می‌باشد، برای محدودیت‌های مدل خواهیم داشت:



$$\begin{aligned} x_{ipk}^d &= x_{ipk}^d - 0 & i &= 1, \dots, q & p &= 1, 2, \dots, n & k &= 1, 2, 3, \quad (5-b)' \\ x_{ipk}^n &= x_{ipk}^n - 0 & i &= q, \dots, m & p &= 1, 2, \dots, n & k &= 1, 2, 3, \quad (5-c)' \\ y_{rpk} &= y_{rpk} + 0 & r &= 2, \dots, s & p &= 1, 2, \dots, n & k &= 1, 2, 3, \quad (5-d)' \\ y_{1pk} &= y_{1pk} + 0 - 0 & p &= 1, \dots, n & k &= 1, 2, 3, \quad (5-e)' \\ y_{1pk} - \alpha &\geq 0 & p &= 1, \dots, n & k &= 1, 2, 3, \quad (5-g)' \end{aligned}$$

از آن جا که α برابر یا کمتر از کل خروجی‌های نامطلوب $(\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1jk}))$ است بنابراین برای محدودیت (5.f) ما دو عبارت مرتبط با α داریم:

$$\begin{aligned} 1: & \text{if } \alpha = \sum_{p=1}^n y_{1pk} \Rightarrow n'_k = 0, p'_k = 0 \quad k=1,2,3 \\ 2: & \text{if } \alpha < \sum_{p=1}^n y_{1pk} \Rightarrow n'_k = 0, p'_1 = (\sum_{p=1}^n y_{1p1} - \alpha), p'_2 = (\sum_{p=1}^n y_{1p2} - \alpha), p'_3 = \max \left\{ (\sum_{p=1}^n y_{1p3} - \alpha), (\sum_{p=1}^n y_{1p2} - \alpha) \right\} \quad k=1,2,3 \end{aligned}$$

این‌ها نشان می‌دهد که در هر یک از عبارات که قبلاً ذکر شد، همه محدودیت‌ها را ارضا می‌کند و از این‌رو، مدل پیشنهادی همیشه یک جواب شدنی دارد.

قضیه ۲- در هر جواب شدنی برای هر واحد تصمیم‌گیری، نمره کارایی نسبی مدل (۵) از ۰ بیشتر است $(\theta_p > 0)$.

اثبات- ابتدا اثبات می‌کنیم که $(\lambda_{jp} > 0)$. به دلیل منفی نبودن خروجی فازی $(y_{rpk} \geq 0)$ و محدودیت فازی $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{rjk}) \geq y_{rpk}$ (بنابه تساوی $(y_{rpk} + S_{rpk}^+)$) که در آن $S_{rpk}^+ \geq 0$ می‌باشد) داریم $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{rjk}) \geq y_{rpk}$. مطابق با تعریف ۵، $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{rjk}) \geq 0$ و $\sum_{j=1}^n \lambda_{jp} y_{rj3} > 0$ است زیرا $y_{rj3} > 0$ از آن جایی که در $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ijk}^d) = (\theta_p x_{ipk}^d - S_{ip4-k}^-)$ داریم $S_{ip4-k}^- \geq 0$ ، بنابراین به دلیل نامنفی بودن $x_{ipk}^d \geq 0$ و $\lambda_{jp} > 0$ خواهیم داشت $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ijk}^d) \leq \theta_p x_{ipk}^d$ بنابراین نتیجه می‌گیریم که $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ijk}^d) \geq 0$ که بدین معنی است که $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} x_{ij3}^d) > 0$. نهایتاً متغیر $\theta_p x_{ip3}^d$ در سمت راست، مقدار مثبت گرفته و خواهیم داشت $\theta_p > 0$ زیرا $x_{ip3}^d > 0$.

قضیه ۳- مقدار بهینه تابع هدف مدل (۵) محدود و متناهی است.

اثبات- از آن جایی که $\theta_p \leq 1$ ما داریم $\sum_{p=1}^n \theta_p \leq n$ و $\theta_p \rightarrow 0^+$ لذا مقدار تابع هدف در مرحله اول در محدوده $[0, n]$ قرار دارد. همچنین محدودیت (5.f) به مقدار صفر محدود است، زیرا p'_{4-k} مقدار غیر منفی دارد. از طرف دیگر، سمت راست محدودیت (5.e) یعنی $(y_{1pk} + n_{1pk}^+ - n_{1p4-k}^-)$ متمایل به $-\infty$ نیست و در سمت چپ خواهیم داشت $\sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{1jk}) \geq 0$ بنابراین $n_{1pk}^+ - n_{1p4-k}^-$ محدود می‌باشد و مقدار تابع هدف در مرحله دوم نیز محدود خواهد بود. در نتیجه مقدار بهینه تابع هدف مدل (۵) که مجموع دو مرحله می‌باشد نیز محدود و متناهی خواهد بود.

قضیه ۴ برای برآورد کارایی نسبی هر واحد تصمیم‌گیری ارائه شده است و شرط لازم و کافی برای کارایی نسبی هر واحد تصمیم‌گیری را بیان می‌کند.

قضیه ۴- فرض کنید که θ_p^* مقدار بهینه تابع هدف است. اگر $\theta_p^* = 1$ ، پس p امین واحد تصمیم‌گیری کار است و $n_{I_p}^{+*} - n_{I_p}^{-*} = 0$. بنابراین در هر جواب بهینه داریم $n_{I_p}^{+*} = n_{I_p}^{-*} = 0$ یعنی نیاز به کم و یا زیاد کردن مقدار انتشار نیست.

اثبات- اگر $\theta_p^* = 1$ باشد پس p امین واحد تصمیم‌گیری کارا بوده و روی مرز کارایی قرار دارد. در محدودیت (5.e)، برای این نقطه بهینه، داریم $\sum_{j=1}^n \lambda_{jp}^* y_{Ijk} = y_{Ipk}$. $\forall p$. بنابراین $n_{I_p}^{+*} - n_{I_p}^{-*} = 0$ بوده و در نتیجه $n_{I_p}^{+*} = n_{I_p}^{-*} = 0$ یک جواب بهینه است.

۴- مطالعه موردی و تحلیل حساسیت

۴-۱- مطالعه موردی

در این بخش به بررسی و تحلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای ۳۳ کشور عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه^۱ و کل گازهای منتشر شده آن‌ها می‌پردازیم. به دلیل خروج ایالات متحده از توافق‌نامه اقلیمی پاریس، ما این کشور را در نظر نمی‌گیریم. مدل (5) به توزیع و تجارت مجوزهای انتشار با توجه به سیاست محدودیت و تجارت در یک محیط فازی کمک می‌کند. همچنین، این مدل مقدار مجاز کاهش گازهای منتشره بدون کاهش سایر خروجی‌ها را تعیین می‌کند. تفاوت بین مقدار مجوز تخصیص داده‌شده و میزان گازهای منتشره می‌تواند معامله شود. در اینجا، ما جمعیت را ورودی غیرقابل کنترل در نظر گرفته و نیروی کار، سهام سرمایه کل^۲ و کل مصرف انرژی را به عنوان ورودی‌های قابل کنترل در نظر گرفته‌ایم. تولید ناخالص ملی^۳ یک خروجی مطلوب و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به عنوان خروجی نامطلوب لحاظ شده است.

تاریخچه داده‌ها به سال ۲۰۱۴ برمی‌گردد که از آژانس بین‌المللی انرژی (www.iea.org)، کتاب سال آماری انرژی کل^۴ (www.yearbook.enerdata.net)، یوروستات^۵ (www.europa.eu) و آمار مربوط به سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (www.stats.oecd.org). مقادیر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دقیق نیست زیرا منابع مختلف مقادیر متفاوتی ارائه داده‌اند. عدم قطعیت این متغیرها با اعداد فازی مثلثی نشان داده شده است. جدول ۲ مجموعه داده‌ها را نشان می‌دهد.

^۱Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)

^۲Total capital stock

^۳Gross domestic product

^۴Total energy statistical year book

^۵Eurostat

جدول ۲- مجموعه داده‌های کشورهای عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه در سال ۲۰۱۴.

Table 2- Data collection of the countries member of the economic cooperation and development organization in 2014.

کشورها	خروجی‌ها		ورودی‌ها		نامطلوب	غیرقابل کنترل	قابل کنترل	مصرف انرژی
	مطلوب	تولید ناخالص ملی	مطلوب	غیرقابل کنترل	مطلوب	غیرقابل کنترل	قابل کنترل	مصرف انرژی
	(۱۰۰۰۰۰۰ دلار)	(۱۰۰۰ تن)	(۱۰۰۰ تن)	(۱۰۰۰ نفر)	(۱۰۰۰۰۰ دلار)	(۱۰۰۰ نفر)	(۱۰۰۰ نفر)	(۱۰۰۰۰۰۰ تن)
استرالیا	1077535.2	519002.7, 522397.1, 526897.6	23491	3944975.5	12335.8	125.34703, 127.25265, 129.15827		
اتریش	369329.5	76277.9, 76332.6, 76381.3	8468.6	1891024.375	4357.7	31.8414, 32.163, 32.4846		
بلغارستان	459555.3	113654.5, 113866.6, 114116.2	11227.3	2300616	4967	52.75679, 53.98783, 55.21887		
کانادا	1515437.6	721658.4, 727158.2, 732418.9	35540	6097224.5	19189.3	232.62802, 256.37513, 280.12224		
شیلی	375593.3	108809.7, 109908.8, 111109.1	17819.1	1166427.75	8442.7	33.365, 36.103, 38.841		
جمهوری چک	313253.4	121400.2, 123650.7, 125838.6	10524.8	1733171.12	5297.9	41.18915, 41.29313, 41.39711		
دانمارک	253126.2	51880.5, 52166.8, 52466.4	5627.2	1079511.12	2889.8	15.517, 16.211, 16.905		
استونی	34181.7	21056.6, 21081.1, 21109.2	1315.8	150939.28	682.8	5.348, 6.037, 6.726		
فنلاند	207831.4	59029, 59072.4, 59122.2	5472	1003242.06	2699	33.5946, 33.934, 34.2733		
فرانسه	2455870	459917.5, 464417.8, 468758.1	64062.3	12076728	29499.5	240.1585, 242.58436, 245.01020		
آلمان	3473467.5	900202.2, 904262.2, 908462.8	80896	15146735	41943	297.10632, 301.61568, 306.12504		
یونان	255977.8	99203.3, 101403.3, 103453.1	10926.8	2004816.37	4819.2	21.839, 23.134, 24.429		
مجارستان	235520	56567.8, 57223.6, 57923.5	9863	1065811.75	4444.1	22.60764, 22.836, 23.06436		
ایسلند	13980	4305.4, 4455.1, 4596.8	327.4	59350.67	187	5.672, 5.865, 6.058		
ایرلند	269794.2	57262.1, 57757.9, 58297.1	4609.9	991600.87	2156.1	11.978, 12.77, 13.562		
ایتالیا	2013578.9	413587.9, 418587.2, 423324.4	60447.9	13027931	25514.9	141.8868, 146.45693, 151.027		
ژاپن	4436993.5	1359997.4, 1361929.8, 1364930.9	127298	18236474	65770	440.11712, 441.73598, 443.35484		
کره	1741967.1	673081.2, 682581, 690615.5	50424	6839375	26535.9	274.56044, 275.69029, 276.82014		
لوکزامبورگ	49821	10741.4, 10756, 10776.2	549	180698.06	396.1	4.015, 4.215, 4.415		
مکزیک	1939052.3	626280.6, 632880, 639208.8	119713	6677512	51836.8	186.845, 187.979, 189.113		
هلند	769031.7	186318.1, 186845.4, 187445	16804.8	3507223.25	8964.8	72.2165, 72.946, 73.6754		
نیوزلند	151788	79367.5, 80267.9, 81104.4	4509.7	459617.12	2455	20.74918, 20.82162, 20.894056		
نروژ	307690.7	52980.2, 53155.8, 53355.8	5137	1294501.25	2734	28.7133, 29.00340, 29.29343		
لهستان	931796	379287.2, 380037.6, 380687.7	38484	2073986.87	17428	94.41528, 94.456813, 94.49833		
پرتغال	276229.6	63900.2, 64195.6, 64525.1	10457.3	1937154.75	5225.6	21.0344, 21.21501, 21.396617		
اسلوواکی	152340.8	40593.8, 40638.7, 40677.8	5415.9	522355.84	40593.8	15.7865, 15.946, 16.1054		
اسلوونی	58189.6	16554.3, 16582.3, 16614.2	2061.6	338292.25	1015.4	6.6062, 6.673, 6.7397		
اسپانیا	1472316.5	319214.2, 324214.8, 328926.3	46464.1	8438931	22954.6	111.257, 112.93524, 114.61348		
سوئد	432516.4	53289.7, 53836.2, 54436.1	9609	1774148	5153.6	47.755, 47.941328, 48.128		
سوئیس	446085.7	48585.9, 48605.2, 48620.2	8140	1907268.12	5102.6	24.8064, 25.057, 25.30757		
ترکیه	1424172.3	443680.3, 455615, 467615.7	76902.9	4605440.5	28786	120.0466, 120.85928, 121.67191		
بریتانیا	2476524.3	525420.2, 526370.3, 527203.4	63650	11811327	32638.9	175.8308, 177.60667, 179.38523		

در سال ۲۰۱۴، کل میزان تولید گازهای گلخانه‌ای منتشرشده توسط همه کشورها به مقدار (8666315.3, 8732253, 8798192.9) هزار تن بوده که عددی فازی می‌باشد. کشورها در پروتکل کیوتو متعهد شده بودند که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را به مقدار ۸٪ کاهش دهند. اگر این فرض را در نظر بگیریم، پس میزان حد بالای انتشار فازی برابر با (7973010.1, 8033672.8, 8094337.5) خواهد شد.

ما به دنبال آن هستیم تا مقدار تخصیص کشورها و میزان تبادلات آن‌ها با توجه به مقادیر تخصیص فازی را طوری به دست آوریم که مجموع میزان انتشار آن‌ها به مقدار تعیین شده برسد. به عبارت دیگر می‌خواهیم ببینیم این که کدام کشورها می‌توانند مازاد سهمیه خود را



۱۱۳

بفروشد و کدام کشورها باید کمبود سهمیه خود را با خرید سهمیه جبران کنند. با اجرای مدل (۵) برای مقادیر کارایی و تخصیص کشورها داریم:

جدول ۳- مجموعه کارایی و مقادیر تخصیص کشورهای عضو.

Table 3- Set of efficiency and allocation values of member countries.

کشورها	مقادیر کارایی	مقادیر مجوزهای تخصیص داده شده
استرالیا	0.905	(278536.2, 278975.6, 279483)
اتریش	0.706	(81067.9, 81583, 82149.5)
بلغارستان	0.736	(99070.8, 99209.7, 99400.4)
کانادا	0.822	(393015.2, 393636.6, 394352.2)
شیلی	0.895	(124881.5, 125332.4, 125781.4)
جمهوری چک	0.605	(79860.8, 80130.1, 80424.7)
دانمارک	0.828	(58591, 59030.4, 59503.8)
استونی	0.664	(10607.4, 10626.1, 10644.9)
فنلاند	0.715	(49759.3, 49833.4, 49925.2)
فرانسه	0.723	(557065, 559583.2, 562395.2)
آلمان	0.791	(839960, 844149.3, 848708.5)
یونان	0.527	(54329.6, 54800.1, 55311.6)
مجارستان	0.699	(66261.2, 66607.8, 66969.8)
ایسلند	0.779	(3627.6, 3633.3, 3640)
ایرلند	1	(57262.1, 57757.9, 58297.1)
ایتالیا	0.67	(427369.2, 431069.6, 435093.8)
ژاپن	0.775	(1229231.3, 1234017.9, 1239069.2)
کره	0.789	(501671.7, 502519.5, 503418.3)
لوکزامبورگ	1	(10741.4, 10756.0, 10776.2)
مکزیک	0.822	(632056.8, 634451.5, 636854.3)
هلند	0.771	(178642.1, 179400.1, 180244.1)
نیوزلند	0.912	(50662.5, 50754.9, 50843.8)
نروژ	0.895	(66246.7, 66378.9, 66547)
لهستان	1	(379287.3, 380037.6, 380687.7)
پرتغال	0.649	(58627.9, 59135.5, 59687.6)
اسلواکی	0.813	(50428.7, 50584.7, 50739.4)
اسلوونی	0.581	(14658.8, 14737.9, 14822.7)
اسپانیا	0.646	(312489.7, 315195.4, 318137.9)
سوئد	0.825	(107691.7, 107857.1, 108054.5)
سوئیس	0.886	(94678.8, 95498.6, 96390.1)
ترکیه	0.902	(447537.1, 449384.4, 451260.6)
بریتانیا	0.748	(562239.1, 566596.1, 571301.1)
جمع کل		(7878157.7, 7913265.8, 7950917.1)





مقادیر مجوزهای انتشار تخصیص داده شده به کشورها مطابق جدول ۳ می باشد که مجموع آن برای کل کشورهای عضو در حالت فازی به شکل (7878157.7, 7913265.8, 7950917.1) می باشد. به طور کلی این کشورها متناسب با نتیجه تخصیص به ۳ گروه تقسیم می شوند. گروه اول: کشورهایی که کارا هستند و عدد کارایی شان برابر با یک می باشد ($\theta_p = 1$) همانند ایرلند، لوکزامبورگ و لهستان کارا هستند، در نتیجه عدد کارایی شان قطعاً برابر با یک است. گروه دوم: کشورهایی همچون استرالیا، بلژیک و کانادا هستند که کارایی نسبی آنها کمتر از یک بوده ($\theta_p < 1$) و کارا نیستند. به عبارت دیگر مقداری که متغیر ($n_{Ip}^- > 0$) می گیرد مثبت است. پس باید مقدار انتشارشان را کاهش داده یا این که باید مجوز انتشار اضافی را از سایر کشورها خریداری نمایند. گروه سوم کشورهایی همانند شیلی و دانمارک می باشند که مجاز هستند تا حدی میزان انتشارشان را افزایش دهند، یعنی این که ($n_{Ip}^+ > 0$) است. همچنین این کشورها می توانند میزان انتشار مازاد خود را بفروشند و یا سهمیه های انتشار خود را ذخیره کنند. نتایج نشان می دهد که $n'_1=146019.8$, $n'_2=120407.2$ and $n'_3=91901.3$ بوده و مجموع میزان انتشار تخصیص یافته به عنوان اولین خروجی برابر است با (7878157.7, 7913265.8, 7950917.1) که با مقدار حداکثر تولید گازهای گلخانه ای در نظر گرفته شده (α) یعنی

$$\left(\sum_{p=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_{jp} y_{Ijk}) \right) = (\alpha - n'_{4-k} + p'_{4-k}) \quad (5.f) \text{ داریم}$$

یعنی مجموع مقادیر y_{Ijk} می تواند برابر با α نباشد، یعنی برای حدود پایین، میانه و بالا به ترتیب داریم: $7950917.1=8096937$ ، $7913265.8=8033673$ ، $7878157.7=7970059$ ، 91901.3 این بدان معنی است که حد پایین، میانه و

بالایی عدد فازی مثلثی مقدار محدودیت از جمع مقادیر انتشار بیشتر است.

Table 4- Values of the amount of allocation of countries and the amount of exchanges between them.

کشورها	مقدار قطعی تخصیص	n_{Ip}^+ : مقداری که می‌تواند افزایش یافته یا فروخته شود (۱۰۰۰ تن)	n_{Ip}^- : مقداری که باید کاهش یافته یا خریداری شود (۱۰۰۰ تن)
استرالیا	278992.3		243681.32
اتریش	81595.9	5264.75	
بلغارستان	99222.7		14653.32
کانادا	393660.1		333438.27
شیلی	125331.9	15397.82	
جمهوری چک	80136.4		43498.62
دانمارک	59038.9	6868.77	
استونی	10626.1		10455.85
فنلاند	49837.8		9236.17
فرانسه	559656.6	95278.85	
آلمان	844241.7		60055.57
یونان	54810.4		46555.4
مجارستان	66611.7	9377.02	
ایسلند	3633.5		819.55
ایرلند	57768.8		
ایتالیا	431150.5	12628.87	
ژاپن	1234084.1		128112.9
کره	502532.2		179682.42
لوکزامبورگ	10757.4		
مکزیک	634453.5	1641.175	
هلند	179421.6		7441.87
نیوزلند	50754.1		29497.9
نروژ	66387.9	13225.97	
لهستان	380012.5		
پرتغال	59146.6		5057.5
اسلواکی	50584.4	9947.12	
اسلوونی	14739.3		1843.95
اسپانیا	315254.6		8887.92
سوئد	107865.1	54015.55	
سوئیس	95516.5	46912.4	
ترکیه	50754.1		6239.87
بریتانیا	66387.9	40342.05	
جمع کل	7913900	310900.37	1099660.55





در نتیجه مقدار محدودیت باید اصلاح شود. حال، نیاز به روشی است که عدد فازی مثلثی را به عدد قطعی تبدیل کند. روش‌های فازی زدایی^۱ رایج شامل روش مرکز ثقل^۲، روش میانگین حداکثر^۳، روش نیمساز ناحیه^۴، روش کوچک‌ترین حداکثر^۵ و روش بزرگ‌ترین حداکثر^۶ می‌باشد (سیوانندام و همکاران، ۲۰۰۷). در این مقاله روش نیمساز ناحیه به کار گرفته شده است که فرمول این روش فازی زدایی برای عدد فازی مثلثی (a, b, c) به شکل $\left(\frac{a+2b+c}{4}\right)$ است. با توجه به این روش، مقادیر فازی زدایی شده (قطعی) برای میزان تخصیص کشورها و میزان تبادلات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

ستون سوم جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر انتشاری است که می‌توانند افزایش یابند و ستون چهارم این جدول نشان‌دهنده مقادیر انتشاری است که باید کاهش یابند. جدول ۴ مشخص می‌کند که در کشوری همانند استرالیا مقدار گاز انتشار یافته‌ای که باید کاهش یابد 243681.32 هزار تن است و یا در مورد کشور اتریش، میزان انتشار می‌تواند به اندازه 5264.75 هزار تن افزایش یابد زیرا مقدار قطعی و فازی زدایی شده سهمیه کشور استرالیا 278992.3 هزار تن و برای کشور اتریش 81595.9 هزار تن است. پس اولی باید کاهش داده و دومی می‌تواند افزایش دهد و به این روال برای سایر کشورها نیز در جدول ذکر شده است. به طور خلاصه می‌توان گفت 17 کشور باید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را کاهش و 12 کشور می‌توانند میزان انتشار گاز گلخانه‌ای خود را افزایش دهند. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود کل مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای که کشورها باید کاهش دهند (1099660.55) از کل مقداری که کشورها می‌توانند افزایش داده و یا به فروش برسانند (310900.37)، بیشتر است.

۲-۴- تحلیل حساسیت

جواب بهینه مدل ۵، به مقدار α بستگی دارد که در پروتکل‌ها، توافقنامه‌ها و دیگر معاهدات تعیین می‌گردد. در این بخش اجراها یا آزمایش‌ها مختلفی جهت بررسی اثرات تغییرات مقدار α روی نتایج خروجی مدل‌ها انجام شده است. از طریق این آزمایش‌ها مقدار α تغییر کرده است و نتایج قطعی شده آن در جدول ۵ نشان داده شده است:

^۱Defuzzification

^۲Centroid Of Area (COA)

^۳Mean Of Maximum (MOM)

^۴Bisector Of Area (BOA)

^۵Smallest Of Maximum (SOM)

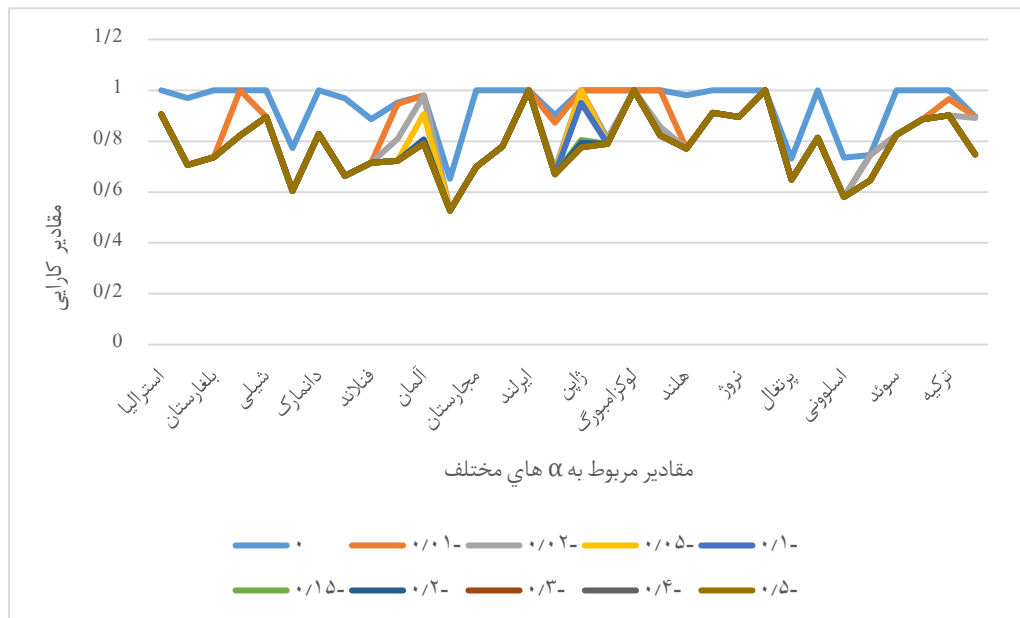
^۶largest of Maximum (LOM)

Table 5- Changes of relative efficiency scores of countries based on changes in the value of α .

تغییرات مقدار α بر حسب درصد										
-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	-0.02	-0.01	0	
1	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	استرالیا
0.969	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	اتریش
1	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736	بلغارستان
1	1	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	کانادا
1	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	شیلی
0.773	0.605	0.605	0.605	0.605	0.605	0.605	0.605	0.605	0.605	جمهوری چک
1	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	دانمارک
0.968	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	استونی
0.886	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	0.715	فنلاند
0.952	0.947	0.808	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	فرانسه
0.980	0.980	0.980	0.906	0.791	0.791	0.807	0.791	0.791	0.791	آلمان
0.652	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	یونان
1	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	0.699	مجارستان
1	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	ایسلند
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ایرلند
0.903	0.872	0.689	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	ایتالیا
1	1	1	1	0.95	0.805	0.793	0.775	0.775	0.775	ژاپن
1	1	0.811	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	کره
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	لوکزامبورگ
1	1	0.856	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	مکزیک
0.981	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	هلند
1	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	0.912	نیوزلند
1	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	0.895	نروژ
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	لهستان
0.732	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	پرتغال
1	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813	اسلواکی
0.735	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581	اسلوونی
0.746	0.746	0.746	0.646	0.646	0.646	0.646	0.646	0.646	0.646	اسپانیا
1	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	سوئد
1	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	سوئیس
1	0.965	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	ترکیه
0.896	0.896	0.891	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748	بریتانیا



جدول ۵ نشان می‌دهد که کارایی کشورها متأثر از مقادیر α می‌باشد. کارایی کشورهایی که کارا نیستند با کاهش مقدار α افزایش می‌یابد همچنین کارایی کشورهایی که کارا هستند، تغییر پیدا نمی‌کند. از طرف دیگر با تغییر مقدار α مقدار تبادلات و تجارت انتشار گازها بین کشورها تغییر خواهد کرد. تغییرات کارایی کشورها بر اساس تغییرات مقدار α در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱- تغییرات مقادیر کارایی کشورها با تغییر مقدار α .

Figure 1- Changes in the efficiency values of countries by changing the value of α .

رنگ‌های مختلف مقادیر کارایی کشورها را با مقدار α های مختلف نشان می‌دهند. به‌طور مثال خط آبی رنگ مقادیر کارایی کشورها را در حالت $\alpha=0$ نشان می‌دهد. در این قسمت آنالیز حساسیت دیگری برای تعیین تاثیرگذاری α روی مقدار تبادلات و تجارت انتشار نیز اجرا می‌گردد. تغییرات α بین 0.5- و 0.01- در نظر گرفته شده و نتایج در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶- تأثیر کاهش مقدار محدودیت (α) در مقادیر خریدوفروش انتشار.

Table 6- The effect of reducing the amount of restriction (α) on the amount of emissions.

-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	-0.01	تغییرات α
-309088.586	-243680.979	-243680.979	-243680.979	-243680.979	-243680.979	-243680.979	-243680.979	استرالیا
-36090.1	5264.777	5264.777	5264.777	5264.777	5264.777	5264.777	5264.777	اتریش
-63804.244	-14653.254	-14653.254	-14653.254	-14653.254	-14653.254	-14653.254	-14653.254	بلغارستان
-571718.98	-520454.075	-333438.211	-333438.211	-333438.211	-333438.211	-333438.211	-333438.211	کانادا
-5450.028	15397.874	15397.874	15397.874	15397.874	15397.874	15397.874	15397.874	شیلی
-100510.005	-43498.561	-43498.561	-43498.561	-43498.561	-43498.561	-43498.561	-43498.561	جمهوری چک
-24222.363	6868.792	6868.792	6868.792	6868.792	6868.792	6868.792	6868.792	دانمارک
-17357.642	-10455.778	-10455.778	-10455.778	-10455.778	-10455.778	-10455.778	-10455.778	استونی
-36429.33	-9236.11	-9236.11	-9236.11	-9236.11	-9236.11	-9236.11	-9236.11	فنلاند
-196793.763	-193237.66	-67094.229	95278.895	95278.895	95278.895	95278.895	95278.895	فرانسه
-525839.021	-525839.021	-525839.021	-358556.563	-60055.538	-60055.538	-60055.538	-60055.538	آلمان
-73475.197	-46555.39	-46555.39	-46555.39	-46555.39	-46555.39	-46555.389	-46555.39	یونان
-31573.091	9377.07	9377.07	9377.07	9377.07	9377.07	9377.07	9377.07	مجارستان
-2892.126	-819.488	-819.488	-819.488	-819.488	-819.488	-819.488	-819.488	ایسلند
0	0	0	0	0	0	0	0	ایرلند
-199128.315	-179321.739	-32401.257	12628.943	12628.943	12628.943	12628.943	12628.943	ایتالیا
-878755.819	-805522.417	-805522.417	-805522.417	-664261.477	-222403.666	-181687.186	-128112.849	ژاپن
-419118.347	-419118.347	-206836.675	-179682.376	-179682.376	-179682.376	-179682.376	-179682.376	کره
0	0	0	0	0	0	0	0	لوکزامبورگ
-194606.181	-194606.181	-42842.799	1641.183	1641.183	1641.183	1641.183	1641.183	مکزیک
-103072.148	-7441.832	-7441.832	-7441.832	-7441.832	-7441.832	-7441.832	-7441.832	هلند
-63713.572	-29497.86	-29497.86	-29497.86	-29497.86	-29497.86	-29497.86	-29497.86	نیوزلند
0	13225.995	13225.995	13225.995	13225.995	13225.995	13225.995	13225.995	نروژ
0	0	0	0	0	0	0	0	لهستان
-34106.998	-5057.417	-5057.417	-5057.417	-5057.417	-5057.417	-5057.417	-5057.417	پرتغال
-24038.665	9947.192	9947.192	9947.192	9947.192	9947.192	9947.192	9947.192	اسلواکی
-10243.115	-1843.935	-1843.935	-1843.935	-1843.935	-1843.935	-1843.935	-1843.935	اسلوونی
-163419.143	-163419.143	-163419.143	-8887.846	-8887.846	-8887.846	-8887.846	-8887.846	اسپانیا
0	54015.629	54015.629	54015.629	54015.629	54015.629	54015.629	54015.629	سوئد
0	46912.433	46912.433	46912.433	46912.433	46912.433	46912.433	46912.433	سوئیس
-85612.562	-60738.017	-6239.844	-6239.844	-6239.844	-6239.844	-6239.844	-6239.844	ترکیه
-256506.584	-256506.584	-251112.979	40342.094	40342.094	40342.094	40342.094	40342.094	بریتانیا



۱۲۰



جدول ۶ تغییر مقادیر کاهش و یا افزایش مقدار انتشار را با تغییر مقدار α نشان می‌دهد. در جدول ۶ مقدار قطعی‌ای که باید کاهش یابد (n_{lp}^-) و مقدار قطعی قابل فروش (n_{lp}^+) به ترتیب با علائم منفی و مثبت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر انتشار کشورهایی که کارا هستند بدون تغییر بوده ولی مقادیر تجارت انتشار کشورهای ناکارا تحت تأثیر α قرار می‌گیرد. تغییرات در تجارت انتشار با رنگ دیگر نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

امروزه توسعه پایدار به‌عنوان یک مسئله حیاتی در جهان در نظر گرفته شده است که توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. یکی از اساسی‌ترین ابعاد توسعه پایدار، پایداری محیط زیستی است. این امر باعث شد تا کشورها ضمن تأکید بر رشد اقتصادی خود، تأثیرات زیست‌محیطی را مورد توجه جدی قرار دهند. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش مهمی در دستیابی به پایداری محیط‌زیست دارد. بنابراین، در سطح ملی و بین‌المللی نگرانی‌های زیادی را به دست آورده است. برای رسیدن به پایداری انتشار گاز کشورها باید کاهش یابد. در این حالت، سیاست محدودیت و تجارت به‌عنوان رویکردی مؤثر شناخته می‌شود که در آن با تخصیص مجوزهای انتشار به کشورها، مقدار مجموع انتشار آن‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین، چگونگی انجام تخصیص مقادیر انتشار بین کشورها به روش عادلانه، برای کنترل مجموع میزان انتشار و بهبود مکانیسم تجارت بسیار مهم است. در این مقاله یک مدل تحلیل پوششی داده‌های متمرکز، که همه کشورها را یکجا در نظر می‌گیرد، برای تخصیص عادلانه مجوزهای انتشار در رویکرد محدودیت و تجارت بر اساس کار آیی کشورها ارائه شد. در این مدل ورودی‌ها به صورت قابل کنترل و غیر قابل کنترل و همچنین خروجی‌ها به صورت مطلوب و نامطلوب در نظر گرفته شدند. همچنین برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها، برخی از مقادیر به صورت قازی لحاظ شدند. برای نشان دادن کاربرد مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی در دنیای واقعی مربوط به تخصیص مقادیر کشورهای مختلف عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه انجام شد. سپس، برای تعیین تأثیر تغییرات پارامترها بر نتایج، تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شد و مشخص شد که مقادیر کارایی کشورهای ناکارا نسبت به تغییرات مقدار محدودیت حساس بوده در صورتی که کشورهای کارا از این تغییر متأثر نمی‌شوند. همچنین مقادیر تخصیص‌یافته به کشورهای ناکارا با تغییر مقدار محدودیت تغییر پیدا کرده در صورتی که این تغییر بر مقدار تخصیص کشورهای کارا اثر نمی‌گذارد. برای تحقیقات آتی ارائه مدلی که بتواند داده‌های تصادفی را لحاظ کند، همچنین ارائه مدل تخصیص با توجه به دیگر سیاست‌های بازار و مقایسه نتایج پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- Adeoti, O., & Osho, S. O. (2012). Opportunities to reduce greenhouse gas emissions from households in Nigeria. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 17(2), 133-152.
- Ahman, M., Burtraw, D., Kruger, J., & Zetterberg, L. (2007). A ten-year rule to guide the allocation of EU emission allowances. *Energy policy*, 35(3), 1718-1730.
- Amirteimoori, A., & Kordrostami, S. (2005). Allocating fixed costs and target setting: A DEA-based approach. *Applied mathematics and computation*, 171(1), 136-151.
- Amirteimoori, A., & Tabar, M. M. (2010). Resource allocation and target setting in data envelopment analysis. *Expert systems with applications*, 37(4), 3036-3039.
- An, Q., Wen, Y., Xiong, B., Yang, M., & Chen, X. (2017). Allocation of carbon dioxide emission permits with the minimum cost for Chinese provinces in big data environment. *Journal of cleaner production*, 142, 886-893.
- Andersen, J. L., & Bogetoft, P. (2007). Gains from quota trade: theoretical models and an application to the Danish fishery. *European review of agricultural economics*, 34(1), 105-127.
- Annicchiarico, B., & Di Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model. *Journal of environmental economics and management*, 69, 1-21.
- Asgari, A., Klosterman, R., & Razani, A. (2007). Sustainable urban growth management using What-if?.. *International journal of environmental research*, 1(3), 218-230.
- Azapagic, A., Perdan, S., & Clift, R. (Eds.). (2004). *Sustainable development in practice: case studies for engineers and scientists*. John Wiley & Sons.
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092.
- Betsill, M., & Hoffmann, M. J. (2011). The contours of "cap and trade": the evolution of emissions trading systems for greenhouse gases. *Review of policy research*, 28(1), 83-106.
- Brundtland, G. (1987). *Our common future: The world commission on environment and development*. Oxford University Press, Oxford.
- Bruvoll, A., & Larsen, B. M. (2004). Greenhouse gas emissions in Norway: do carbon taxes work?. *Energy policy*, 32(4), 493-505.
- Burtraw, D., Linn, J., Palmer, K., & Paul, A. (2014). The costs and consequences of clean air act regulation of CO2 from power plants. *American economic review*, 104(5), 557-62.



- Chang, S. M., Wang, J. S., Yu, M. M., Shang, K. C., Lin, S. H., & Hsiao, B. (2015). An application of centralized data envelopment analysis in resource allocation in container terminal operations. *Maritime policy & management*, 42(8), 776-788.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- Cho, H. H., Lai, C. F., Shih, T. K., & Chao, H. C. (2016). Learning-based data envelopment analysis for external cloud resource allocation. *Mobile networks and applications*, 21(5), 846-855.
- Cooper, R. N. (2007). Alternatives to Kyoto: the case for a carbon tax. *Architectures for agreement: addressing global climate change in the post-Kyoto World*, 105-115.
- de Rome, C., & Meadows, D. H. (1972). *The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.
- Du, S., Hu, L., & Song, M. (2016). Production optimization considering environmental performance and preference in the cap-and-trade system. *Journal of cleaner production*, 112, 1600-1607.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of twenty-first century business*. Capstone, Oxford.
- Fang, L. (2015). Centralized resource allocation based on efficiency analysis for step-by-step improvement paths. *Omega*, 51, 24-28.
- Fischer, C., & Fox, A. (2004). Output-based allocations of emissions permits. *Resources for the future discussion paper*, 4, 37.
- Fischer, C., & Springborn, M. (2011). Emissions targets and the real business cycle: intensity targets versus caps or taxes. *Journal of environmental economics and management*, 62(3), 352-366.
- Goulder, L. H., Parry, I. W., Williams Iii, R. C., & Burtraw, D. (1999). The cost-effectiveness of alternative instruments for environmental protection in a second-best setting. *Journal of public economics*, 72(3), 329-360.
- Gupta, A. K., & Gupta, N. (2020). Effect of corporate environmental sustainability on dimensions of firm performance—Towards sustainable development: Evidence from India. *Journal of cleaner production*, 253, 119948.
- Höhne, N., Fekete, H., den Elzen, M. G., Hof, A. F., & Kuramochi, T. (2018). Assessing the ambition of post-2020 climate targets: a comprehensive framework. *Climate policy*, 18(4), 425-441.
- Jin, M., Granda-Marulanda, N. A., & Down, I. (2014). The impact of carbon policies on supply chain design and logistics of a major retailer. *Journal of cleaner production*, 85, 453-461.
- Johansson, B. (2006). Climate policy instruments and industry—effects and potential responses in the Swedish context. *Energy policy*, 34(15), 2344-2360.
- Kung, C. C., Zhang, L., & Chang, M. S. (2017). Promotion policies for renewable energy and their effects in Taiwan. *Journal of cleaner production*, 142, 965-975.
- Li, F., Schwarz, L., & Haasis, H. D. (2016). A framework and risk analysis for supply chain emission trading. *Logistics research*, 9(1), 10.
- Lo, Y. T. E. (2018). *Detection of the temperature responses to stratospheric sulphate aerosol geoengineering* (Doctoral dissertation, University of Reading). Retrieved from <http://centaur.reading.ac.uk/>
- Lotfi, F. H., Hatami-Marbini, A., Agrell, P. J., Aghayi, N., & Gholami, K. (2013). Allocating fixed resources and setting targets using a common-weights DEA approach. *Computers & industrial engineering*, 64(2), 631-640.
- Lozano, S., Villa, G., & Brännlund, R. (2009). Centralised reallocation of emission permits using DEA. *European journal of operational research*, 193(3), 752-760.
- Malekmohammadi, N., Lotfi, F. H., & Jaafar, A. B. (2009). Centralized resource allocation in DEA with interval data: an application to commercial banks in Malaysia. *International journal of mathematical analysis*, 3(13-16), 757-764.
- Mathews, J. A. (2017). Global trade and promotion of cleantech industry: a post-Paris agenda. *Climate policy*, 17(1), 102-110.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. (1992). *Beyond the limits: Confronting global collapse, envisioning a sustainable future*. Post Mills, Vt.: Chelsea Green Pub. Co.,.
- Mishra, M., Hota, S. K., Ghosh, S. K., & Sarkar, B. (2020). Controlling waste and carbon emission for a sustainable closed-loop supply chain management under a cap-and-trade strategy. *Mathematics*, 8(4), 466.
- Momeni, E., Lotfi, F. H., Saen, R. F., & Najafi, E. (2019). Centralized DEA-based reallocation of emission permits under cap and trade regulation. *Journal of cleaner production*, 234, 306-314.
- Nemati, M., & Matin, R. K. (2019). A data envelopment analysis approach for resource allocation with undesirable outputs: an application to home appliance production companies. *Sādhanā*, 44(1), 11.
- Paehlke, R. (1999). Towards defining, measuring and achieving sustainability: tools and strategies for environmental valuation'. In E. Becker and T. Jahn (Eds), *Sustainability and the social sciences*
- Parker, C. F., & Karlsson, C. (2010). Climate change and the European Union's leadership moment: an inconvenient truth?. *JCMS: Journal of common market studies*, 48(4), 923-943.
- Perdan, S., & Azapagic, A. (2011). Carbon trading: current schemes and future developments. *Energy policy*, 39(10), 6040-6054.
- Pielke Jr, R. A. (1998). Rethinking the role of adaptation in climate policy. *Global environmental change*, 8(2), 159-170.
- Redclift, M. (2005). Sustainable development (1987–2005): an oxymoron comes of age. *Sustainable development*, 13(4), 212-227.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Nykvist, B. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).
- Sacchi, S., Riva, P., Brambilla, M., & Grasso, M. (2014). Moral reasoning and climate change mitigation: The deontological reaction toward the market-based approach. *Journal of environmental psychology*, 38, 252-261.
- Seeberg-Elverfeldt, C., Schwarze, S., & Zeller, M. (2009). Payments for environmental services—Carbon finance options for smallholders' agroforestry in Indonesia. *International journal of the commons*, 3(1).
- Sengupta, E., Blessinger, P., & Yamin, T. S. (2020). Introduction to teaching and learning strategies for sustainable development. In *Teaching and learning strategies for sustainable development*. Emerald Publishing Limited.
- Siebenhüner, B. (2003). The changing role of nation states in international environmental assessments—the case of the IPCC. *Global environmental change*, 13(2), 113-123.
- Sivanandam, S. N., Sumathi, S., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB* (Vol. 1). Berlin: Springer.



- Spangenberg, J. H. (2013). Pick simply the best: Sustainable development is about radical analysis and selective synthesis, not about old wine in new bottles. *Sustainable development*, 21(2), 101-111.
- Sterner, T., & Muller, A. (2008). Output and abatement effects of allocation readjustment in permit trade. *Climatic change*, 86(1-2), 33-49.
- Strategic Imperatives, U.N. (1987). Report of the world commission on environment and development: our common future. Retrieved from April 29, 2018 from <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- Tanner, C., & Wölfling Kast, S. (2003). Promoting sustainable consumption: determinants of green purchases by Swiss consumers. *Psychology & marketing*, 20(10), 883-902.
- Wang, J., & Wu, L. (2016). The impact of emotions on the intention of sustainable consumption choices: Evidence from a big city in an emerging country. *Journal of cleaner production*, 126, 325-336.
- Whitmarsh, L., Seyfang, G., & O'Neill, S. (2011). Public engagement with carbon and climate change: To what extent is the public 'carbon capable'?. *Global environmental change*, 21(1), 56-65.
- Wu, H., Du, S., Liang, L., & Zhou, Y. (2013). A DEA-based approach for fair reduction and reallocation of emission permits. *Mathematical and computer modelling*, 58(5-6), 1095-1101.
- Wu, J., Zhu, Q., Chu, J., An, Q., & Liang, L. (2016). A DEA-based approach for allocation of emission reduction tasks. *International journal of production research*, 54(18), 5618-5633.
- Xun, B., Wen, F., & Tong, S. (2011). Electricity market equilibrium of thermal and wind generating plants in emission trading environment. *International journal of energy sector management* 5(3): 416-435. <https://doi.org/10.1108/17506221111169908>
- Zadeh, L. A. (1965). Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3), 338-353.
- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European journal of operational research*, 189(1), 1-18.
- Zuo, J., & Zhao, Z. Y. (2014). Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 30, 271-281.