Defense Economics & Sustainable Development

Journal homepage: https://eghtesad.sndu.ac.ir/

The effect of process development Carbon Dioxide absorption and accumulation on the Demand for energy carriers and Economic Growth in Iran (using with CGE method)

Delaram Mehrpoor Shijani[1]*, Hossein Sadeghi Saghdel[2], Abbas Assari Arani[3]

1. M.A, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Corresponding Author. Email: delarammehrpour@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: sadeghih@modares.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: assari_a@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 17-02-2024
Accepted: 17-03-2024

Keywords:
Carbon Dioxide Capture and Storage, Demand of Energy Carriers, Economic Growth, General Equilibrium Model.

Abstract

Consumption of fossil fuels produces greenhouse gases. Carbon dioxide is one of these greenhouse gases. Today, greenhouse effects have become a global concern. Therefore, countries use different tools to achieve a low-carbon economy. The method of absorbing and accumulating carbon dioxide is considered as a technical method to reduce the emission of carbon dioxide gas. This method is the only method that helps countries to achieve zero carbon economy in the long term. For this reason, the method of absorbing and accumulating carbon dioxide is considered a unique method. In addition to the Computable General Equilibrium(CGE) model, the upcoming study uses the national data-output table of 2013 from Statistical Center of Iran. agricultural and animal husbandry, transportation and cement have been considered as selected sectors. energy carrior demand has been investigated in selected sectors.

The results of this study show that the absorption and accumulation of carbon dioxide can lead to an increase in GDP and demand of energy carriers.

Cite this article: Mehrpoor Shijani, Delaram., Sadeghi Saghdel, Hossein., & Assari Arani, Abbas. (2024). The effect of process development Carbon Dioxide absorption and accumulation on the Demand for energy carriers and Economic Growth in Iran (using with CGE method). *Journal of Defense Economics & Sustainable Development*, 8 (30), 147-174.

20.1001.1.25382454.1402.8.30.6.1

© The Author(s) 2024. Published by Defense Economics Scientific Association of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

اقتصاد دفاع و توسعه پایدار

شاپا چاپی: ۲۴۵۴-۲۵۳۸ شاپا الکترونیکی: ۰۶۱x-۲۹۸۱

اثر توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بر تقاضای حامل‌های انرژی و رشد اقتصادی در ایران با استفاده از روش تعادل عمومی محاسبه پذیر

دلارام مهرپور شیجانی[1*]، حسین صادقی سقدل[2]، عباس عصاری آرانی[3]

۱. کارشناسی ارشد، گروه توسعه و برنامه‌ریزی اقتصادی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. نویسنده مسئول، رایانامه: delarammehrpour@gmail.com

۲. دانشیار، گروه توسعه و برنامه‌ریزی اقتصادی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: sadeghih@modares.ac.ir

۳. دانشیار، گروه توسعه و برنامه‌ریزی اقتصادی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: assari_a@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی

تاریخچه مقاله:
تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۱۲/۲۷

واژگان کلیدی:
جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن، تقاضای حامل‌های انرژی، رشد اقتصادی، مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر.

چکیده

امروزه اثرات گلخانه‌ای ناشی از مصرف حامل‌های انرژی و خصوصاً انتشار دی‌اکسیدکربن باعث نگرانی اکثر جوامع توسعه یافته دنیا شده است. لذا کشورهای توسعه یافته جهت حرکت به سمت اقتصاد کم‌کربن به ابزارها و روش‌های متفاوتی متوسل گردیده‌اند. جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن رویکردی فناورانه جهت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به شمار می‌رود. این روش تنها رویکرد مؤثر و پایدار منحصر بفرد در دنیاست که کشورها را برای رسیدن به اقتصاد با سطح بهینه دی‌اکسیدکربن سوق می‌دهد. در این مطالعه از روش تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر و جدول داده – ستانده ملی سال ۱۳۹۰ مرکز آمار ایران استفاده شده‌است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بخش‌های کلیدی فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن در اقتصاد ایران؛ بخش‌های کشاورزی و دامپروری، حمل ونقل و سیمان می‌باشند، که این فرآیند با کاهش میزان کربن موجود در اقتصاد و رساندن آن به میزان بهینه، تأثیر بسزایی در افزایش تقاضا برای حامل‌های انرژی به ویژه در بخش حمل ونقل و سیمان به نسبت سایر بخش‌ها خواهد داشت. همچنین توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن منجر به افزایش بیشتری در تقاضای نفت گاز، گازوئیل، نفت کوره، زغال سنگ نسبت به سایر حامل‌های انرژی می‌شود. بنابراین توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن با کاهش مشکل آلایندگی حامل‌های انرژی موجب افزایش تقاضا برای آن‌ها شده و در نهایت سبب افزایش تولیدناخالص داخلی خواهد شد. لذا اجرا و توسعه این فرآیند می‌تواند رشد اقتصادی را برای ایران به ارمغان آورد.

استناد به مقاله: مهرپور، شیجانی، دلارام؛ صادقی سقدل، حسین و عصاری آرانی، عباس. (۱۴۰۲). اثر توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بر تقاضای حامل‌های انرژی و رشد اقتصادی در ایران با استفاده از روش تعادل عمومی محاسبه پذیر، *فصلنامه اقتصاددفاع و توسعه پایدار*، ۸(۳۰)، ۱۴۷-۱۷۴.

20.1001.1.25382454.1402.8.30.6.1

ناشر: انجمن علمی اقتصاد دفاع ایران

© نویسندگان

۱. مقدمه

همزمان با وقوع انقلاب صنعتی و رشد جمعیت، مصرف حامل‌های انرژی برای تأمین انرژی مورد نیاز بشر نیز افزایش یافت. سوزاندن سوخت‌های فسیلی، منجر به تولید و انتشار گازهای آلاینده، ذرات معلق و گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با توجه به روند رو به افزایش نیاز به انرژی و سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کنترل میزان گازهای متصاعد شده، به نگرانی جهانی بدل شده‌است که رفاه آیندگان را به خطر خواهد انداخت. کشورها نیز به دنبال رشد اقتصادی متوازن و توسعه پایدار[1]هستند، که این امر مستلزم برنامه‌ریزی برای کسب رشد اقتصادی بالا با حداقل آثار سوء محیط‌زیستی است (صادقی و سعادت، ۱۳۸۳).

کشورها در قالب معاهده‌های زیست‌محیطی بین‌المللی متعهد به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای(صفایی، ۱۳۹۱)[2] شده‌اند. گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش دمای کره‌ی زمین می‌شوند. بخش اعظم اثرگلخانه‌ای به دی‌اکسیدکربن اختصاص می‌یابد. جهت کاهش غلظت و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ابزار متفاوتی معرفی می‌شوند. شایان ذکر است هیچ ابزار سیاست‌گذاری منحصر به فردی وجود ندارد که برای کلیه شرایط، بهترین تلقی شود. استفاده و به‌کارگیری هر ابزاری به تعارضات بده بستان‌ها، اولویت کشور و سیاست‌گذاری ساختار اقتصادی اجتماعی و سایر مؤلفه‌ها بستگی دارد. به‌طورکلی ابزار اقتصادی و زیست‌محیطی را می‌توان به سه گروه ابزار غیرمتمرکز، ابزارهای مبتنی بر بازار و کنترل و فرمان، طبقه‌بندی کرد که در ادامه بدان اشاره شده‌است.

ابزار غیرمتمرکز شامل رویکردهایی از جمله قانون عرفی، وجه الضمان‌های عملکرد زیست‌محیطی[3]، مشوق‌های اخلاقی، حقوق مالکیت و قانون مسئولیت می‌باشند (دانشی، وفاخواه و پناهی، ۱۳۹۳؛ فریادی،۱۳۹۸؛ چراغی و چراغی کوتیانی ،۱۳۹۳). ابزار مبنی بر بازار برای کنترل آلودگی شامل عوارض انتشار (مالیات)، عوارض محصول، مالیات‌های تفاضلی، یارانه، سیستم ودیعه بازپرداخت و مجوزهای قابل مبادله می‌باشند. کالاهای زیست محیطی در زمره کالاهای عمومی قلمداد می‌شوند. غیرانحصاری بودن، عدم رقابت در مصرف، هزینه نهایی صفر و مشخص نبودن مالکیت کالاها و عدم تقسیم‌پذیری آنها باعث می‌شود این کالاها مورد سوء استفاده قرار گرفته و بهره‌برداری از آنها تشدید شود. در نهایت مداخله دولت به‌عنوان گزینه مناسب و نه بهترین گزینه جهت تلفیق منابع زیست‌محیطی و اهداف توسعه اقتصادی مطرح می‌شود. ابزار کنترل و فرمان، قانون و مقررات زیست‌محیطی اغلب کشورهای جهان محسوب می‌شوند. همانطور که مشخص است این

---

[1] sustainable development

توسعه پایدار آن است که حق انتخاب و ظرفیت دسترسی به رفاهی حداقل مانند رفاه نسل کنونی را برای نسل آینده حفظ کند. سولو واژه (پایدار) را مترادف با قدرت اقتصادی ایجاد تدائم بین نسلی در رشد درآمد ملی یا تولید ناخالص ملی میداند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی).

[2] Greenhouse gasses

گازهای گلخانه‌ای اصلی که دی اکسید کربن در این دسته قرار دارد اثر مستقیم در بروز پدیده گلخانه ای دارند در صورتی که گازهای گلخانه ای فرعی در واکنش های تولید گاز های گلخانه ای اصلی شرکت دارند.

[3] ضمانت اجرایی قوانین و مقررات زیست محیطی

رویکرد شامل نوعی نظارت است که بر اساس آن آلوده‌کنندگان نباید از حد مشخص انتشار آلاینده تجاوز کنند (پور اصغر، ۱۳۸۹؛ فای[1]،۲۰۱۲).

به گزارش آژانس بین‌المللی انرژی[2] (۲۰۰۹) جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن[3] به‌عنوان یک گزینه مهم در مجموعه اقدامات کاهشی برای تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای[4] اتمسفر در نظر گرفته می‌شود. سایر گزینه‌های کاهش، شامل بهبود بهره‌وری انرژی، انرژی هسته‌ای، منابع انرژی تجدیدپذیر، افزایش جذب بیولوژیکی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای غیر از دی‌اکسیدکربن است. بر اساس گزارش هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوا[5](۲۰۱۴) و آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۱۱) تاکنون جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن تنها فناوری انتشار پایین و یا بهینه دی‌اکسیدکربن معرفی شده‌است. این فرآیند بر خلاف ابزارهای فوق، یک محدودیت نیست بلکه روش فنی و عملی جذب‌کننده گاز دی‌اکسیدکربن است. براساس این گزارش از سال ۲۰۲۰ بکارگیری روش‌های جذب کربن از سایر روش‌های کاهش دی‌اکسیدکربن پیشی خواهد گرفت. با توجه به آنکه پیش از انقلاب صنعتی و در قرن نوزدهم میلادی، میانگین دی‌اکسیدکربن در سطح جهانی در حدود ۲۸۰ پی پی ام[6] بوده است و سطح این گاز امروزه به میزانی بالاتر از۴۰۰ پی‌پی‌ام رسیده‌است (سازمان ملی اقیانوسی و جوی[7]، ۲۰۱۳)؛ اگر این روند همچنان ادامه یابد، بازگشت به سطح غلظت دی‌اکسیدکربن، پیش از صنعتی شدن، ممکن نخواهد بود.

لذا توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن می‌تواند از ادامه این روند به‌صورت مؤثر جلوگیری نماید بنابراین، این روش از منظر بین‌المللی بسیار حائز اهمیت است. در حالت کلی فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن یا به صورت طبیعی و یا با احداث واحدهای جذب ممکن خواهد بود (خداداد لشگری و فرد مرادی‌نیا، ۱۳۹۶؛ رائو و همکاران[8]، ۲۰۱۵). فناوری جذب دی‌اکسیدکربن را می‌توان به سه دسته‌ی پسااحتراق[9]، احتراق‌اکسیژنی[10] و پیش‌احتراق[11]تقسیم کرد (مارتو[12]، ۲۰۱۰). هرچند با توجه به هزینه کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتر، روش پسااحتراق در میان سه روش دیگر کاربرد بیشتری دارد (رائو و دیگران، ۲۰۱۵).

---

[1] Fay
[2] International energy agency (IEA)
[3] Carbondioxide capture and storage
[4] Grddnhoudse gasses
گازهای گلخانه‌ای شامل دی اکسیدکربن(CO_2)، متان (CH_4)، اکسید نیتروز (O_2N)، هیدروفلئوروکربن (HFC_c) و سولفور هگزا فلوراید (SF_6) هستند. از بین گازهای مذکور، دی‌اکسیدکربن به تنهایی با دارا بودن نقش ۵۰ تا ۶۰ درصدی در اثر گلخانه‌ای به‌عنوان مهمترین گاز گلخانه‌ای و اولین عامل در تغییر اقلیم شناخته می‌شود.
[5] Intergovernmental Panelon Climate Change (IPCC)
[6] parts per million (ppm for short)
[7] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
[8] Rao et al
[9] Post-combustion capture
[10] Oxy-fuel combustion
[11] Pre-combustion capture
[12] Maroto

فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن صرف‌نظر از روش مورد استفاده، خود شامل سه مرحله جذب، انباشت، مصرف و ذخیره‌سازی این گاز می‌باشد. در این فرآیند، گاز دی‌اکسیدکربن بر اساس نوع روش (پیش احتراق، احتراق اکسیژنی و پسا احتراق) پیش و یا پس از فرآیند سوزاندن سوخت فسیلی در محل نشر محصور شده، خالص‌سازی شده و سپس برای ذخیره‌سازی در مخازن مخصوص و یا مصرف، آماده می‌گردد. فرآیند جذب صنعتی پسا احتراقی، شامل روش‌هایی مانند استفاده از حلال‌ها، روش غشایی، برودتی و... جهت جذب گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده از سوزاندن سوخت‌های فسیلی است (رائو و دیگران، ۲۰۱۵). جذب طبیعی نیز جذب دی‌اکسیدکربن در طبیعت و بدون دخالت انسان است که منجر به چرخه‌های طبیعی می‌شود. هرچند با افزایش فضای سبز انسان نیز در این روش دخیل خواهد بود. دی‌اکسیدکربن اغلب پس از جذب به مصارف صنعتی رسیده و یا دفن می‌شود. به‌عبارت‌کلی سه گزینه برای ذخیره ژئولوژیک دی‌اکسیدکربن وجود دارد: ساختارهای نمکی عمیق، مخازن نفت و گاز و معادن غیرقابل استخراج ذغال سنگ در این سه دسته جای دارد (هوشمند، ۱۳۹۸).

علاوه‌بر آن ذخیره‌سازی در مخازن خاص در کف اقیانوس‌ها و دریاها و نیز در رگه‌های معادن ذغال سنگ، گزینه‌های دیگر پیش‌رو می‌باشند (شهباز، تیواری و نصیر[1]، ۲۰۱۳؛ هرتزوگ و گلومب[2]، ۲۰۰۴). در روش مصارف صنعتی می‌توان به استفاده‌ی دی‌اکسیدکربن در صنایع غذایی،کپسول آتش نشانی، تولید لاستیک و... اشاره کرد. با توجه به موارد فوق و با توجه به جایگاه ایران در فهرست ده کشور اول منتشرکننده‌ی دی‌اکسیدکربن به‌کارگیری روش جذب و انباشت دی‌اکسید کربن که از جمله روش‌های رسیدن به اقتصاد کم کربن است، لازم‌الاجرا به‌نظر می‌رسد (تراز نامه انرژی، ۱۳۹۵). لذا در مطالعه پیش‌رو پس از بررسی روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن در بخش مبانی نظری، در بخش پیشینه به مطالعات مشابه در این زمینه اشاره شده است. در بخش روش، کلیاتی در مورد روش تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر و مدل مورد بررسی و تغییرات اعمال شده ارائه شده است. بخش آخر نیز شامل جداولی حاوی خروجی مدل در نرم‌افزار گمز و نتایج بدست آمده، تحلیل و پیشنهاداتی در این زمینه است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱. مبانی نظری پژوهش

امروزه مسائل زیست‌محیطی در کشورهای توسعه یافته و در حال‌توسعه مورد توجه قرار گرفته است و در اهداف توسعه پایدار و توسعه همه‌جانبه کشورها اهمیت بسزایی دارد. توسعه پایدار به گزارش کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه[3](۱۹۸۷)، به معنای نوعی توسعه است که نیازهای نسل حاضر را بدون لطمه زدن به توانایی نسل‌های آتی در تأمین نیازهای خود برآورده نماید. بر این اساس برای رسیدن به توسعه پایدار لازم است که عدالت بین نسلی رعایت گردد و از وارد شدن خسارت جبران‌ناپذیر بر منابع نسل‌های آینده ممانعت

[1] Shahbaz,Tiwari & Nsir
[2] Herzog & Golomb
[3] World Commission on Environment and Development

نماید (کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه ،۱۹۸۷:۴۳). توسعه پایدار از بعد زیست‌محیطی برقراری تعادل بین توسعه اقتصادی و نیازهای زیست‌محیطی بوده و هدف دولت‌ها در کشورهای توسعه یافته تأمین و تداوم رشد اقتصادی و کاهش ناسازگاری اهداف اقتصادی با مسائل زیست‌محیطی و آلودگی هوا می‌باشد. همچنین با توجه به محدودیت دسترسی به حامل‌های انرژی خصوصاً منابع طبیعی تجدیدناپذیر و آلایندگی زیست‌محیطی که فراتر از قدرت جذب طبیعی محیط‌زیست است، امکان تداوم رشد اقتصادی در کشورهای دنیا را با مشکلات جدی روبرو خواهد کرد (جمعه‌پور، ۱۳۸۲:۱۰۹).

با توجه به نظریه پناهگاه آلودگی ممکن است کشورهای در حال توسعه به دلیل داشتن قوانین زیست محیطی آسان نسبت به کشورهای توسعه‌یافته برای جذب صنایع آلاینده مزیت نسبی داشته باشند. لذا کشورهای توسعه‌یافته صنایع آلاینده فعال خود را به کشورهای درحال‌توسعه انتقال می‌دهند. بدین‌ترتیب کشورهای درحال‌توسعه به پناهگاهی برای جذب صنایع آلاینده تبدیل شده و موجب افزایش آلایندگی زیست‌محیطی در این کشورها می‌گردد (کوپلند و تیلور[1]، ۲۰۰۵). بنابراین وجود قوانین مالی ضامن قطعی، جهت محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای نیستند.

یکی از مباحث مهمی که در اقتصاد محیط‌زیست مطرح می‌باشد آثار جانبی یا خارجی (حیدری؛ عبدی و علیمرادی، ۱۳۹۸)[2] است. هزینه اجتماعی بیان‌کننده بار مستقیم و غیرمستقیمی است که توسط فعالیت‌های اقتصادی به مردم تحمیل می‌شود. آثار جانبی با نام‌های دیگری از قبیل آثار انتشار، آثار فرعی صرفه و عدم صرفه بیرونی و هزینه‌های معطوف به غیر نیز مطرح می‌شود (پور اصغر، ۱۳۸۹). اگر بتوان با بهره‌گیری از ابزارهای سیاست‌گذاری، این زیان‌ها را قیمت‌گذاری کرده و یا زیان وارد به دیگران را جبران نماییم، زمینه دورنی‌سازی آثار بیرونی را فراهم نموده‌ایم (دیکسون و دیگران[3]، ۲۰۱۳).

بنابراین به‌کارگیری روشی برای جبران این آلایندگی‌ها خصوصاً در کشورهای مذکور، امری ضروری است. به‌کارگیری فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن با توجه به آنکه نیاز به واحدهای جذب دارد و کلیه کشورها موظف به ایجاد آن در مرز جغرافیایی خود هستند، از عواملی مانند مورد مشابه فوق، رانت و فرارمالیاتی و...، جلوگیری می‌کند. به‌عبارت‌دیگر به‌کارگیری واحدهای جذب در صنایع، امری ضروری به‌شمار رفته که چه برای صنایع ملی و چه صنایع ایجاد شده توسط سایر کشورها ضروری است. بنابراین در حالت کلی از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن جلوگیری می‌شود. فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن یک فناوری کاهش کربن محسوب می‌شود. این فرآیند تکنولوژیک، ظرفیت این را دارد که ۹۰ درصد دی‌اکسیدکربن منتشر شده حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی به‌منظور تولید برق و فرآیندهای صنعتی را جذب و از انتشار آن به اتمسفر جلوگیری کند (ماروتو، ۲۰۱۰).

---

[1] Copeland & Taylor

[2] در مواردی تولید یا مصرف یک کالا تنها بر مصرف کننده و تولیدکننده اثر نگذاشته، بلکه بر دیگران نیز موثر است؛ اما آنتاثیر در قالب نظام قیمت‌ها قابل ارزیابی نیست و در چارچوب بازار سنجیده نمی شود، به این پدیده آثار خارجی یا پیامد جانبی می‌گویند.

[3] Dixon et al

با توجه به اثر محیطزیست بر رشد اقتصادی انتظار می‌رود ایجاد واحدهای جذب نه‌تنها اثر مستقیم و غیرمستقیم بر محیطزیست منطقه‌ای داشته بلکه با کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن و سرریز دانش در زمینه‌های فنی، اثرات فراگیر آن، در میان‌مدت و بلندمدت آشکار گردد. به‌عبارتی جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن در فعالیت‌های صنعتی، اقتصاد با سطح بهینه دی‌اکسیدکربن، رشد اقتصادی و حفاظت از مشاغل، نقش کلیدی ایفا می‌نماید (پلتفرم انتشار صفر[1]، ۲۰۱۷؛ جعفری صمیمی و احمدپور، ۱۳۹۰؛ سلمانی و دیگران، ۱۳۹۷).

منابع مختلف دی‌اکسیدکربن بر اساس نتایج یک پژوهش در سال ۲۰۱۱ لیتوسفر، هیدوسفر و اتمسفر معرفی شده‌اند. منابع زیستی زمین بیش از ۲۰۰۰ گیگا تن کربن و منابع سوخت فسیلی در زمین (ذغال سنگ، نفت خام و گاز) در مجموع ۴۱۳۰ گیگاتن کربن را در خود ذخیره کرده‌اند. بیشترین میزان ذخیره کربن با ۶۰ میلیون گیگا تن در سنگ‌های رسوبی کربناته است. کف دریاها و اقیانوس‌ها نیز بیش از ۳۸۴۰۰ گیگا تن ترکیب‌های مختلف کربن را در خود ذخیره کرده‌اند. اما ذخیره ترکیب‌های مختلف کربن در جو ۷۲۰ گیگاتن برآورد شده‌است (امیری و ضرغام، ۱۳۹۳: ۱۶۸).

جذب دی‌اکسیدکربن در ساختارهای زمین‌شناسی و گیاهان، شامل جذب زیستی دی‌اکسید کربن می‌شود. در مقابل، جذب به هر روشی که با دخالت انسان صورت گیرد را جذب غیرطبیعی یا جذب صنعتی می‌نامیم. جذب صنعتی به سه روش قابل اجرا است که شامل موارد زیر می‌گردد:

۱) جداسازی پسا احتراق[2]

این روش جداسازی شامل حذف دی‌اکسیدکربن از جریان گازی دودکش حاصل از احتراق می‌باشد. این روش بیشترین پتانسیل زودبازده برای کاهش آلودگی گازهای گلخانه‌ای است (ژانگ[3] ،۲۰۰۶).

۲) جداسازی پیش احتراق[4]

در این روش کربن‌دی‌اکسید پیش از احتراق از سوخت گرفته می‌شود. بدین‌صورت که با ترکیب کردن سوخت با اکسیژن یا بخار آب در دمای بالا، هیدروژن و مونواکسیدکربن تولید می‌شود که در اثر واکنش در راکتور تبدیل، دی‌اکسیدکربن و هیدروژن باقی‌مانده بدست‌می‌آید (گانگوال و دیگران[5]، ۲۰۰۶).

۳) جداسازی اکسیژنی[6]

یک روش دیگر برای گرفتن کربن از دودکش، اصلاح فرآیندهای احتراق است، به‌طوریکه گاز دودکش، غلظت بالایی از دی‌اکسیدکربن را داشته باشد. در این روش سوخت با مخلوطی از اکسیژن نسبتاً خالص (بیش از۹۵ درصد) و گاز دودکش بازگردانده شده، سوخته می‌شود (شا و دیگران[7]،۲۰۰۶).

همچنین فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن متشکل از سه مرحله ذیل می‌باشد:

۱- جداسازی و خالص‌سازی دی‌اکسیدکربن از منابع اصلی تولیدکننده آن

---

[1] Zero Emissions Platform
[2] Post-combustion capture
[3] Zhang
[4] Pre-combustion capture
[5] Gangwal et al
[6] Oxy-fuel combustion
[7] Shah et al

۲- فشرده کردن و انتقال به مکان مناسب جهت ذخیره‌سازی

۳- نگه داشتن در مکان دائمی یا نیمه دائمی (انتقال به اعماق زمین یا رها کردن در اقیانوس‌ها) (مولوی، شجاعی و موسوی، ۱۳۹۷: ۱۷) و به‌عبارت‌کلی جذب، انتقال و ذخیره‌ی امن دی‌اکسیدکربن سه مرحله اصلی فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن است.

جهت ارائه نمونه‌هایی از دو مرحله آخر، می‌توان به تزریق دی‌اکسیدکربن به مخازن نفت و گاز (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۰۹)، تزریق به مخازن ذغال‌سنگ (قناعت‌پیشه، بهمنش و وحدانی، ۱۳۹۱)، ترزیق به اقیانوس‌ها (پازکی، قاسم‌زاده و هویدی، ۱۳۹۵: ۴۰)، ایجاد مخازن در اقیانوس‌ها برای ذخیره‌سازی (بیگم مختاری، زارع و کمالی‌فر، ۱۳۹۴: ۱۷)، ایجاد ترکیبات حاوی کربن (مولوی، شجاعی و موسوی، ۱۳۹۷: ۱۷)، تزریق به مخازن زمین‌شناسی (پازکی، قاسم‌زاده و هویدی، ۱۳۹۵:۴۰)، سفره‌های زیرزمینی (اژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۰۹) و صنایع غذایی و... اشاره کرد.

مرحله اول، مرحله جذب است که همان‌طور که اشاره شد بیشتر در زمینه جذب پسااحتراقی قابل‌اعمال است. براساس مجموعه مطالعات انجام شده و با استفاده از کتاب جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن نوشته‌ی رائو و همکاران (۲۰۱۵) در ادامه، به اختصار به برخی روش‌های مهم خواهیم پرداخت:

۱) استفاده از حلّال‌ها[1]: حلّال‌های شیمیایی و فیزیکی در اغلب موارد در نیروگاه‌ها و صنایع، جهت جذب، استفاده می‌شوند. در این روش حلّال‌ها از ترکیب گازی عبور داده می‌شوند. پس از جذب دی‌اکسیدکربن، حلّال‌ها در درجه‌ی معین دما بازیابی می‌شوند. اغلب مشکل خورندگی، انرژی‌بر بودن و موارد مشابه در این مسیر، محدودیت ایجاد می‌کند. حلّال‌های فیزیکی و شیمیایی هرکدام انواع مختلفی تقسیم می‌شوند و حلّال شیمیایی اغلب بر پایه‌ی آمین هستند.

۲) روش غشایی[2]: در این روش جداسازی بر اساس اندازه‌ی اتم ترکیبات گازی عبور داده شده از غشا است. استفاده از این روش در تهیه و نگهداری غشا هزینه‌بر است. در این روش معمولاً یک حلّال جهت جداسازی گاز از غشا نیز حضور دارد.

۳) جذب سطحی[3]: این روش امروزه، بیشتر از سایر روش‌ها، توجه را به خود جلب کرده است. اغلب مطالعات در این روش، بر افزایش تخلخل، جهت ظرفیت جذب بالاتر متمرکز می‌شوند. زئولیت‌ها، گرافن، ترکیبات نانو مانند نانولوله و نانوکره از این قبیل جاذب‌ها هستند. این جاذب‌ها اغلب بدون کاهش بهره‌وری بارها و بارها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴) روش برودتی[4]: دراین روش با ایجار فشار و سرما، گاز دی‌اکسیدکربن از سایر ترکیبات جدا می‌شود.

همانطور که اشاره شد جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن برخلاف سایر روش‌های کاهش دی‌اکسیدکربن، به صورت کاربردی و عملیاتی میزان دی‌اکسیدکربن موجود در جو را کاهش می‌دهد. همچنین به‌وسیله‌ی این

[1] solvent absorbent
[2] Membrane method
[3] Adsorption
[4] Cryogenic method

روش می‌توان این گاز را در محل تولید محصور کرد و از ورود آن به جو جلوگیری کرد. با توجه به اهمیت محیط‌زیست و اهمیت این روش در کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن به‌کارگیری این فرایند در کشورها خصوصاً کشورهایی مانند ایران اهمیت فزآینده‌ای می‌یابد.

چالش‌های روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن عبارتند از:

۱) چالش‌های فنی: امکان کاهش راندمان صنایع (شوماکر و سندس[1]، ۲۰۰۶).

۲) چالش‌های اقتصادی: هزینه فایده کردن طرح، جذب سرمایه، حمایت دولتی و خصوصی طرح (پرتوریوس و شوماکر[2]، ۲۰۰۹).

۳) چالش‌های اجتماعی: پذیرش اجتماعی (دنیلز و هیسکانن[3]، ۲۰۰۶؛ پرتوریوس و شوماکر ، ۲۰۰۹).

۴) چالش‌های زیست‌محیطی: خطر نشت گاز از مخازن (خاراکا و دیگران[4]، ۲۰۰۶).

بنابراین جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن از مسائل مرتبط با اقتصاد محیط‌زیست، منابع و انرژی می‌باشد. این فرآیند نه‌تنها به کیفیت محیط‌زیست کمک کند بلکه بر نوع ترکیب منابع انرژی (تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) نیز اثر خواهد داشت. ارتباط جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن با بخش انرژی را می‌توان در اتکای سیستم انرژی جهانی به سوخت‌های فسیلی جست‌وجو کرد. کشورها در سراسر جهان با افزایش اهمیت روش‌های حفاظت از محیط‌زیست به‌دنبال جایگزینی برای سوخت‌های آلاینده هستند. با رفع مشکل آلایندگی، انتظار می‌رود میزان تقاضا برای این سوخت‌ها افزایش یابد که این امر شمشیر دولبه‌ای در به‌کارگیری فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن تلقی می‌گردد. ازطرف‌دیگر این فرآیند با کاهش غلظت موجود دی‌اکسیدکربن در جو و نیز محصور کردن این گاز در محل انتشار، منجر به بهبود کیفیت محیط‌زیست می‌شود (بستا و دیگران[5]،۲۰۱۱).

۲-۲. پیشینهٔ پژوهش

۲-۲-۱. مطالعات داخلی

عباس‌زاده کرمجوان (۱۳۹۹) با طراحی یک الگوی تعادل عمومی قابل‌محاسبه و با استفاده از آخرین ماتریس حسابداری اجتماعی که مربوط به سال ۱۳۹۰ می‌باشد، در قالب چهار سناریو پیامدهای احتمالی وضع مالیات کربن بر تولیدناخالص‌داخلی ایران به‌عنوان مهمترین شاخص اقتصادی، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به‌عنوان شاخصی برای سطح گازهای گلخانه‌ای و همچنین سطح فعالیت صنایع انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که وضع مالیات بر کربن در تمامی سناریوها، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و کاهش تولیدناخالص‌داخلی را به همراه دارد؛ به‌نحوی که در سناریوی آخر که با بالاترین میزان مالیات کربن همراه است، در ازای کاهش فقط ۰/۵۴ درصدی در تولید ناخالص‌داخلی، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن ۱۰/۷ درصد کاهش می یابد.

---

[1] Schumacher & sands
[2] Praetorius & Schumacher
[3] Daniels & heiskanen
[4] Kharaka et al
[5] Besta et al

طاهری (۱۳۹۸) یکی از راه‌های کاهش انتشار آلاینده‌های هوا و هزینه تخریب آنها، افزایش قیمت حامل‌های انرژی می‌داند. او به‌وسیله مدل تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر و ماتریس حسابداری اجتماعی سال ۱۳۸۵ به بررسی این سیاست می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال این سناریو، مصرف حامل‌های انرژی، سطح تولید، تقاضای داخلی، اشتغال، صادرات کاهش ولی قیمت فعالیت برای فعالیت‌های کشاورزی و میزان واردات این محصولات افزایش خواهد یافت. از طرف‌دیگر میزان انتشار آلاینده‌های هوا کمتر شده و هزینه تخریب در فعالیت‌های سایر کشاورزی و زراعت و باغداری به ترتیب ۲۵۱. ۹ و ۷۴۸ میلیارد ریال (به قیمت ثابت سال ۱۳۸۱) کاهش می‌یابد. در مجموع هزینه تخریب در بخش کشاورزی حدود هزار میلیارد ریال کاهش می‌یابد و از ۵ درصد به حدود ۳. ۲ درصد ارزش افزوده این بخش می‌رسد.

مهدوی عادلی و قنبری (۱۳۹۲)، این مقاله به بررسی و مطالعه رابطه بین مصرف انرژی، تولیدناخالص داخلی و انتشار دی‌اکسیدکربن در ایران پرداخته و جهت علیت بین این متغیرها در کوتاه‌مدت و بلندمدت مشخص شده‌است. برای‌این‌منظور و بر اساس مفروضات فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس, مدل تصریح و با استفاده از الگوی اقتصادسنجی تصحیح خطا، برآورد شده‌است. نتایج آزمون همجمعی نشان می‌دهد که حداقل یک رابطه همجمعی میان انتشار دی‌اکسیدکربن، تولیدناخالص‌داخلی و مصرف انرژی وجود دارد که با آزمون رابطه علیت بین آنها مشخص گردید در کوتاه‌مدت یک رابطه علیت دو طرفه بین انتشار دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی و یک رابطه دیگری از تولیدناخالص‌داخلی به انتشار دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی و در بلندمدت دو رابطه علیت یک طرفه یکی از انتشار دی‌اکسیدکربن به تولیدناخالص‌داخلی و دیگری از مصرف انرژی به تولید ناخالص‌داخلی برقرار می‌باشد. همچنین بررسی توابع عکس‌العمل آنی نشان می‌دهد بروز یک شوک بر تولیدناخالص‌داخلی، انتشار دی‌اکسیدکربن را تا سه سال افزایش داده و پس از آن به‌تدریج تأثیر آن کاهش یافته و تا اینکه در سال ششم به سطح بهینه دی‌اکسیدکربن برسد.

۲-۲-۲. مطالعات خارجی

کمرون، کارتر و سیورت [1] (۲۰۲۳) به مطالعه هزینه‌های اجرای پروژه‌های جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن در کشور کانادا پرداختند. آنها در مطالعه خود به روند کند کاهش هزینه‌های به‌کارگیری این روش علی‌رقم به‌کارگیری ۵۰ ساله آن در کانا می‌پردازند. آنها به اهمیت تداوم اقتصادی این فرآیند خصوصاً در دو بخش نفت و گاز اشاره می‌کنند که همچنان به یارانه‌های دولتی وابسته خواهد بود برخلاف انرژی‌های تجدیدپذیر که تنها در مراحل اولیه گذار، نیازمند حمایت هستند. همچنین به نقش بسزای این فرآیند در کربن‌زدایی خصوصاً در صنایعی مانند سیمان و فولاد اشاره دارند. بنابراین به افزایش حمایت های مالی عمومی جهت حمایت از این فرآیند اشاره می‌کنند.

[1] Cameron, Carter & Sievert

مکدوگال، آرنولد و مکنزی[1] (۲۰۲۳) با مدل‌سازی جریان نقدی روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن که شامل هزینه جذب CO2، هزینه حمل‌ونقل آن با استفاده از خط لوله پیشنهادی از فورت مک موری و هزینه ذخیره‌سازی CO2 است، به این نتیجه رسیدند که ذخیره‌سازی و جذب این گاز می‌تواند همگام با اهداف محیط‌زیستی باشد. نتایج جریان نقدی آنها نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در CCS توسط بخش شن و ماسه نفتی مقرون‌به‌صرفه است و می‌تواند بازده مثبت (خصوصی) تا ۲ دلار در هر بشکه را ایجاد کند. آنها همچنین می‌توانند به رقابتی شدن این بخش کمک کنند زیرا تقاضا برای نفت در جهانی که در حال گذار به جهان کم‌کربن کاهش می‌یابد و به‌طور بالقوه شدت انتشار، توسط این فرآیند تا ۴۰ درصد کاهش می یابد. از دید آنها پروژه‌ها از نظر مالی، تحت طیف وسیعی از هزینه‌ها و مشوق‌های بالقوه امکان‌پذیر هستند البته با فرض قیمت ثابت کربن که در سال ۲۰۳۰ به ۱۷۰ دلار در هر تن می‌رسد.

تاکیدا و آریمورا[2] (۲۰۲۱) به بررسی اثر اصلاح و بهینه‌سازی مالیات زیست‌محیطی در ژاپن با استفاده از روش تعادل‌عمومی محاسبه‌پذیر پرداختند. آنها از طریق ۴ سناریو کاهش مالیات بر درآمد، کاهش مالیات شرکت‌ها و کاهش مالیات بر مصرف و تخفیف یکجا به خانوار، اثر استفاده مالیات بر کربن را بررسی می‌کنند. این سناریوها به جز مورد آخر، که مالیات خالص کربن است، اصلاح یا بهینه‌سازی مالیات زیست‌محیطی هستند. نتیجه نشان می‌دهد سناریوهای اصلاحی اثر مثبت‌تری داشته و کاهش مالیات شرکت‌ها مطلوب‌ترین اثر را بر درآمد ملی و تولیدناخالص‌داخلی دارد.

هوآنگ و گو[3] (۲۰۲۰)، به اهمیت کاهش کربن‌دی‌اکسید در کشور چین اشاره می‌کنند. آنها جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن را ابزار مهم در رسیدن به این هدف می‌دانند. آنها در این مقاله سعی بر ترسیم مسیر توسعه جذب و انباشت کربن برای اهداف کاهش انتشار تا سال ۲۰۵۰ را بررسی می‌کنند. آنها از طریق برنامه‌نویسی مبتنی بر مدل‌سازی معادلات غیرخطی به سوالات مربوط پاسخ می‌دهند. از دید آنها زمان اوج سرمایه‌گذاری بر این روش با توجه به هزینه و فناوری‌های نوپا در این زمینه سال ۲۰۳۵ خواهد بود.

اوریان، نصیروف و اسپینوزا[4] (۲۰۲۰)، براساس یک مدل تعادل عمومی قابل‌محاسبه، سناریوهای مختلف انتشار دی‌اکسیدکربن را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از آن است که سناریو کار همیشگی[5]، که در آن تغییرات ساختاری در نظر گرفته نشده‌است، به‌میزان قابل‌توجهی تولید گازهای گلخانه‌ای را پیش‌بینی می‌کند. در مقابل، با توجه به تغییرات ساختاری در مدل تعادل‌عمومی محاسبه‌پذیر ما نشان می‌دهد شیلی به سمت مشارکت اعلام شده ملی[6] خود برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای پیش می‌رود.

تان، لیو و کوین[7] (۲۰۱۸) در مطالعه خود سه کانال اصلی تقاضا، رقابت و انرژی را عامل انتشاردی‌اکسید کربن معرفی می‌کنند. آنها که رویکرد، ترکیب مدل تعادل عمومی قابل‌محاسبه و تجزیه و تحلیل، برای تجزیه

[1] MacDougall, Arnold & McKenzie
[2] Takeda & Arimura
[3] Huang & Guo
[4] O'Ryan, Nasirov & Espinosa
[5] Business as Usual
[6] NDC
[7] Tan, Liu & Cui

انتشار کلی کربن را پیشنهاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که (الف) کانال رقابت، منبع اصلی انتشار کربن است، در حالی که کانال تقاضا، کوچکترین کانال است. (ب) نرخ انتشار کربن از طریق کانال انرژی به دلیل کاهش محدود قیمت انرژی، متوسط است. پیامدهای سیاسی این مطالعه نیز مورد بحث قرار گرفته است.

وی، ژیجی و هومژی (۲۰۱۵) با سناریوسازی و روش تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر به بررسی اثر ترکیبی دو روش جذب دی‌اکسیدکربن و تمام برقی کردن وسایل نقلیه پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه می‌رسند که جذب کربن همراه با این سیاست امنیت نفت چین را تضمین می‌کند و منجر به کاهش کربن‌دی‌اکسید و مصرف سوخت فسیلی می‌شود.

سفون و دیگران[1] (۲۰۱۳)، در مطالعه خود با استفاده از مدل تعادل عمومی محاسبه‌پذیر، اثر جذب دی–اکسیدکربن بر متغیرهای کلان در کشور تایلند را بررسی کردند. آنها ۱۷ بخش غیر انرژی و ۱۴ بخش انرژی را در نظر گرفته‌اند. در این زمینه از جدول داده–ستانده سال ۲۰۰۵، ترازنامه انرژی سال ۲۰۰۵ استفاده شده‌است. دراین مطالعه ۱۳ سناریو تعریف شده‌است. ۱۲ سناریو مربوط به کاهش گازهای گلخانه‌ای به دو سطح ۳۰ و ۵۰ درصدی کاهش گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ می‌باشند. یک سناریو بر این موضوع، استوار است که در طول دوره‌ی مطالعه، سیاستی در جهت کاهش گاز گلخانه‌ای اتخاذ نمی‌شود. نتایج حاکی از آن است که سیاست‌های تجارت آزاد بین‌المللی، از طریق کاهش عرضه و تقاضای انرژی انتشار گاز گلخانه‌ای کم می‌شود و هزینه‌های انتشار افزایش می‌یابد. در مقابل فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن منجر به کاهش دی‌اکسیدکربن شده ولی ممکن است بر روی کارایی انرژی و واحدهای انرژی‌های تجدیدپذیر اثر کاهشی داشته باشد. نتایج همچنین حاکی از آن است که استفاده از فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن نه‌تنها گاز گلخانه‌ای را کاهش بلکه تولیدناخالص‌داخلی را افزایش می‌دهد.

اکاگاوا و دیگران[2] (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ی خود از روش تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر استفاده می‌کنند. در این مطالعه، دو روش کاهش کربن‌دی‌اکسید که انرژی اتمی و جذب و انباشت کربن می‌باشند، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. دراین میان با توجه به مسأله‌ی امنیتی انرژی هسته‌ای، استفاده از روش دوم، مناسب‌تر معرفی می‌شود. با توجه به یافته‌های این تحقیق در صورت عدم استفاده از روش جذب و انرژی هسته‌ای، انرژی‌های تجدیدپذیر، جایگزین مناسبی برای این دو روش در کاهش گازهای گلخانه‌ای خواهد بود.

بوسیلو، ابولی و پیرفدریچی[3] (۲۰۱۲)، با استفاده از روش تعادل عمومی به بررسی اثرات تغییر اقلیم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش دما ۱.۹۲ درصدی بیش از دوران پیش از صنعتی شدن می‌تواند تولید ناخالص‌داخلی را تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۰.۵ درصد کاهش دهد. آنها جنوب غربی آسیا و شمال آفریقا و بخش کشاورزی، از طریق کاهش در بهره وری محصول، را دارای بالاترین درجه آسیب‌پذیری بین بخش‌ها معرفی کردند.

---

[1] Thepkhun et al
[2] Okagawa et al
[3] Bosello, Eboli & Federici

دای و دیگران[1] (۲۰۱۱)، به ارزیابی تعهد اقلیمی چین و طرح انرژی غیرفسیلی تا سال ۲۰۲۰ با استفاده از مدل هیبریدی تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر مورد بررسی قرار دادند. کشور چین متعهد شده است که از ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ انتشار دی‌اکسیدکربن در واحد تولیدناخالص‌داخلی خود را به میزان ۴۰-۴۵ درصد کاهش دهد. این مطالعه، روش‌هایی جهت کمک به چین برای دستیابی به این مهم را بررسی می‌کند. در این مسیر چهارسناریو مطرح می‌شوند. سناریوها مربوط به محدودیت‌های تولید کربن، انرژی‌های غیر فسیلی و مالیات بر کربن می‌باشند. دوسناریوی مذکور تا ۴۰ درصد و سایر محدودیت‌های انتشار کربن، مابقی هدف ۴۰-۴۵ درصدی را پوشش می‌دهند.

از آنجا که مطالعه‌ای که فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن را به‌وسیله روش ایستا تعادل عمومی محاسبه‌پذیر و اثر آن بر تولید ناخالص‌داخلی را بررسی کند به صورت انگشت شمار وجود دارد، به موارد مشابه اشاره شده است. سایر مطالعات در این زمینه به رابطه کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن از طریق روش غیر فنی، مانند مالیات سبز[2] (پورغفار دستجردی،۱۳۹۳)، بررسی فنی روش‌های جذب با اشاره به امکان‌پذیری آن روش خاص پرداخته‌اند و یا در سناریوسازی و روش اعمال آن و مدل استفاده شده و کشور مورد مطالعه، نحوه انتخاب بخش‌های منتخب اقتصاد و... با مطالعه پیش‌رو، متمایز هستند. مطالعه‌ای در تایلند توسط سفون و همکاران در ۲۰۱۳ صورت گرفته است. در مطالعه‌ی مذکور هدف اصلی، بررسی اثر سناریوهای کاهش گازهای گلخانه‌ای است و فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یکی از این روش‌ها معرفی شده‌است. در این مطالعه، هدف‌گذاری زمانی نیز صورت گرفته است. یک سناریو در این مطالعه عدم به‌کارگیری هر گونه سیاست برای کاهش دی‌اکسیدکربن است. درحالی که در مطالعه حاضر چنین سناریویی وجود ندارد و به‌کارگیری یا عدم به‌کارگیری فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بررسی نمی‌شود. بر خلاف مطالعات مشابه، در مطالعه‌ی حاضر به صورت تخصصی بر سناریوهای کاهش دی‌اکسیدکربن، تنها با استفاده از فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن تمرکز می‌شود. این روش با روش دیگری مقایسه نمی‌شود و هدف تنها کاهش دی‌اکسیدکربن است. شایان ذکر است تفاوت مطالعه پیش‌رو با مطالعات انجام شده بررسی اثر کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به‌وسیله روش فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بر تولید ناخالص داخلی است. بخش‌ها ، سناریوها و هدف اعمال شوک در این مطالعه با مطالعات مشابه متفاوت است.

جهت مقایسه مطالعات داخلی و خارجی مذکور در مطالعه پیش‌رو می‌توان به تمرکز مطالعات خارجی بر استفاده از فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن و به‌کارگیری روش مشابه مطالعه حاضر اشاره کرد که با توجه به آنچه اشاره شد در بخش‌های منتخب، کشور مورد مطالعه، مدل پایه و داده‌های موجود و نیز سناریوهای مورد بررسی و دلیل انتخاب سناریو با مطالعه پیش‌رو متفاوت است. مطالعات داخلی ازسوی‌دیگر بر روش کاهش دی‌اکسیدکربن و سایر روش‌های محدود کردن انتشار دی‌اکسیدکربن و اغلب به شکل فنی و یا ترویجی تمرکز دارند.

---

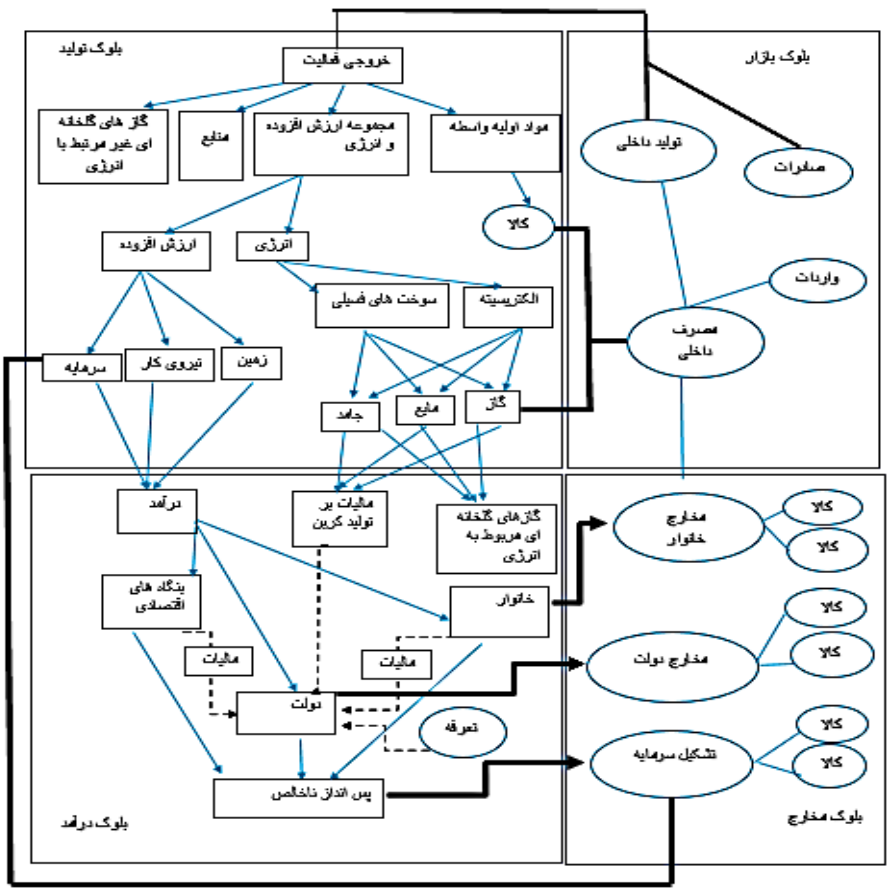
[1] Dai et al

[2] نوعی از ابزار سیاستی مالی است که می‌تواند فعالیت‌هایی را که به محیط زیست آسیب وارد سازد را محدود کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

یکی از روش‌های استفاده از مدل‌های تعادل عمومی محاسبه‌پذیر بررسی اثر شوک‌های بیرونی بر اقتصاد است. این شوک‌ها می‌توانند سیاست‌هایی باشند که تصمیم‌گیرندگان اقتصادی کشور درصدد اجرای آن هستند و یا شوک‌هایی که از اقتصاد جهانی بر اقتصاد کشور تحمیل می‌شوند. مدل تعادل عمومی مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی هم‌زمان است که شامل متغیرهای درونزا و برونزا می‌باشد (مهرگان و برخورداری، ۱۳۸۹).

مهم‌ترین نقطه قوت مدل‌های تعادل عمومی برخورداری از پایه اقتصادی کلان است. مدل‌های تعادل عمومی رفتار تمام کارگزاران اقتصادی را با به‌کارگیری اصول پذیرفته‌شده بهینه‌یابی تصریح می‌کنند. علاوه‌بر آن این مدل‌ها دارای انعطاف‌پذیری الگوریتم هستند و بوسیله‌ی آنها می‌توان اثرات رفاهی را نیز بررسی کرد (همان: ۳۲-۲۵).



نمودار شماره (۱) روش تعادل عمومی محاسبه پذیر

منبع: وی، ژیجی و هومژی[1] (۲۰۱۵)

این روش شامل چند مرحله می‌باشد :

۱- استفاده از تئوری اقتصادی و مدل‌های عددی جهت طراحی مکانیسم‌های کلیدی.

۲- آماده کردن داده‌های مورد نیاز، فرمول‌بندی، پیاده‌سازی مدل عددی و آماده کردن چارچوب برای تحلیل عددی.

۳- استفاده از روش کالیبراسیون برای تعیین ارزش متغیرهای مدل جهت شبیه‌سازی.

۴- اعمال سناریوها به بستر مدل.

۵- دریافت خروجی.

۶- تفسیر نتایج بر اساس تئوری‌های موجود.

داده‌های مورد نیاز مدل، به صورت جدول (جدول داده ستانده تجمیع شده) و داده‌های ثابت یا اسکالر وارد مدل می‌شوند. داده‌های غیر جدولی از ترازنامه انرژی، مطالعات پیشین، کالیبراسیون و ... بدست می‌آیند.

هر مدل تعادل‌عمومی‌محاسبه‌پذیر دارای مجموعه معادلات است. این معادلات شامل متغیرهای درون‌زا، برون‌زا و پارامتر هستند. به‌کار بردن مدل‌های تعادل عمومی متکی بر اصول کالیبراسیون است. منظور از کالیبراسیون تعیین ارزش عددی پارامترهای مختلف توابع سازگار با تعادل اولیه است. در برخی از موارد که اطلاعات موجود در ماتریس حسابداری اجتماعی برای کالیبراسیون کافی نیست. در این‌صورت می‌توان ارزش پارامترهای مذکور را به‌طور مستند و یا روش‌های سنجی تخمین زد (طیبی و مصری نژاد، ۱۱۴:۱۳۸۵).

در این روش لازم است مقادیر متغیرهای برون‌زا به مدل وارد شود و مدل حل شود سپس با تغییر در متغیر برون‌زای مد نظر (شوک)، تغییرات در تعادل بازار بررسی شود. این روش اقتصاد را به‌صورت بلوک‌هایی در نظر می‌گیرد که پیش از شوک، در تعادل هستند. سپس تغییرات در میزان متغیرهای درون‌زا بعد از اعمال شوک با میزان تعادلی آنها مقایسه می‌گردد تا اثرات شوک بر اقتصاد تعیین گردد.

در این مطالعه پس از اجرای اصلاحات لازم بر اساس نیاز مطالعه از چارچوب کلی مدل ایستای استاندارد تعادل لافگرن (لافگرن، هریس و رابینسون[1] ، ۲۰۰۱) به عنوان مدل پایه استفاده شده‌است. بر حسب نیاز به این مدل استاندارد پایه بخش انرژی و بلوک محیط زیستی اضافه گردیده است (آشنا، ۱۳۹۵).

همان‌طور که عنوان شد روش تعادل عمومی محاسبه‌پذیر روشی انعطاف‌پذیر است. وارد کردن بخش انرژی به مدل پایه لافگرین، بررسی اثر جذب دی‌اکسیدکربن، بر متغیرهای کلان اقتصادی را مقدور می‌سازد. با توجه به مدل پایه لافگرن، مدل مطالعه پیش‌رو شامل چهار بلوک اصلی است که علاوه بر آن بلوک پنجم تحت‌عنوان بلوک محیط‌زیست به مدل اضافه شده‌است.

بلوک قیمت

این بخش شامل معادلاتی است که قیمت‌های درونزای مدل را به دیگر قیمت‌ها و متغیرهای غیرقیمتی

[1] Lofgren, Harris & Robinson

مدل مرتبط می‌کند. معادلات قیمت صادرات و واردات، ارزش جذب، ارزش تولید داخلی، قیمت فعالیت، قیمت کالای واسطه ترکیبی، قیمت ارزش افزوده و شاخص قیمت مصرف‌کننده مشابه مدل لافگرن (۲۰۰۱) است.

بلوک تولید

این بلوک شامل چهار قسمت می‌باشد. این چهارقسمت شامل تولید داخلی و نهاده‌های مورد نیاز، تخصیص محصولات داخلی به مصرف خانگی، بازار داخل و صادرات، ترکیب کالاها جهت عرضه به بازارهای داخل تقاضا برای نهاده داخلی، تقاضا برای نهاده‌های تجاری می‌باشد.

یکی از معادلات این بلوک معادله‌ی تقاضای حامل‌های انرژی است:

تابع تولید فعالیت: در لایه اول تابع تولید دارای کشش جانشینی صفر است و iva ضریب معادله برای ترکیب ارزش افزوده انرژی و نهاده واسطه کل است.

$$QVAE_{\alpha}=iva_{\alpha}.QA_{\alpha} \quad (۱)$$

تقاضای داده واسطه تجمعی ، تقاضای نهاده واسطه تجمعی، مانند معادلات لافگرن محاسبه می‌گردد.

تابع تولید کاب داگلاس: ترکیب ارزش افزوده و انرژی

$$QVAE=\alpha vae\alpha(\delta vae\alpha.QVA-p\hat{}vae\alpha+(1-\delta vae\alpha).QVE-p\hat{}vae\alpha)\hat{}1/Pvae \quad (۲)$$

شرط جمع‌پذیری:

$$PVEA.QVAE=QVA.PVA+QVE.PVE \quad (۳)$$

معادله ترکیب عوامل اولیه نیروی‌کار و سرمایه نیز مانند معادلات لافگرن است

$$QVE_{\alpha}=\alpha^{ve}{}_{\alpha}\ (\sum ec\delta^{ve}{}_{\alpha}.QFE^{-p\hat{}ve}{}_{ec,a})^{-1/p\hat{}ve} \quad (۴)$$

تقاضای حامل‌های انرژی

$$QFE_{ec,\alpha}=QVE(PDE_{\alpha}/PVE_{\alpha}.\alpha^{v\alpha p\hat{}ve}{}_{\alpha}/\delta^{ve}{}_{\alpha})^{-1/1+p\hat{}ve} \quad (۵)$$

$QFE_{ec,\alpha}$: تقاضای هر حامل در هر فعالیت

PDE_{α}: قیمت هر حامل

PVE_{α}: قیمت نهاده کل

QVE : نهاده انرژی کل

نسبت ارزش افزوده به نهاده کل انرژی در فعالیت میزان بهینه نهاده انرژی کل و ارزش افزوده تابعی از قیمت‌های نسبی این دو متغیر است.

$$QVA_{\alpha}/QVE_{\alpha}=(PVE_{\alpha}/PVA_{\alpha}*\delta^{v\alpha e}{}_{\alpha/1-}\ \delta^{v\alpha e}{}_{\alpha})^{1/1+p\hat{}vae} \quad (۶)$$

QVA_{α}: ارزش افزوده

$$QVA_{\alpha}=ad_{a}\ *\pi_{f}\ QF^{\alpha fa}{}_{fa} \quad (۷)$$

شرط جمع پذیری قیمت حامل‌های انرژی

$$PVE_{\alpha}.QVE_{\alpha}=\sum_{ec}PDE_{ec,a}.QFE_{ec,a} \quad (۸)$$

تابع تولید و تخصیص، نسبت صادرات به عرضه داخلی، تابع انتقال تولید،نسبت تقاضای کالای وارداتی به کالای داخلی، ترکیب عرضه کالای غیر وارداتی ،تقاضا مبادلاتی کل بر اساس معادلات لافگرن است.

بلوک نهادها

در این بلوک درآمد و مخارج مربوط به نهادها قرار می‌گیرد.

بلوک محدودیت‌های سیستم

این بلوک و بلوک نهادها بر اساس معادلات لافگرین نوشته شده‌است.

بلوک محیط زیست

این بلوک شامل معادلات زیست‌محیطی می‌باشد که نشانگر میزان نیز کل انتشار دی‌اکسیدکربن در اقتصاد بوده و سناریوهای مدل با استفاده از پارامتر و متغیرهای برون‌زای مربوط به این معادله و نیز سایر معادلات مرتبط اعمال خواهد شد.

جهت تخمین میزان انتشار گازهای گلخانه ای در هر واحد فعالیت با توجه به ترازنامه انرژی میزان آلاینده منتشر شده (تن) در بخش مورد نظر را با میزان مصرف واسطه حامل خاص در آن بخش (میلیارد ریال) ارتباط می‌دهیم. بدین‌وسیله ضریب انتشار هر بخش به این صورت که به‌ازای مصرف هر میلیارد ریال از حامل خاص چند تن آلاینده مورد نظرمنتشر می‌شود بدست آید (مقیمی و دیگران، ۱۳۹۰).

به‌این‌نکته باید اشاره کرد که ضرایب انتشار برای یک حامل خاص در بخش‌های مختلف و نیز حامل‌های مختلف در بخش خاص متفاوت می‌باشد (ذاکری، ۱۳۹۳). برای بخش سیمان که میزان انتشار دی‌اکسیدکربن گزارش نشده‌است اطلاعات صنعت در نظر گرفته شده‌است. میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از سوزاندن نفت در بخش کشاورزی و حمل‌ونقل بر اساس داده‌های تزارنامه انرژی در نظر گرفته شده‌است و برای نفت و ذغال‌سنگ میزان نشر دی‌اکسیدکربن از مصرف انرژی در بخش انرژی در سال در نظر گرفته شده است (ذاکری،۱۳۹۳؛ طاهری، ۱۳۹۵).

$$EM_{\alpha} =\Sigma(QFE.EF./CF) \quad (۹)$$

$EM\alpha$: میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از یک فعالیت (آلودگی کربن)

QFE : میزان تقاضای نهاده انرژی (مصرف انرژی هر بخش)

EF : ضریب انتشارکربن هر حامل

Cf : ضریب تبدیل پولی

انتشار کربن کل اقتصاد:

$$TEM= \sum_{\alpha}EM_{\alpha} \quad (۱۰)$$

(آشنا، ۱۳۹۵ و طاهری، ۱۳۹۵).

سناریوها و تحلیل نتایج شبیه سازی

همان‌طور که اشاره شد با توجه به اهداف مد نظر در مطالعه حاضر، مدل تعادل عمومی قابل محاسبه به گونه‌ای طراحی شده‌است که اثرات جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن را از طریق کاهش انتشار و یا غلظت موجود دی‌اکسیدکربن، بر مؤلفه‌های اقتصادی نشان دهد.

پس از حل بهینه‌ی مدل می‌توان از طریق تغییرات حاصل مورد نظر در متغیرهای برون‌زا و پارامترهای مورد نظر سناریوسازی و تحلیل نتایج را آغاز کرد. سپس نتایج تعادل جدید با تعادل اولیه مقایسه می‌شوند. به این روش تحلیل، ایستای مقایسه‌ای گویند (طاهری، ۱۳۹۵). هدف مطالعه پیش رو بررسی اثر روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یک روش، جهت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌باشد.

پس از اعمال سناریوهای مدل از طریق پارامتر ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن، میزان تغییرات تقاضای حامل‌های انرژی و نیز اثرکاهش انتشار این گاز بر متغیرهای کلان مانند تولیدناخالص‌داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آمار موجود، ادامه روند نوسانی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، بدون کاربرد فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن، ضمانتی در پایبندی ایران برای هدف کاهش ۱۲ درصدی این گاز را (در معاهده پاریس) فراهم نمی‌آورد.

سناریوی (ای‌تی‌پی نقشه آبی[1]) که استراتژی‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۵۰ درصد تا سال ۲۰۵۰ ارزیابی می‌کند، به این نتیجه می‌رسد که جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن می‌تواند یک پنجم از این کاهش انتشار لازم را برای دستیابی به تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای در مقرون به‌صرفه‌ترین شیوه انجام دهد (آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۰۸). براساس نتایج سناریوی آژانس بین‌المللی انرژی، اگر فناوری‌های جذب انباشت دی‌اکسیدکربن در دسترس نباشد، به‌طورکلی هزینه دستیابی به کاهش ۵۰ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۵۰ میزان۷۰ درصد افزایش خواهد یافت (هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوا[2]، ۲۰۰۵). بنابراین جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن یک بخش اساسی از مجموعه فناوری‌هایی است که برای دستیابی به کاهش قابل توجه انتشار جهانی مورد نیاز است.

کشورهایی مانند ایران موظف هستند تا همراه با توسعه اقتصادی روش‌های نوین مانند فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن را جهت نیل به اقتصاد کم کربن به‌کارگیرند. ایران نیز متعهد به کاهش انتشار کربن با هدف ۱۲ درصدی تا سال ۲۰۳۰ شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۳). اغلب کشورهای صنعتی متعهد شده‌اند که کاهش تقریباً دو برابری انتشار کربن را در حداقل کوتاه‌مدت و میان‌مدت نسبت به آنچه پیش‌تر متعهد شده بوده‌اند را دستور کار قرار دهند. با توجه به این موضوع و نیز با توجه به پتانسیل و کارایی مؤثر و بالاتر فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن نسبت به سایر روش‌های کاهش کربن، سناریو اولیه مورد بررسی، میزان متوسط ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. علاوه‌بر موارد فوق به گزارش آژانس بین‌المللی انرژی در سناریو ۴۵۰ پی

---

[1] ETP BLUE Map

هدف آن کاهش۵۰ درصدی انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن با حداقل هزینه تا سال ۲۰۰ است همچنین امنیت انرژی را با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی افزایش میدهدو نیز با توسعه اقتصادی و حفظ سلامت نیز همراه است.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change

پی ام تا سال ۲۰۵۰ فرایند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن ۲۰ درصد کل کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن را فراهم می‌آورد[۱]. همچنین سناریو ۳۰ و۵۰ درصدی نیز با توجه به تعهدات کشورهای آلاینده که پیش‌تر بدان اشاره شد و با توجه به مطالعات پیشین اتخاذ گردیده است. لذا سناریو۲۰ درصدی به همراه سناریو کاهش۳۰-۵۰ درصدی در این مطالعه در نظر گرفته شده‌است.

۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

داده‌های لازم برای مطالعه حاضر از جدول داده-ستانده، ترازنامه انرژی، داده‌ها و گزارشات مرکز آمار، بانک مرکزی و مطالعات پیشین اتخاذ شده‌اند. تعداد جمعیت شاغل از داده‌های نیروی کار شاغل در ده سال اخیر گزارشات مرکز آمار اتخاذ شده‌است. میزان مصرف کل انرژی اقتصاد و داده‌های انرژی از تراز نامه انرژی استخراج ۱۳۹۵ شده‌است. از جدول داده-ستانده ملی ۱۳۹۰ جهت تجمیع و تهیه‌ی جدول مورد نیاز در روش تعادل عمومی و نیز داده ستانده استفاده شده‌است. مقادیر کشش‌های جانشینی از مطالعات قبلی (آشنا، ۱۳۹۵؛ صادقی و حسن زاده، ۱۳۹۰ و طاهری، ۱۳۹۵) اتخاذ شده‌اند. جدول داده-ستانده ملی سال ۱۳۹۰ در ۵ بخش اصلی و یک بخش در قالب سایر بخش‌های جدول داده ستانده تجمیع شده‌است. این بخش‌ها با توجه به روش دوم تحقیق پیش‌رو و مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند. بخش‌های تجمیع شده از جمله مهمترین بخش‌های انتشاردهنده‌ی دی‌اکسیدکربن به شمار می‌روند. پس از تعیین مقدار اولیه برای متغیرهای مدل توسط فرآیند کالیبراسیون پارامترهای مدل به جز کشش‌های جانشینی بدست می‌آیند میزان کشش‌های جانشینی بسته به نوع کشش و موضوع مورد بررسی، متفاوت خواهند بود (کوئسلر و چیمورا[۲]، ۲۰۱۲). در مطالعه پیش‌رو بر اساس مطالعات پیشین و بررسی نتایج به صورت تجربی و با توجه به موضوع تحقیق کشش‌های جانشینی استفاده شده در مدل مطابق جدول شماره (۱) انتخاب شده‌اند.

جدول شماره (۱) کشش‌های جانشینی استفاده شده درمدل

نام کشش	میزان
کشش تابع CET	۱/۵
کشش تابع آرمینگتون	۲/۵
کشش جانشینی واردات وکالا	۰/۳
کشش جانشینی صادرات و فروش	۱/۴

منبع: صادقی و حسن زادهف ۱۳۹۰؛ آشنا، ۱۳۹۵؛ طاهری، ۱۳۹۵و لافگرن، هریس و رابینسون، ۲۰۰۱

۴-۱. جدول داده ستانده مورد نیاز برای روش تعادل عمومی

در مدل تعادل عمومی محاسبه‌پذیر به‌کار گرفته شده برای انعکاس اقتصاد واقعی می‌تواند از جدول داده-

[۱] نقشه راه CCS آژانس بین‌المللی انرژی در این سناریو اهمیت CCS را در تثبیت کربن دی‌اکسید در ۴۵۰ پی‌پی‌ام را عنوان می‌کند.

[2] koesler and schymura

ستانده استفاده کرد. جهت رفع مشکلاتی مانند جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، می‌توان از حساب‌های ملی، ماتریس حسابداری اجتماعی و یا جدول داده–ستانده استفاده کرد. در جدول داده ستانده مشخص است که در تولید هر محصول چه میزان هزینه به مواد واسطه، چه میزان هزینه به عوامل و چه میزان هزینه به مالیات مرتبط بوده است. در واقع جدول داده–ستانده حالت گسترده و جزئی شده‌ی حساب‌های ملی است و نشانگر جریان مبادله بین فعالیت‌های اقتصاد است. این جدول ارتباط عرضه و تقاضا را برای طبقات مختلف کالاها و خدمات یک اقتصاد نشان می‌دهد (بمان پور، ۱۳۹۵).

به گزارش سازمان جهانی انرژی (۲۰۰۴) مکان‌های ایده‌آل برای جذب دی‌اکسیدکربن در مقیاس بزرگ شامل کارخانه‌های فرآوری گاز، تأسیسات تولید کود، نیروگاه‌های حرارتی و سایر مکان‌هایی است که مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کنند. با توجه به این مهم و با استفاده از نظر جامعه خبره و مطالعه میدانی که در این زمینه با استفاده از روش SWOT صورت پذیرفت، از میان بخش‌های جدول شماره (۲) بر اساس اهداف تحقیق و تقسیم‌بندی فعالیت‌های اقتصادی[1] بخش‌های زیر انتخاب شده‌اند.

جدول شماره (۲) مجموعه و زیر مجموعه‌های مدل مورد مطالعه

مجموعه	زیر مجموعه
فعالیت	کشاورزی و دامپروری، حمل‌ونقل، سیمان، استخراج نفت خام و گاز طبیعی، زغال سنگ، سایر بخش‌ها در قالب تجمیع شده
کالا	کشاورزی، حمل ونقل، سیمان، نفت خام و گاز طبیعی، زغال سنگ و سایر تولیدات در بخش‌های تجمیع شده
عوامل تولید	سرمایه، نیروی‌کار، انرژی
خانوار	خانوار (به علت عدم بررسی رفاه در مدل خانوار تفکیک نشده‌است)
نهادها	خانوار، دولت، شرکت‌ها و بنگاه‌ها، دنیای خارج

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۲. بستن مدل

در این مدل، با فرض کوچک بودن کشور و قیمت پذیری در سطح بین المللی، قیمت‌های جهانی ثابت و برون‌زا در نظر شده اند. در بازار عوامل تولید فرض شده‌است که سرمایه در اشتغال کامل بوده و امکان تحرک آن بین فعالیت‌های مختلف وجود ندارد. قیمت سرمایه در هر بخش از عرضه و تقاضای سرمایه در آن بخش تعیین می‌شود. در بازار نیروی کار هم به دلیل وجود بیکاری در کشور، اشتغال ناقص در نظر گرفته شده و امکان تحرک نیروی کار بین فعالیت‌ها وجود دارد. لذا دستمزد نیروی کار ثابت فرض شده و میزان اشتغال توسط تقاضای نیروی کار تعیین می‌شود. در تراز پس انداز سرمایه گذاری نیز تغییرات نرخ پس انداز نقش تسویه کنندگی بازار را ایفا می‌کند. با توجه به اینکه دسترسی به پس اندازهای خارجی در اکثر کشورهای در حال توسعه با محدودیت مواجه است لذا در تراز خارجی، متغیر نرخ ارز به عنوان متغیر متعادل کننده بازار در

[1] International Standard Industrial Classification (ISIC)

نظر گرفته شده‌است. پس انداز خارجی ثابت و برونزا فرض شده‌است. برای تراز دولت هم فرض شده که درآمدها و مخارج دولت نقش تسویه‌کنندگی بازار را بر عهده داشته و نرخ‌های مالیات برونزا می‌باشند.

۴-۳. تحلیل حساسیت و بررسی نتایج شبیه سازی مدل در حالت ایستا

پس از اعمال سناریو ها در قالب شوک به مدل نتایج با مقادیر تعادل اولیه مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده به شرح ذیل می باشد.

در جدول شماره (۳) اثر کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن بر مصرف حامل‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاکی از افزایش در مصرف حامل‌های انرژی است. بیشترین میزان افزایش تقاضا در سناریوی دوم برای زغال سنگ و برای گاز طبیعی در سناریوی سوم می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش دی‌اکسیدکربن و به‌کارگیری روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن مشکل آلایندگی سوخت‌های فسیلی برطرف شده و تقاضای سوخت‌های فسیلی به صورت کلی افزایش می‌یابد.

جدول شماره (۳) درصد تغییر در مصرف حامل‌های انرژی در صورت اعمال سناریو کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن

حامل/سناریو	سناریو ۱	سناریو۲	سناریو۳
بنزین	۰/۹۸	۰/۰۱۲	۰/۰۱
گاز طبیعی	۰/۰۹	۰/۱۴	۳/۹
زغال سنگ	۰/۰۵۱	۶/۶	۰/۰۲۷
نفت کوره	۰/۰۹۸	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۷
گازوئیل	۰/۰۹۷	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۲۴
نفت گاز	۰/۰۹۷	۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۹
نفت سفید	۰/۰۹۸	۰/۱۰۳	۰/۰۱۵

منبع: یافته‌های پژوهش

در جدول شماره (۴) تغییرات تقاضای حامل‌های انرژی به‌صورت جداگانه در هر بخش مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها لازم برای زغال‌سنگ در بخش حمل‌ونقل موجود نمی‌باشد. نتایج حاکی از آن است که در صورت به‌کارگیری سناریوی اول، شاهد افزایش در مصرف هر حامل در بخش منتخب مورد مطالعه خواهیم بود.

جدول شماره (۴) سناریو اول (تغییرات تقاضا به تفکیک بخش‌ها و حامل‌های انرژی در صورت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن (تن))

بخش/حامل	بنزین	گاز	زغال	نفت کوره	گازوئیل	نفت گاز
کشاورزی و دامپروری	۷۱۰۰	۶۸۳۰	۳۲۲۲	۱۰۰۴۴	۷۱۸۱	۵۴۵۵۸
سیمان	۱۱۹۲۱	۱۳۷۶۵	۳۴۲۶۳۴	۳۳۹۷۵	۱۲۸۴۶۴	۱۳۵۱۱۴
حمل و نقل	۷۳۳۸۳	۲۵۲۰۹	*	۴۳۶۱۱	۸۴۱۵۳۳	۳۳۰۳

منبع: یافته‌های پژوهش

مطابق جدول شماره (۵) میزان تغییرات در مصرف حامل انرژی در صورت به‌کارگیری سناریوی دوم در هر بخش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش در میزان مصرف حامل‌های انرژی در هر بخش می‌باشد.

جدول شماره (۵) سناریو دوم (متغییرات تقاضا به تفکیک بخش‌ها و حامل‌های انرژی در صورت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن(تن))

بخش/حامل	بنزین	گاز	زغال	نفت کوره	گازوئیل	نفت گاز
کشاورزی و دامپروری	۱۲۲۰۰	۷۸۰۶	۳۶۸۳	۱۱۴۷۹	۸۲۰۷۵	۶۲۳۵۲۷
سیمان	۲۰۴۳۶	۱۵۷۳۲۱	۴۱۱۵۸۲	۳۸۸۲۸۵	۱۴۶۸۱۶	۱۵۴۴۴۶
حمل و نقل	۱۲۵۷۹۹	۲۸۸۱۰۴	*	۳۸۰۷۷۷	۴۹۸۴۴	۹۶۲۶

منبع: یافته‌های پژوهش

مطابق جدول (۶) در صورت به‌کارگیری سناریوی سوم، میزان تغییرات در مصرف حامل‌های انرژی مانند دو سناریوی قبل افزایشی می‌باشد. نتایج حاکی از آن است در صورت کاهش دی‌اکسیدکربن تقاضای هر حامل در کل اقتصاد و هر حامل در هر بخش و در هر سناریو به صورت جداگانه افزایشی می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده با کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به میزان ۲۰،۳۰ و۵۰ درصد، تقاضا برای مصرف حامل‌های انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش تقاضا برای حامل‌های انرژی با توجه به رابطه عکس تقاضا و قیمت می‌توان از طریق اعمال کاهش ۲۰،۳۰ و۵۰ درصدی در میزان کربن‌دی‌اکسید اثر بر متغییرهای کلان مانند تولیدناخالص‌داخلی را مورد بررسی قرار داد که برای کل بخش انرژی به صورت کلان در نظر گرفته شده‌است.

جدول شماره (۶) سناریو سوم (تغییرات تقاضا به تفکیک بخش‌ها و حامل‌های انرژی در صورت کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن (تن))

بخش/حامل	بنزین	گاز	زغال	نفت کوره	گازوئیل	نفت گاز
کشاورزی و دامپروری	۲۸۵	۱۰۹۲۹۲	۵۱۵۶	۱۶۰۷۱	۱۱۴۹۰۵	۸۷۲۹۳۸
سیمان	۴۷۶۸۵	۲۲۰۲۵۰	۶۳۲۲۱۵	۵۴۳۶۰۶	۲۰۵۵۴۲	۲۱۶۲۲۶
حمل و نقل	۲۹۳۵۰۵	۴۰۳۳۰۰	*	۶۹۷۸۹۷۴۹	۱۳۵۱۴۹۴	۵۲۹۷۱۶

منبع: یافته‌های پژوهش

مطابق جدول (۷) در صورت به‌کارگیری روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن و اعمال سناریوهای مدل در هر سه سناریو در مدل شاهد روند افزایشی و صعودی در میزان تولید ناخالص‌داخلی در اقتصاد خواهیم بود. لذا با توجه به کاهش قیمت حامل‌های انرژی به علت کاهش مالیات کربن و رفع مشکل آلایندگی و کاهش قیمت فعالیت تولیدی در بخش انرژی و سایر بخش‌های مصرف‌کننده انرژی تولید ناخالص داخلی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. در صورت وجود، ابتدا مشخصات جمعیت‌شناختی نمونه مورد بررسی و سپس نتایج تحلیل‌های آماری مدل و فرضیه‌های پژوهش گزارش شود.

جدول شماره (۷) نتایج شبیه سازی سناریوهای مدل بر متغییرهای کلان اقتصادی (درصد)

متغییر	سناریو۱	سناریو۲	سناریو۳
تولید ناخالص داخلی	۲/۸	۵/۲	۶/۲

ضریب انتشار برای نفت در نظر گرفته شده‌است

منبع: یافته‌های پژوهش

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در حال‌حاضر توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن تنها روش مؤثر و زمینه‌ساز دستیابی به اقتصاد با سطح بهینه دی‌اکسیدکربن در دنیا بوده و موجب افزایش تقاضا برای سوخت های فسیلی می‌گردد. توجه روز افزون به این موضوع در دنیا موجب افزایش درآمدهای کشورهای دارای رانت منابع فسیلی و رفع دغدغه‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف حامل‌های انرژی خواهد شد. همچنین سرمایه‌گذاری در زمینه تحقیق و توسعه و احداث واحدهای جذب و مولدسازی خروجی آن (از طریق صدور دانش و فروش دی‌اکسیدکربن انباشت شده و افزایش توان بهره‌برداری از چاه‌های هیدورکربنی کم فشار و...) به‌طور مستقیم می‌تواند منجر به افزایش سرمایه انسانی، بهره‌وری کل و در نهایت زمینه‌ساز توسعه پایدار گردد. لذا در این مطالعه به بررسی اثر توسعه فرآیند جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بر تقاضای حامل‌های انرژی و رشد اقتصادی در ایران پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه فرآیند جذب و انباشت کربن در سناریوهای کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت تقاضا برای حامل‌های انرژی را با توجه به رفع مشکل آلایندگی آن‌ها و هزینه‌های اجتماعی مصرف حامل‌های انرژی در بخش‌های کلیدی و نیز کل اقتصاد ایران افزایش می‌دهد. همچنین پس از بررسی اثر سناریوهای مورد مطالعه بر کل بخش‌های اقتصادی تغییرات ایجاد شده حاکی از افزایش تولیدناخالص‌داخلی بوده و می‌تواند زمینه‌ساز توسعه پایدار در اقتصاد ایران باشد. با توجه به نظریه زیست‌محیطی کوزنتس کشورهای با درآمد سرانه پایین‌تر اهمیت کمتری برای مسائل زیست‌محیطی قائل هستند. لذا به‌دلیل عدم انگیزه بخش خصوصی در مراحل اولیه توسعه فرآیندهای جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن و با توجه به ثمرات اقتصادی و زیست‌محیطی آن برای کشور حضور و حمایت دولت در مراحل اولیه توسعه این فرآیند ضروری به نظر می‌رسد.

بنابراین فارغ از اینکه در کدام مرحله از گذار اقتصادی قرار داریم پیشنهاد می‌شود با عنایت به آثار پایدار اقتصادی و زیست‌محیطی این صنعت نوپا، ایجاد و توسعه آن را در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی کلان کشور مدنظر قرار گیرد. با توجه به اثر مثبت به‌کارگیری روش جذب و انباشت دی‌اکسیدکربن بر رشد اقتصادی و نیز برطرف شدن مشکل آلایندگی سوخت‌های فسیلی، پیشنهاد می‌گردد در بخش بودجه، منابع مالی لازم جهت تخصیص به این بخش مدنظر قرار گیرد. با توجه به آنکه رشد اقتصادی می‌تواند از جنبه‌های مختلف به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تمام ابعاد جامعه اثرگذار باشد و با توجه به اهمیت روز افزون محیط‌زیست در جهان احداث واحدهای جذب کربن در بخش‌های آلاینده اقتصادی امری ضروری به شمار می‌آید.

منابع و مأخذ

منابع فارسی

- آشنا، ملیحه. (۱۳۹۵). *بررسی اقتصادی مکانیسم توسعه پاک و آثار آن در الگوی تعادل عمومی قابل محاسبه*. (پایان نامه دکتری)، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.
- امیری، قوام الدین و ضرغام ، نصرت الله. (۱۳۹۳). *ترسیب کربن در بوم سازگان‌های زمینی*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- بمان پور، مسلم. (۱۳۹۵). *مدل‌های تعادل عمومی محاسباتی با نگرش کاربردی*، تهران: انتشارت دانشگاه امام صادق.
- بیگم مختاری، زهرا؛ زارع، تکتم و کمالی‌فر، یونس. (۱۳۹۴). حذف گاز کربن دی‌اکسید از گاز دودکش کارخانه سیمان توسط کلینوپتیلولیت طبیعی منطقه سبزوار، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، ۳۴(۲)، ۶۳ –۷۲.
- پازکی، مریم؛ قاسم زاده، رضا و هویدی، حسن. (۱۳۹۵). *میکروجلبک‌ها و تثبیت زیستی دی‌اکسیدکربن (مدل سازی، پیش بینی و کنترل)*، تهران: آوای قلم.
- پور اصغر، فرزام. (۱۳۸۹). مقایسه تحلیلی ابزارهای اقتصادی برای حفاظت از محیط زیست و پیشنهادهایی برای عملیاتی کردن آنها در برنامه توسعه کشور، *مجله محیط زیست وتوسعه*، ۱(۱)، ۷۳–۹۰.
- پورغفار دستجردی، جواد. (۱۳۹۳). مالیات سبز (مالیاتهای زیست محیطی)، *مجله اقتصادی*، ۱(۱)ف ۱۳۵–۱۴۸.
- جعفری صمیمی، احمد و احمدپور، سیدمحی‌الدین. (۱۳۹۰). بررسی رابطه شاخص عملکرد محیط زیست و رشد اقتصادی در کشورهای توسعه‌یافته، *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۱(۱)، ۵۵–۷۲.
- جمعه‌پور، محمود. (۱۳۸۲). عوامل اصلی در فرآیند توسعه پایدار: مردم، منابع، فضاها و نقش مشارکت مردمی در آن. *فصلنامه* علوم اجتماعی۱۰(۲۲)، ۱۰۳–۱۳۰.
- چراغی، میترا و چراغی کوتیانی، حسن. (۱۳۹۳). بررسی *ابزارهای اقتصادی برای حفاظت از محیط زیست*، اولین کنفرانس بین المللی یافته های نوین در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، تهران.
- حیدری، درخشان؛ عبدی، حدیث و علیمرادی، مهری. (۱۳۹۸). *اثرات جانبی (خارجی) مثبت و منفی*، سومین کنفرانس بین المللی تحولات نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری، تهران.
- خداداد لشگری، داریوش و فرد مرادی نیا، سینا. (۱۳۹۶). مدیریت فضای سبز مورد نیاز در شهرکهای صنعتی جهت کنترل گاز دی اکسید کربن تولیدی توسط صنایع موجود (مطالعه موردی

شهرک صنعتی شهید سلیمی تبریز)، *فصلنامه رویکردهای نوین در مهندسی عمران*، ۱(۲)، ۳۱-۴۵.

- دانشی، علیرضا؛ وفاخواه، مهدی و پناهی، مصطفی. (۱۳۹۳). ابزارهای اقتصادی مدیریت منابع طبیعی و محیطزیست؛ مطالعه موردی: پرداخت بهای خدمات اکوسیستمی. (EPS). *آب و توسعه پایدار*، ۱(۲)، ۷-۱۴.
- ذاکری، زهرا. (۱۳۹۳). ضرورت توجه به محیط زیست در قانون هدفمندی یارانه‌ها: بررسی میزان انتشار مستقیم و غیر مستقیم دی‌اکسیدکربن ، *مرکز پژوهشهای مجلس شورای اسلامی*.
- سلمانی، مریم؛ حجازی، رخشاد؛ دلدار، بیات قاسم و عالی نسب، داوود. (۱۳۹۷). *بررسی رابطه بین محیط زیست و توسعه پایدار اقتصادی با تاکید بر کاهش مشکلات محیط زیستی*، تهران: سومین همایش ملی دانش و فناوری علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران.
- صادقی، حسین و حسن زاده، محمدحسین. (۱۳۹۰). بررسی اثرات احتمالی بحران مالی جهانی بر درآمد خانوارهای شهری و روستایی ایران: رهیافت مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، *مجله تحقیقات اقتصادی*، ۴۶(۲)، ۷۹-۱۰۲.
- صادقی، حسین و سعادت، رحمان. (۱۳۸۳). رشد جمعیت اقتصادی و اثرات زیست محیطی در ایران (یک تحلیل علی)، *مجله تحقیقات اقتصادی*، ۳۹(۱)، ۱۶۳-۱۸۰ .
- صفایی، مهران. (۱۳۹۱). پدیده گازهای گلخانه ای و مخاطرات دریایی احتمالی و نقش فعالیت های صنایع نفت، گاز و پتروشیمی در این ارتباط در پارس جنوبی، *همایش ملی خلیج فارس*.
- طاهری، احسان. (۱۳۹۵). *ارزیابی اثر تغییرات اقلیم بر اقتصاد ایران با استفاده از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، پایان نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه تربیت مدرس،ایران.
- طاهری، احسان. (۱۳۹۸). اثرات اقتصادی و زیست محیطی افزایش قیمت حامل‌های انرژی بر بخش کشاورزی ایران رویکرد (تعادل عمومی محاسبه پذیر)، *فصلنامه تحقیقات اقتصاد کشاورزی*،۱۱(۴۶)، ۱۴۳-۱۶۶.
- طیبی،کمیل و مصری نژاد، شیرین. (۱۳۸۵). روش شناسی تعادل عمومی قابل محاسبه ی (تعادل عمومی محاسبه پذیر) محاسبه و کاربرد، *فصلنامه اقتصاد مقداری*، ۳(۱)، ۱۰۳-۱۳۲.
- عباس‌زاده کرمجوان، سجاد. (۱۳۹۹). ارزیابی اقتصادی سیاست مالیات کربن: کاربردی از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه ریزی انرژی*، ۵(۱۸)، ۷-۳۷ .
- فریادی، مسعود. (۱۳۹۸). انتخاب ابزارهای مقررات گذاری برای حفاظت محیط زیست، *مجلس و راهبرد*، ۲۶(۹۸)، ۱۱۹-۱۴۶.

- قناعت‌پیشه، احسان؛ بهمنش، حمید و وحدانی حسین. (۱۳۹۱). *مروری بر روش‌های مختلف تسخیر و ذخیره سازی کربن*، تهران: اولین کنفرانس بین المللی نفت گاز پتروشیمی ونیروگاهی،مرکز همایش‌های هتل المپیک.
- معاونت امور برنامه ریزی و انرژی. (۱۳۹۵). دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی: *ترازنامه انرژی*، ایران، تهران.
- مقیمی، مریم؛ شاهنوشی، ناصر؛ دانش، شهناز؛ اکبری، بیت الله و دانشور، محمود. (۱۳۹۰). بررسی آثار رفاهی و زیست محیطی مالیات سبزو کاهش یارانه سوخت در ایران با استفاده از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، *فصلنامه اقتصاد کشاورزی وتوسعه*، ۱۲(۷۵)، ۷۹-۱۰۸.
- مهدوی عادلی، محمدحسین و قنبری، علیرضا. (۱۳۹۲). تجریه و تحلیل رابطه همجمعی و علیت میان انتشار دی اکسیدکربن، تولید ناخالص داخلی و مصرف انرژی در ایران، *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۳(۹)، ۲۱۷-۲۳۷.
- مهرگان، نادر و برخورداری، سجاد. (۱۳۸۹). *مدل‌های تعادل عمومی محاسبه پذیر و کاربرد آن در اقتصاد*، تهران: انتشارات نور علم و دانشکده علوم اقتصادی.
- مولوی، حسین؛ شجاعی، اکبر و موسوی، عباس. (۱۳۹۷). *حذف دی‌اکسیدکربن*، تهران: موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- هوشمند، امیر حسین. (۱۳۹۸). مطالعه ازدیاد برداشت از مخازن نفتی با تزریق دیاکسید کربن همراه با ذخیره سازی، *ماهنامه ی علمی اکتشاف و تولید نفت* و گاز، شماره ۱۶۵.
- وزارت نیرو (۱۳۹۳). *برنامه بلند مدت توسعه بخش انرژی کشور، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی.*

منابع لاتین

- Best, D., Mulyana, R., Jacobs, B., Iskandar, U. P., & Beck, B. (2011). Status of CCS development in Indonesia. *Energy Procedia*, 4, 6152-6156.
- Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. (2012). Assessing the economic impacts of climate change-an updated cge point of view.
- Sievert, K., Cameron, L., & Carter, A. (2023). Why the Cost of Carbon Capture an d Storage Remains Persistently High. *International Institute for Sustainable Development*
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2005). *Trade and the environment: Theory and evidence*. Princeton university press.
- Dai, H., Masui, T., Matsuoka, Y., & Fujimori, SH. (2011) *Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM/CGE model*, Energy policy, 39, 2875–2887.

- Daniels, a., heiskanen, e. (2006). *schwars pumpe carbondioxide capture and storage project*,work package,hirtorical and recent attitude of shreholders, Canadia: Economics Association .
- Dixon, J., Scura, L., Carpenter, R., & Sherman, P. (2013). *Economic analysis of environmental impacts*. Routledge.
- Fay, M. (2012). *Inclusive green growth: The pathway to sustainable development*. World Bank Publications.
- Gangwal, S., Mukhopadhyay, S., & Roy, K. (2006, September). Optimization of surface orientation for high-performance, low-power and robust FinFET SRAM. In *IEEE Custom Integrated Circuits Conference 2006* (pp. 433-436). IEEE.
- Herzog, H., & Golomb, D. (2004). Carbon capture and storage from fossil fuel use. *Encyclopedia of energy*, *1*(6562), 277-287.
- Guo, J. X., & Huang, C. (2020). Feasible roadmap for CCS retrofit of coal-based power plants to reduce Chinese carbon emissions by 2050. *Applied energy*, *259*, 114112.
- Guo, J. X., & Huang, C. (2020). Feasible roadmap for CCS retrofit of coal-based power plants to reduce Chinese carbon emissions by 2050. *Applied energy*, *259*, 114112.
- Intergovernmental Panel on Climate Change .(2005). *Special Report on Carbon Capture and Storage.*
- International Energy Agency .(2004). *Prospects For CO2 Capture And Storage, Paris:France.*
- International Energy Agency .(2008). *CO2 Capture and Storage: A Key Carbon Abatement Option, Paris:France*.
- International Energy Agency .(2009). *Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage, Paris, France.*
- International Energy Agency. (2011). *Technology roadmap: carbon capture and storage 2011, in:* IEA (Ed), Technology Roadmap Online.
- Kharaka, Y. K., Cole, D. R., Hovorka, S. D., Gunter, W. D., Knauss, K. G., & Freifeld, B. M. (2006). Gas-water-rock interactions in Frio Formation following CO2 injection: Implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins. *Geology*, *34*(7), 577-580.
- Koesler, S., & Schymura, M. (2012). Substitution elasticities in a ces production framework-an empirical analysis on the basis of non-linear least squares estimations. *ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper*, (12-007).
- Lofgren, H., Harris, R. L., & Robinson, S. (2002). *A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS* (Vol. 5). Intl Food Policy Res Inst.

- MacDougall, S., Arnold, J., & McKenzie, J. (2023). *Cash-flow modeling shows carbon capture and storage can help meet climate goals.* Pembina Institute and Canadian Climate Institute-iisd.
- Maroto-Valer, M. M. (Ed.). (2010). *Developments and innovation in carbon dioxide (CO2) capture and storage technology: carbon dioxide (CO2) storage and utilisation*. Elsevier.
- O'Ryan, R., Nasirov, S., & Álvarez-Espinosa, A. (2020). Renewable energy expansion in the Chilean power market: A dynamic general equilibrium modeling approach to determine CO2 emission baselines. *Journal of Cleaner Production*, *247*, 119645.
- Okagawa, A., Masui, T., Akashi, O., Hijioka, Y., Matsumoto, K., & Kainuma, M. (2012). Assessment of GHG emission reduction pathways in a society without carbon capture and nuclear technologies. *Energy Economics*, *34*, S391-S398.
- Praetorius, B., & Schumacher, K. (2009). Greenhouse gas mitigation in a carbon constrained world: The role of carbon capture and storage. *Energy Policy*, *37*(12), 5081-5093.
- Rao, Y., Surampalli. Tian, C., Zhang. Tyagi, r. NaidB, R. R. Gurjar. Ojha, S., Yan, S., Brar, S., Ramakrishnan, A., & Kao, C. (2015). *carbon capture and storage, Published* , America: Society of Civil Engineers. Retrieved from *https://EconPapers.repec.org/RePEc:ekd:002672:4010*.
- Schumacher, K., & Sands, R. D. (2006). Innovative energy technologies and climate policy in Germany. *Energy Policy*, *34*(18), 3929-3941.
- Shah, M. M., van Hassel, B., Christie, M., & Li, J. (2006, May). CO2 capture by membrane based oxy-fuel boiler. In *Proceedings of the 2006 Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA*.
- Shahbaz, M., Tiwari, A. K., & Nasir, M. (2013). The effects of financial development, economic growth, coal consumption and trade openness on CO2 emissions in South Africa. *Energy policy*, *61*, 1452-1459.
- Takeda, S., & Arimura, T. H. (2021). A computable general equilibrium analysis of environmental tax reform in Japan with a forward-looking dynamic model. *Sustainability science*, *16*(2), 503-521.
- Tan, X., Liu, Y., Cui, J., & Su, B. (2018). Assessment of carbon leakage by channels: An approach combining CGE model and decomposition analysis. *Energy Economics*, *74*, 535-545.
- Thepkhun, P., Limmeechokchai, B., Fujimori, S., Masui, T., & Shrestha, R. M. (2013). Thailand's Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO2 mitigation measures. *Energy Policy*, *62*, 561-572.
- World Commission on Environment and Development (WCED) (1987). Our Common Future, Oxford University Press

- Zero Emissions Platform, *Climate Solutions for EU industry*, *2017*.
- Zhang, L. F. (2006). The southwest regional carbon sequestration partnership—development of CO2 capture technology. In *Second Annual Carbon Capture and Transportation Working Group Workshop, Palo Alto, CA*.