

فصلنامه‌ی اقتصاد مقداری

صفحه ی اصلی وب سایت مجله:
www.jqe.scu.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۴۲۷۱-۲۷۱۷
شاپا چاپی: ۵۸۵۰-۲۰۰۸

بررسی تأثیر تحریم‌های اقتصادی بر انتشار آلایندگی در ایران (رویکرد فازی)

مصطفی شکری*، مریم بازوند**

*استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران (نویسنده‌ی مسئول).
** دانش‌آموخته دکتری اقتصاد و مدیریت منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۳۰ تیر ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۲ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۴
انتشار آنلاین از تاریخ ۲۲ مرداد ۱۴۰۴

طبقه‌بندیJEL: (Q53 ،O4 ،F51)

واژگان کلیدی:
تحریم‌های اقتصادی، انتشار آلایندگی، محیط زیست، ایران، منطق فازی.

ارتباط با نویسنده (گان) مسئول:
ایمیل: shokri.m@lu.ac.ir
0009-0004-6092-1925

آدرس پستی:
ایران،لرستان، خرم آباد، دانشگاه لرستان، کد پستی: ۴۴۳۱۶-۶۸۱۵۱

اطلاعات تکمیلی:

قدردانی: از تمامی افراد و موسساتی که در انجام این تحقیق مولف را مساعدت نمودند، قدردانی می‌شود.
تضاد منافع: نویسنده مقاله اعلام می‌کند که در انتشار مقاله ارائه شده تضاد منافعی وجود ندارد.
منابع مالی: نویسنده (ها) هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده اند.

چکیده

تحریم‌های اقتصادی اعمال شده علیه کشور ایران، علاوه بر تبعات اقتصادی، می‌توانند پیامدهای ناخواسته زیست‌محیطی نیز به‌همراه داشته باشند. با توجه به اهمیت سنجش دقیق و کمّی این پیامدها برای کشور ایران، هدف مطالعه حاضر بررسی تاثیر تحریم‌های اقتصادی بر انتشار آلایندگی در ایران طی دوره ۱۴۰۳-۱۳۷۱ است. بدین منظور از روش رگرسیون فازی که توانایی بالایی در بررسی همبستگی در شرایط ابهام و نااطمینانی دارد، استفاده شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تحریم‌های اقتصادی هم به صورت مستقیم و هم به صورت

غیرمستقیم در انتشار حجم آلایندگی در ایران، با نسبت فازی (۰/۰۶۷۷، ۱/۱۰۷۳) موثر هستند. تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی به فناوری‌های نوین، قطعات یدکی و سرمایه‌گذاری خارجی، صنایع را ناچار به استفاده از ماشین‌آلات قدیمی و پرمصرف کرده و بهره‌وری انرژی را کاهش داده‌اند. از طرف دیگر، تحریم‌های اقتصادی به دلیل انزوای تجاری و کاهش رقابت‌پذیری صنایع و بنگاه‌ها، تولید غیربهره‌ور، محدودیت‌های مالی و فناوری در سرمایه‌گذاری‌های زیست‌محیطی، دشواری واردات سوخت باکیفیت و فناوری‌های تجدیدپذیر و تضعیف نظارت نهادها، موجب گسترش انتشار آلاینده‌ها در ایران شده‌اند

ارجاع به مقاله:
شکری، مصطفی و بازوند، مریم. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر تحریم‌های اقتصادی بر انتشار آلایندگی در ایران (رویکرد فازی). *فصلنامه‌ی اقتصاد مقداری (بررسی‌های اقتصادی سابق)*، ۲۲(۳), ص-ص.
10.22055/jqe.2019.26401.1899

© 2021 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, 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) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

تحریم‌های اقتصادی، ابزاری رایج و بحث‌برانگیز در روابط بین‌الملل هستند که با هدف اعمال فشار بر کشورها برای تغییر سیاست‌هایشان به کار می‌روند (Morgant & Bapat 2023; Drenzer, 1999) ایران طی دهه‌های اخیر، به کرات هدف این تحریم‌ها قرار گرفته است (Abolhasani Hastiani, Elmi Moghaddam, Mansouri, & Amini Milani, 2022). اما فراتر از ابعاد صرفاً اقتصادی، تأثیرات این تحریم‌ها بر حوزه‌های حیاتی دیگر، به‌ویژه محیط زیست، در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. این محدودیت‌ها می‌توانند از طریق کانال‌های مختلفی بر کیفیت محیط زیست تأثیر بگذارند، از جمله محدود کردن دسترسی به فناوری‌های سبز و پاک، کاهش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زیست‌محیطی، و افزایش اتکا به منابع انرژی آلاینده و صنایع فرسوده (Balali, Farzanegan, Zamani, Baniasadi, 2024; Madani, 2020 a).

جمهوری اسلامی ایران نیز با سابقه‌ای طولانی در مواجهه با تحریم‌های بین‌المللی، یک مورد مطالعاتی برجسته و منحصر به فرد، برای بررسی پیامدهای ناخواسته حاصل از تحریم‌ها بر مسائل زیست‌محیطی است. تحقیقات اخیر به روشنی نشان داده‌اند که تحریم‌ها می‌توانند به تشدید مسائل زیست‌محیطی کشور های مورد تحریم، منجر شوند. به عنوان مثال، مطالعات جدید پیش‌بینی کرده‌اند که تحریم‌ها قادرند تا سال ۲۰۲۸، انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) و ذرات معلق در ایران را بین ۱۲.۵ تا ۳۰ درصد نسبت به سناریوی عدم تحریم افزایش دهند (Economic Research Forum, 2024; Balali, Farzanegan, Zamani, Baniasadi, 2024). این افزایش، عمدتاً ناشی از کاهش بهره‌وری انرژی در بخش‌های صنعتی به دلیل عدم دسترسی به فناوری‌های جدید و استفاده از تجهیزات قدیمی و ناکارآمد است (Economic Research Forum, 2024; Jabari, Salem, Zamani, & Farzanegan 2024) . علاوه بر این، تحریم‌ها با محدود کردن همکاری‌های بین‌المللی و انتقال دانش فنی در حوزه محیط زیست، چالش‌های موجود را پیچیده‌تر می‌سازند (Madani, 2021) این وضعیت، ضرورت پرداختن به این مسئله را با ابزارهای تحلیلی دقیق و جامع دوچندان می‌کند.

با این حال، سنجش دقیق و کمی این اثرات، به‌ویژه در مورد پدیده‌هایی که ذاتاً پیچیده، چندوجهی، و دارای ابهام و عدم‌قطعیت بالا هستند (مانند انتشار آلایندگی‌ها و تأثیرات غیرمستقیم تحریم‌ها)، با چالش‌های اساسی روبرو است. رویکردهای سنتی اغلب قادر به مدل‌سازی مؤثر این عدم قطعیت‌ها نیستند. در پاسخ به این چالش، منطق فازی[1]

[1] Fuzzy Logic

به عنوان یک ابزار قدرتمند و انعطاف‌پذیر، راهکاری مناسب برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و دارای داده‌های مبهم یا کیفی ارائه می‌دهد. این رویکرد، امکان مدل‌سازی روابط غیرخطی و ارزیابی درجات تأثیرگذاری متغیرها را فراهم می‌آورد و از این رو، برای بررسی پدیده‌هایی که نمی‌توان آن‌ها را با قطعیت کامل توصیف کرد، بسیار کارآمد است (Iranmanesh, Salehi & Jalaee, 2021). این مقاله با اتخاذ رویکرد فازی، به بررسی فازی اثر تحریم‌های اقتصادی بر انتشار آلایندگی در ایران پرداخته است. هدف اصلی این پژوهش، فراتر از صرفاً شناسایی همبستگی‌ها، تبیین سازوکارهای اصلی انتقال اثر تحریم‌ها به محیط زیست و ارائه یک چارچوب تحلیلی قوی برای درک چگونگی تأثیرگذاری این محدودیت‌ها بر شاخص‌های آلایندگی است. این مطالعه نه تنها به پر کردن خلأ تحقیقاتی در زمینه پیامدهای زیست‌محیطی تحریم‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند مبنای ارزشمندی برای طراحی سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی پایدار در شرایط تحریم و پساتحریم باشد و به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای کاهش آسیب‌های وارده به محیط زیست، یاری رساند.

ساماندهی تحقیق حاضر بدین‌گونه است که پس از مقدمه، در بخش دوم ادبیات تحقیق ارائه شده است. بخش سوم به پیشینه تجربی موضوع اختصاص دارد. در بخش چهارم به روش‌شناسی اشاره خواهد شد. بخش پنجم به روش تحقیق و نتایج تجربی پرداخته و نهایتاً در بخش ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- ادبیات تحقیق

محیط زیست، به مثابه شریان حیاتی زمین، همواره کانون توجه اندیشمندان در جوامع مختلف بوده است. اهمیت این حوزه، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، با ظهور پدیده‌هایی چون تغییر اقلیم و بحران‌های زیست‌محیطی، ابعاد جدیدی یافته است. ریشه‌های نگرانی از تخریب محیط زیست را می‌توان در تحولات صنعتی و رشد جمعیت جهانی جست‌وجو کرد. از انقلاب صنعتی به بعد، با افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و گسترش صنایع، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها به‌شدت افزایش یافت که پیامدهای آن به‌تدریج در تغییرات اقلیمی، کاهش کیفیت هوا و آب، و از بین رفتن تنوع زیستی خود را نشان داد (IPCC[۲]2022). این دغدغه‌ها، ضرورت توجه به پایداری و حفاظت از محیط زیست را بیش از هر زمان دیگری آشکار کرده است.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change

با این حال، پیچیدگی و ابهام در روابط میان متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی، به‌ویژه در شرایط خاصی مانند تحریم، ضرورت به‌کارگیری ابزارهای تحلیلی قدرتمندتر را ایجاب می‌کند (Zadeh, 1965). همین پیچیدگی، خود را در چالش دوگانه مصرف انرژی نشان می‌دهد: با وجود اینکه پس از انقلاب صنعتی، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی به رشد بهره‌وری عوامل تولید منجر شده است، اما همین مصرف انرژی از طریق آلایندگی‌هایش، باعث تخریب محیط زیست گردیده است. دلیل اصلی این امر، آن است که بخش عمده‌ای از گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در جهان، به شکل دی‌اکسید کربن بوده که عمدتاً ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی است (Behbodi & Barghi Golghazani, 2008). بنابراین، بخش انرژی سهم بسزایی در مسائل مربوط به تغییرات محیط زیست دارد. از همین رو سیاست‌های انرژی و سیاست‌های زیست‌محیطی ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند(Shim, 2006).

عوامل متعددی در طول تاریخ به تخریب محیط زیست، دامن زده‌اند. یکی از بارزترین این عوامل، الگوهای رشد اقتصادی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه است. رشد اقتصادی فزاینده، هم باعث بهره‌برداری بیشتر از منابع طبیعی و زیست‌محیطی شده و هم به افزایش خروجی‌های نامطلوب و آلاینده‌ها منجر شده که همگی در فرسایش محیط زیست، نقش دارند.

برخی مطالعات نشان داده‌اند که بسیاری از کشورهای در حال توسعه، در مراحل اولیه پیشرفت، برای دستیابی به توسعه اقتصادی سریع، ناچار به اتخاذ رویکردهایی شده که اغلب بدون توجه کافی به پیامدهای زیست‌محیطی بوده‌اند (Grossman & Krueger, 1995).این شیوه، غالباً ناشی از کمبود منابع مالی و فناوری، ضعف قوانین و نهادهای نظارتی، و اولویت‌بخشی به جنبه‌های اقتصادی بر پایداری بوده است. نتیجه این رویکرد، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، آلودگی گسترده و تخریب اکوسیستم‌ها بوده است.

در این حوزه، مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مفهوم منحنی‌های زیست‌محیطی کوزنتس[۳] اشاره کرد. این مفهوم برای نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ مطرح شد و همزمان با بررسی اثرات احتمالی موافقت‌نامه تجارت آزاد آمریکای شمالی بر محیط زیست توسط گروسمن و کروگر[۴] (۱۹۹۱) و همچنین مطالعه شفیک و باندیوپادیا[۵](۱۹۹۲) که در گزارش توسعه جهانی ۱۹۹۲ منتشر شد، شکل گرفت. در این گزارش تأکید

[3] Environmental Kuznets Curves - EKC
[4] Grossman and Krueger
[5] Shafik and Bandyopadhyay

شد که اگر فناوری، سلایق و سرمایه‌گذاری در حوزه محیط زیست ثابت فرض شوند، گسترش فعالیت‌های اقتصادی بدون تردید به تخریب محیط زیست منجر خواهد شد. این یافته اهمیت حیاتی توجه به ابعاد زیست‌محیطی در تمامی برنامه‌ریزی‌های اقتصادی و توسعه‌ای را آشکار می‌سازد تا پایداری و سلامت اکوسیستم‌ها برای نسل‌های آتی تضمین شود.

در این بستر تاریخی، تحریم‌های اقتصادی نیز به‌عنوان ابزاری موثر در روابط بین‌الملل، پیامدهای گسترده‌ای فراتر از حوزه‌های صرفاً اقتصادی به دنبال داشته‌اند. هدف اصلی تحریم‌ها، اعمال فشار بر کشور هدف برای تغییر سیاست‌ها یا رفتارهای آن است (Peksen, 2009; Cooper, 2010). با این حال، مطالعه تجربه کشورهایی نظیر ایران، که موضوع این مقاله است، نشان می‌دهد که تحریم‌ها به‌طور ناخواسته، می‌توانند به تخریب بیشتر محیط زیست منجر شوند و بر انتشار آلایندگی در آن تأثیر بگذارند. این اثرگذاری از طریق کانال‌های زیر قابل تحلیل است.

۱. **محرومیت از فناوری‌های نوین و کاهش بهره‌وری انرژی:** ریشه‌یابی این مشکل به دهه‌ها قبل بازمی‌گردد؛ زمانی که پیشرفت‌های فناوری در کشورهای توسعه‌یافته، به‌سمت تولید پاک‌تر و کارآمدتر حرکت کرد. اما در شرایط تحریم، کشورهای هدف از دسترسی به این فناوری‌های پیشرفته و پاک، که می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و کنترل آلایندگی‌ها کمک کنند، محروم می‌شوند. این امر، صنایع داخلی را مجبور می‌کند تا از ماشین‌آلات و تجهیزات قدیمی، فرسوده و کم‌بازده استفاده کنند که مصرف انرژی بالایی دارند و آلاینده‌های بیشتری را منتشر می‌کنند (Balali, Farzanegan, Zamani, Baniasadi, 2024). این مسئله به‌ویژه در صنایع پرمصرفی چون نفت و گاز، پتروشیمی، و نیروگاه‌ها مشهود است؛ جایی که عدم به‌روزرسانی تجهیزات به دلیل تحریم، به افزایش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند دی‌اکسید کربن) و سایر آلاینده‌های هوا (مانند اکسیدهای گوگرد و نیتروژن و ذرات معلق) منجر می‌شود (Economic Research Forum, 2024). این وضعیت، علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، باعث وخامت کیفیت هوا و بروز مشکلات بهداشتی در شهرهای بزرگ می شود.

۲. **کاهش رقابت‌پذیری و افزایش انرژی‌بری تولیدات:** تاریخ اقتصاد نشان می‌دهد که رقابت، موتور محرکه نوآوری و بهره‌وری است. در شرایط تحریم، با کاهش رقابت آزاد و محدودیت دسترسی به بازارهای جهانی، تولیدکنندگان داخلی انگیزه‌ای برای سرمایه‌گذاری در بهبود بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی ندارند. این فقدان رقابت، سبب می‌شود که محصولات داخلی، اغلب با روش‌هایی کم‌بازده و پرمصرف تولید شوند (Farzanegan, Jabari, Salem, Zamani, 2024). به عنوان نمونه، در صنعت خودرو،

عدم دسترسی به فناوری‌های پیشرفته موتور و عدم رعایت استانداردهای جهانی، منجر به تولید خودروهایی با مصرف سوخت بالا و آلایندگی بیشتر می‌شود که تأثیر مستقیمی بر آلودگی هوای شهری دارند (Rahimi Fathkouhi, 2022).

۳. **کاهش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زیست‌محیطی:** سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های حیاتی زیست‌محیطی، همواره نیازمند منابع مالی و فناوری قابل توجهی بوده است. تحریم‌ها با ایجاد محدودیت‌های شدید مالی و فناوری، توانایی دولت‌ها و بخش خصوصی را برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های حیاتی زیست‌محیطی به شدت کاهش می‌دهند. این محدودیت‌ها نه تنها دسترسی به فناوری‌های نوین و دانش تخصصی لازم برای حفاظت از محیط زیست را دشوار می‌سازند، بلکه کمک‌های مالی و فنی بین‌المللی را نیز مسدود می‌کنند. در نتیجه، پروژه‌هایی نظیر توسعه تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، سیستم‌های مدیریت پسماند مدرن، و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر پاک، با چالش جدی مواجه می‌شوند. این وضعیت، کشور را در یک حالت بقا[6] قرار می‌دهد که در آن مسائل زیست‌محیطی از اولویت‌های اصلی سیاست‌گذاران خارج شده و تمرکز بر تأمین نیازهای اولیه اقتصادی است. این کاهش سرمایه‌گذاری حیاتی، به انباشت آلودگی‌های خطرناک در آب و خاک و عدم مدیریت صحیح پسماندها در بلندمدت منجر شده و سلامت عمومی و اکوسیستم‌ها را به خطر می‌اندازد (Madani, 2021).

٤. **تغییر در الگوی مصرف انرژی و اتکا به سوخت‌های آلاینده‌تر:** این پدیده، بازتابی از شرایط اضطراری است که تحریم‌ها ایجاد می‌کنند. وقتی واردات سوخت‌های باکیفیت استاندارد یا فناوری‌های نوین انرژی تجدیدپذیر دشوار می‌شود، کشور ناچار به اتکا بیشتر به منابع داخلی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی با کیفیت پایین‌تر و آلایندگی بیشتر می‌شود .این امر نه تنها به دلیل محدودیت در دسترسی به فناوری‌های پاک و بهینه‌سازی مصرف انرژی است، بلکه به دلیل فشارهای اقتصادی ناشی از تحریم‌ها که مانع سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی سبز می‌شوند نیز تشدید می‌گردد. این تغییر الگو به نوبه خود، به افزایش چشمگیر انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، که پیامدهای مستقیمی بر سلامت عمومی و محیط زیست دارد و چالش‌های زیست‌محیطی را پیچیده‌تر می‌کند (International Energy Agency, 2023).

۵. **ضعف نظارت و تشدید فرار از قوانین زیست‌محیطی:** تجربه تاریخی نشان می‌دهد که در شرایط بحران اقتصادی، پایبندی به استانداردهای زیست‌محیطی اغلب کاهش

[6] survival mode

می‌یابد. در دوران تحریم نیز، در شرایط دشوار اقتصادی، برخی صنایع ممکن است برای کاهش هزینه‌های تولید، به عدم رعایت استانداردهای زیست‌محیطی روی آورند. از سوی دیگر، محدودیت منابع مالی می‌تواند توانایی نهادهای نظارتی دولتی را برای پایش و اعمال دقیق قوانین زیست‌محیطی کاهش دهد (Madani, 2020a). این کاهش نظارت، به تخریب بیشتر محیط زیست دامن می‌زند.

در نهایت، تحریم‌ها می‌توانند به تغییرات در الگوی تولید و مصرف منجر شوند. به عنوان مثال، کشور ممکن است به سمت تولید داخلی کالاهایی با روش‌های کمتر کارآمد یا آلاینده‌تر حرکت کند. همچنین، مصرف‌کنندگان نیز به دلیل محدودیت‌ها ممکن است به سمت کالاهایی با کیفیت پایین‌تر و آلایندگی بیشتر روی آورند (Madani, 2020b).

به این ترتیب، تحریم‌های اقتصادی نه تنها چالش‌های عمیق اقتصادی را به همراه دارند، بلکه به‌عنوان یک تهدید جدی برای سلامت و پایداری محیط زیست نیز عمل می‌کنند و به‌طور مستقیم بر انتشار آلایندگی تأثیرگذارند. شناخت این کانال‌های اثرگذاری، برای تدوین سیاست‌های جامع و کارآمد به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری محیط زیست در مواجهه با تحریم‌ها، حیاتی است و نیازمند رویکردهای تحلیلی پیچیده‌تری است که بتواند ابهام و عدم قطعیت در روابط بین متغیرها را مدل‌سازی کند. این ضرورت، اهمیت استفاده از منطق فازی که یکی از جنبه های نوآوری مطالعه حاضر است را به‌عنوان ابزاری برای تحلیل این پیچیدگی‌ها، برجسته می‌سازد.

۳- پیشینه پژوهش

تحقیقات بسیاری در زمینه عوامل موثر بر آلودگی هوا و انتشار گازهای آلاینده، هم در داخل کشور و هم در خارج از آن، انتشار یافته است که در جدول زیر سعی شده است برخی از مهم‌ترین و البته نزدیک‌ترین مطالعات مربوط به عنوان پژوهش، ارائه گردد:

جدول ۱. مروری بر پیشینه تحقیق
منبع: یافته‌های پژوهش

Table 1. Overview of the research background
Source: Research results

محقق	موضوع	یافته‌ها
فلبرمایر و همکاران[7] (۲۰۲٤)	تحریم‌های اقتصادی: حقایق کلی و شواهد کمی	تحریم‌ها می‌توانند تأثیرات منفی و طولانی‌مدتی بر تجارت دوجانبه داشته باشند و همچنین می‌توانند مانع انتقال فناوری شوند که این موضوع به طور غیرمستقیم بر پیامدهای زیست‌محیطی اثر می‌گذارد.
جباری[8] و همکاران (۲۰۲٤)	تحریم‌های اقتصادی، بهره‌وری انرژی و اثرات زیست محیطی	افزایش شاخص تحریم‌ها به کاهش بهره‌وری انرژی در زیربخش‌های مختلف صنعتی می‌انجامد.
بوگیری[9] (۲۰۲۳)	آلودگی هوا: اثر تحریم‌ها و فرضیه‌های رقیب	تحریم‌های اقتصادی در ایران با آلودگی هوا مرتبط هستند، به طوری که همبستگی قابل توجهی با انتشار گازهایی مانند co_2دارد. این پژوهش بر اهمیت عوامل کلان اقتصادی در تبیین آلودگی هوا تأکید می‌کند.
مدنی[10] (۲۰۲۱)	آیا تحریم‌های بین‌المللی بر محیط زیست ایران تأثیر گذاشته‌اند؟	تحریم‌های اقتصادی در چهار دهه اخیر، پیامدهای زیست‌محیطی ناخواسته و قابل توجهی برای ایران داشته‌اند. این تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی ایران به فناوری و کمک‌های بین‌المللی و افزایش وابستگی اقتصاد به منابع طبیعی، تولید را از نظر زیست‌محیطی پرهزینه‌تر کرده است.
ماربو و گرن[11] (۲۰۲۱)	بررسی تاثیر سرمایه اجتماعی و آموزشی بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن در کشور سوئد	بهبود سرمایه اجتماعی و آموزش نیروی انسانی موجب کاهش آلودگی هوا شده و همچنین فرضیه زیست محیطی کوزنتس با در نظر گرفتن متغیرهای سرمایه انسانی و سرمایه اجتماعی در کشور مورد بررسی، صدق می‌کند.
مدنی (۲۰۲۰a)	ایران تحت تحریم: پیامدهای زیست محیطی ناخواسته	تحریم‌های اقتصادی، اگرچه هدفشان سیاسی است، اما تخریب محیط زیست در ایران را به شدت تشدید کرده‌اند. این امر با محدود کردن دسترسی به فناوری‌های پاک، افزایش آلودگی صنعتی و تضعیف نظارت‌های زیست‌محیطی اتفاق افتاده است.

[7] Felbermayr et al
[8] Jabari et al
[9] Bogheriy
[10] Madani
[11] Marbuah & Gren

محقق	موضوع	یافته‌ها
لین و همکاران[۱۲] (۲۰۰۹)	اثر جمعیت، شهرنشینی، سطح صنعتی شدن و شدت انرژی بر اثرات زیست محیطی کشور چین	درآمد سرانه و جمعیت، بالاترین تاثیر را بر محیط زیست دارند و اثرات سطح شهرنشینی و صنعتی شدن نیز بر محیط زیست، معنی‌دار است.
عالم و همکاران (۲۰۰۷)[۱۳]	توسعه پایدار در پاکستان در بستر تقاضای مصرف انرژی و تخریب محیط زیست	افزایش تولید ناخالص داخلی (GDP) و شدت مصرف انرژی منجر به افزایش آلودگی محیط زیست، به‌ویژه انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) شده است. به بیان ساده‌تر، با رشد اقتصادی و افزایش مصرف متمرکز انرژی در کشور پاکستان، انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز بیشتر شده است.
تول و همکاران[۱۴] (۲۰۰۶)	درک بلندمدت مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در ایالات متحده آمریکا	نتایج نشان داد که افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش شدت انتشار CO_2 شده است. همچنین، رشد جمعیت، رشد اقتصادی و افزایش مصرف برق نیز به عنوان عوامل مؤثر بر انتشار CO_2 شناسایی شدند.
دیتز و روزا[۱۵] (۱۹۹۷)	تأثیر جمعیت و ثروت بر انتشار دی‌اکسید کربن	نتایج این تحقیق نشان داد که کشش انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2)و مصرف انرژی تقریباً برابر با یک است. این بدان معناست که هرگونه تغییر در مصرف انرژی تقریباً به همان نسبت در انتشار CO_2 منعکس می‌شود. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن بود که با افزایش جمعیت، میزان انتشار دی‌اکسید کربن نیز افزایش می‌یابد.
منصوری و همکاران (۱۴۰۴)	بررسی تأثیر بهره‌وری انرژی و رشد اقتصادی بر انتشار دی‌اکسید کربن در ایران	در بلندمدت اثرگذاری بهره‌وری انرژی و رشد اقتصادی بر انتشار دی اکسید کربن مثبت و معنادار است.
فتوره‌چی و همکاران (۱۴۰۲)	تاثیر سرمایه انسانی بر کیفیت محیط زیست در کشورهای در حال توسعه	سرمایه انسانی از عوامل تاثیرگذار در پیشرفت اقتصادی (هم زمان با رسیدن به آستانه تاثیر منفی آلودگی زیست‌محیطی بر رشد اقتصادی در بخش میانی منحنی کوزنتس) است. کمبود در سرمایه گذاری در سرمایه انسانی عامل اصلی روند نزولی رشد اقتصادی در کشورهای درحال توسعه است.

[12] Lin et al
[13] Alam et al
[14] Tol
[15] Dietz & Rosa

محقق	موضوع	یافته‌ها
مصطفوی و همکاران (۱۳۹٤)	بررسی رابطه علیت تحریم های اقتصادی، متغیرهای کلان اقتصادی و آلاینده های زیست محیطی در ایران	رابطه علّی معنی‌داری از سوی تحریم‌های اقتصادی با متغیرهای کلان اقتصادی و همچنین با انتشار گازهای آلاینده وجود دارد. حل مشکل تحریم‌ها می‌تواند راهکاری برای کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و افزایش ارزش افزوده بخش‌های مختلف در اقتصاد ایران باشد.
بهبودی و برقی‌گلعذانی (۱۳۸۷)	اثرات زیست‌محیطی مصرف انرژی و رشد اقتصادی در ایران	مصرف انرژی و رشد اقتصادی تأثیر مثبتی بر انتشار دی‌اکسید کربن و آلودگی هوا در ایران دارند.
صادقی و سعادت (۱۳۸۳)	رشد جمعیت، رشد اقتصادی و اثرات زیست محیطی در ایران	رشد جمعیت به طور یک‌طرفه بر تخریب محیط زیست تأثیر گذاشته است. به عبارت دیگر، افزایش جمعیت مستقیماً به تخریب محیط زیست منجر شده، اما تخریب محیط‌زیست تأثیر متقابلی بر رشد جمعیت نداشته است.

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که وجه تمایز تحقیق حاضر، به‌کارگیری رویکرد فازی و ارائه تحلیلی جامع و نو از تأثیر تحریم‌های اقتصادی بر آلایندگی در ایران است. این تمایز اصلی، امکان بررسی دقیق‌تر عدم‌قطعیت و پیچیدگی روابط را فراهم آورده است. در حالی که مطالعات پیشین به طور مجزا بر تحریم‌ها یا عوامل دیگر تمرکز داشته‌اند، این پژوهش با ادغام همزمان چندین متغیر کلیدی در یک مدل فازی، درک عمیق‌تری از تعاملات و پیامدهای زیست‌محیطی در بستر تحریم‌ها ارائه می‌کند. این رویکرد، بینش‌های عملی‌تر و واقع‌بینانه‌تری برای سیاست‌گذاری محیط زیست در ایران فراهم می‌سازد.

۴- مدل و روش

هدف مطالعه حاضر بررسی اثر تحریم‌های اقتصادی بر میزان انتشار گازهای آلاینده در ایران است. بدیهی است که عوامل بسیاری در انتشار گازهای آلاینده دخیل‌اند که قطعاً نمی‌توان همه آنها را در قالب یک الگوی نظری ارائه داد، اما با توجه به قسمت مبانی نظری و با بهره‌گیری از نتایج مطالعات مرورشده و با مبنا قراردادن مطالعات لین و همکاران (۲۰۰۹) و ماربو و گرن (۲۰۲۱) و در نظر گرفتن تعدیلاتی برای کشور ایران، مدل پایه پژوهش حاضر به صورت زیر تنظیم شده است:

$$Co_2 = f\left(GDP, POP, HC, EN, IN, K\right) \quad (۱)$$

جدول ۲. شرح مشخصات متغیرها، واحد و منبع داده‌ها
منبع: یافته‌های پژوهش

Table 2. Description of the characteristics of the variables, unit and data source
Source: Research results

نماد	متغیر	شرح متغیر	واحد	مرجع جمع‌آوری داده
Co_2	میزان آلودگی هوا	میزان انتشار سرانه دی اکسید کربن	کیلو تن	ترازنامه‌های سالانه انرژی وزارت نیرو
GDP	درآمد سرانه	درآمد سرانه به قیمت ثابت سال ۱۳۹۵	میلیون ریال	مرکز آمار ایران –داده‌ها و اطلاعات آماری – حساب های منطقه‌ای
POP	جمعیت	جمعیت کشور بر مبنای سرشماری سال ۱۳۹۵	نفر	مرکز آمار ایران –داده ها و اطلاعات آماری – حساب های منطقه‌ای
HC	سرمایه انسانی	نسبت تعداد دانش آموختگان دانشگاهی به جمعیت	درصد	مرکز آمار ایران – سالنامه آماری
EN	میزان مصرف انرژی	میزان انرژی مصرف شده در کشور	کیلوگرم معادل نفت خام	ترازنامه‌های سالانه انرژی وزارت نیرو
IN	سطح صنعتی شدن	نسبت ارزش افزوده بخش صنعت تقسیم به تولید ناخالص داخلی	درصد	مرکز آمار ایران- داده ها و اطلاعات آماری – حساب های منطقه‌ای
K	نماد تحریم	معرف تحریم‌های قوی اعمال شده علیه کشور ایران طی دوره مورد مطالعه[۱۶]	بدون واحد	موسسه اقتصاد بین‌الملل پترسون[۱۷]

با توجه به اینکه متغیرهای فوق، دارای واحدهای مختلفی هستند، جهت بررسی بهتر و یکدست شدن متغیرهای مدل، همه داده‌ها به صورت لگاریتم طبیعی وارد مدل گردیده‌اند.

[۱۶] در این مطالعه از نحوه تقسیم‌بندی تحریم‌های اقتصادی مطابق تقسیم‌بندی موسسه اقتصاد بین‌الملل پترسون استفاده شده است که تحریم‌های اعمال شده علیه ایران را به سه دسته خفیف (۱۳۷۳-۱۳۷۰)، متوسط (۱۳۸۴-۱۳۷۴) و (۱۳۹۶-۱۳۹۴) و قوی (۱۳۹۳-۱۳۸۵) و (۱۴۰۲-۱۳۹۷) تفکیک کرده است. در این مقاله صرفاً تحریم‌های اقتصادی قوی مدنظر بوده است.

[17] Peterson Institute for International Economics.

شایان ذکر است که در این مقاله از کدنویسی برنامه‌ریزی خطی فازی در فضای نرم‌افزار MATLAB[14] استفاده شده است.

۱-۴- رگرسیون فازی

منطق فازی، که توسط پروفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد، یک چارچوب ریاضی قدرتمند برای مدل‌سازی و استدلال در شرایط عدم قطعیت، ابهام، و عدم دقت است (Zadeh, 1965). برخلاف منطق کلاسیک که تنها مقادیر "درست" یا "غلط" (۰ یا ۱) را می‌پذیرد، منطق فازی به متغیرها اجازه می‌دهد تا درجات عضویت مختلفی در مجموعه‌های فازی داشته باشند و به این ترتیب، امکان بیان روابطی با مقادیر بینابینی را فراهم می‌آورد.

در حوزه رگرسیون کلاسیک، ما با سه کمیت اصلی سروکار داریم: متغیر وابسته، متغیرهای مستقل و پارامترها. اما در عمل، جذابیت رگرسیون فازی در این است که هر یک از این اجزا می‌توانند فازی یا قطعی (عادی) باشند. این گوناگونی در ماهیت داده‌های ورودی (مشاهدات و متغیرهای مستقل) و نیز پارامترها، به تنوع چشمگیر مدل‌های رگرسیون فازی منجر می‌شود. جدول (۱) که توسط زمانی‌نجف‌آبادی در سال ۱۳۹۹ تهیه شده، این دسته‌بندی را به وضوح نشان می‌دهد:

جدول ۳. انواع رگرسیون فازی
منبع: زمانی‌نجف‌آبادی (۱۳۹۹)

Table 3. Types of Fuzzy Regression
Source: Zamani Najafabadi (2019)

نوع رگرسیون	متغیرهای مستقل	متغیر وابسته	ساختار
(N,N,F)	غیرفازی (Non Fuzzy)	غیرفازی (Non Fuzzy)	فازی
(N,F,F)	غیرفازی (Non Fuzzy)	فازی (Fuzzy)	فازی
(F,F,F)	فازی (Fuzzy)	فازی (Fuzzy)	فازی

تاناکا[18] (۱۹۹۲) پیشگام معرفی رگرسیون با ضرایب فازی بود. این رویکرد، که گاهی از آن با عنوان برنامه‌ریزی خطی با اعداد فازی نیز یاد می‌شود، به جای استفاده از ضرایب ثابت و قطعی، از اعداد فازی در مدل‌سازی بهره می‌گیرد (Naji Azimi, 2016).

[18] Tanaka

الگوهای رگرسیون با ضرایب فازی را غالباً الگوهای رگرسیون امکانی نیز می‌نامند. این نام‌گذاری از آن روست که خطای الگو در قالب توزیع‌های امکانی ضرایب جای می‌گیرد. در این نوع رگرسیون، با وجود دقت مشاهدات و متغیرها، ابهام اصلی در خود الگو و پارامترهای رگرسیون متمرکز است. تاکید می‌گردد که در این مطالعه از مدل الگوی رگرسیون امکانی (N,N,F) استفاده شده و به همین جهت در ادامه، مدل الگوی رگرسیون امکانی تشریح شده است.

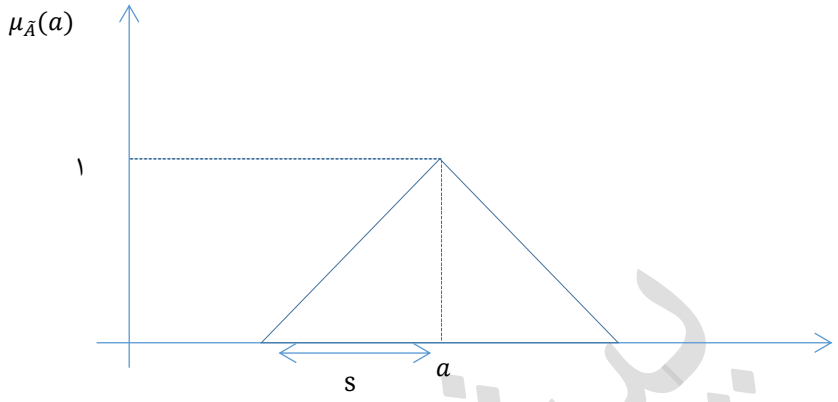
اگر Y را متغیر وابسته و X_1، X_2،...، X_p را متغیرهای مستقل در نظر بگیریم و تعداد مشاهدات را n بنامیم. فرم کلی الگوی رگرسیون فازی، به شکل رابطه (۲) قابل بیان است:

$$\tilde{Y} = f(X, A) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 X_1 + \tilde{A}_2 X_2 + \ldots + + \tilde{A}_p X_p \qquad (۲)$$

هدف نهایی، برآورد بهینه پارامترهای الگو یعنی $\widetilde{A_0}$، $\widetilde{A_1}$، $\widetilde{A_2}$،...، $\widetilde{A_p}$ است تا بهترین برازش ممکن برای داده‌ها حاصل شود. برای دستیابی به این پارامترها، از تابع عضویت مثلثی متقارن استفاده شده که در رابطه (۳) تعریف می‌شود. گرچه توابع عضویت دیگری نظیر نرمال نیز می‌توانند به کار روند، اما در این پژوهش، تمرکز بر تابع عضویت مثلثی متقارن است. تابع عضویت مثلثی متقارن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{A}(X) = \begin{cases} 1 - \dfrac{a - x}{s}, & a - s \le X \le a \\ a + \dfrac{a + x}{s}, & a < X \le a + s \end{cases} \qquad (۳)$$

رابطه (۳) نشان می‌دهد که تابع عضویت مثلثی متقارن را می‌توان به شکل یک مثلث متساوی‌الساقین نشان داد:



نمودار ۱. عدد مثلثی فازی $\tilde{A}$

a مقدار میانه و s پهنای $\tilde{A}$ را مشخص می‌کند. پارامتر s به عنوان مقیاس گستردگی، میزان فازی بودن عدد را نشان می دهد. یعنی هرچه s بزرگتر باشد، ابهام یا فازی بودن عدد بیشتر است. این مفهوم در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است. بر این اساس، خروجی رگرسیون رابطه (۲) می‌تواند به فرم رابطه (٤) ارائه شود:

$$\tilde{Y} = (a_0, s_0) + (a_1, s_1)X_1 + (a_2, s_2)X_2 + \ldots + (a_p, s_p)X_p \qquad (۴)$$

سپس، تابع عضویت متغیر خروجی رگرسیون رابطه (۲) به شرح رابطه (۵) حاصل می‌شود:

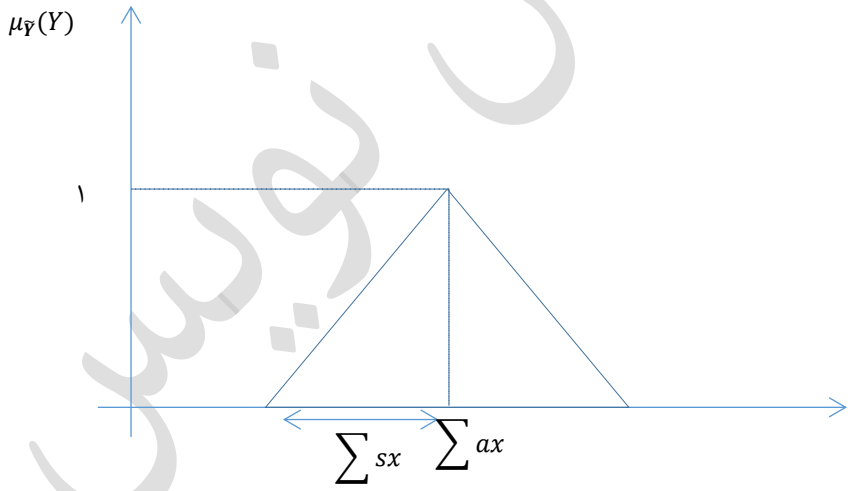
$$\mu_{\tilde{Y}} = \begin{cases} \max\left(\min\left\{\tilde{A}(X)\right\}\right) & \left\{X \mid Y = f(X, a)\right\} = \Phi \\ otherwise \end{cases} \qquad (۵)$$

با جایگزینی رابطه (۵) در رابطه (۳)، رابطه (٦) بدست می‌آید:

$$\mu_{\tilde{Y}}(Y)=\begin{cases}1-\dfrac{\left|Y-\sum_{i=1}^{n}a_i X_i\right|}{\sum_{i=1}^{n}S_i\left|X_i\right|} & X_i\neq 0\\ 1 & X_i=0,\ Y=0\\ 0 & X_i=0,\ Y\neq 0\end{cases} \qquad (۶)$$

رابطه (٦) تابع عضویت ضرایب مرکز و پهنای هر کدام از متغیرهای کنترل را نشان می‌دهد.

$\mu_{\tilde{Y}}(Y)$ به‌صورت شکل زیر قابل نمایش است:



نمودار ۲. تابع عضویت $\mu_{\tilde{Y}}(Y)$

هنگامی که با داده‌های غیرفازی مواجه هستیم، رگرسیون فازی به یک الگوی برنامه‌ریزی خطی تبدیل می‌شود. در این وضعیت، هدف الگوی رگرسیون، تعیین بهینه مقدار پارامترهای $\tilde{A}$ است این بهینه‌سازی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که مجموعه فازی

خروجی الگوی رگرسیون شامل (Y_i) دارای درجه عضویت بزرگتر یا مساوی h باشد. مطابق با رابطه (۷):

$$\mu_{\tilde{Y}_i}(Y_i) \geq h \qquad (۷)$$

متغیر h عددی بین صفر و یك است. با افزایش آن، فازی‌بودن خروجی‌ها نیز بیشتر می‌شود (Barghi-Asgoui & Shokri, 2018). عامل h معیاری برای نیکویی برازش و سازگاری داده‌ها با مدل برازش‌شده است. افزایش عامل h به پهن‌تر شدن بازه فازی کمک می کند و موجب می‌شود داده‌های خارج از نمونه نیز در این بازه جای گیرند با این حال، این پهنای بیشتر، تفسیر نتایج را دشوارتر می‌سازد. (Asgari Dehabadi & Suri, 2013)

با توجه به توضیحات ارائه شده، می‌توان تابع هدف و قیود مربوط به تابع برنامه‌ریزی خطی فازی را به شکل زیر بیان کرد:

$$0 = \min \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{n} S_i X_{ij} \qquad (۸)$$

$$Y_i \leq \sum_{i=1}^{p} a_i X_{ij} + (1-h) p \sum_{i=1}^{p} S_i X_{ij} \qquad (۹)$$

$$Y_i \geq \sum_{i=1}^{p} a_i X_{ij} + (1-h) p \sum_{i=1}^{p} S_i X_{ij} \qquad (۱۰)$$

در این مجموعه، رابطه (۸) بیانگر تابع هدف و روابط (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده قیود الگوی برنامه‌ریزی فازی هستند (Khodaei, 2011).

با در نظر گرفتن مطالب شرح داده شده در این بخش، شکل رگرسیون فازی مناسب برای الگوی پژوهش (که در رابطه (۱) اشاره شده) در معادله (۱۱) ارائه می‌شود:

$$Co_2 = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 GDP + \tilde{A}_2 POP + \tilde{A}_3 HC + \tilde{A}_4 EN + \tilde{A}_5 IN + \tilde{A}_6 K \qquad (۱۱)$$

با توجه به رابطه (٤)، معادله (۱۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Co_2 = (a_0, s_0) + (a_1, s_1)GDP + (a_2, s_2)POP + (a_3, s_3)HC + (a_4, s_4)EN + (a_5, s_5)IN + (a_6, s_6)K \quad (۱۲)$$

۵- تخمین و تحلیل یافته‌ها

در این بخش از پژوهش تخمین و تحلیل یافته‌ها ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از برآورد مدل در جدول (۴) ارائه شده‌است.

جدول ۴. نتایج برآورد ضرایب فازی
مأخذ: نتایج پژوهش

Table 4. *Results of estimating fuzzy coefficients*
Source: Research results

مشخصات		a_i	s_i	حداکثر اثرگذاری	حداقل اثرگذاری
عرض از مبدأ		۶/۰۳۱۲	۰/۳۷۵۷	۶/۴۰۶۹	۵/۶۵۵۵
GDP	درآمد سرانه	۰/۹۳۰۱	۰/۰۰۰۹	۰/۹۳۱۰	۰/۹۲۹۲
POP	جمعیت	۱/۱۳۲۷	۰/۰۳۹۲	۱/۱۷۱۹	۱/۰۹۳۵
HC	سرمایه انسانی	-۰/۰۳۶۸	۰/۰۲۶۴	-۰/۰۱۰۴	-۰/۰۶۳۲
EN	میزان مصرف انرژی	۱/۰۵۰۱	۰/۰۰۹۷	۱/۰۵۹۸	۱/۰۴۰۴
IN	سطح صنعتی شدن	۱/۳۰۰۳	۰/۰۱۴۱	۱/۳۱۴۴	۱/۲۸۶۲
K	نماد تحریم	۱/۱۰۷۳	۰/۰۶۷۷	۱/۱۷۵۰	۱/۰۳۹۶

طبق جدول (٤) برای هر متغیر کنترلی که وارد الگوی فازی شده است، متوسط ضریب تاثیر برابر a_i، حداقل اثرگذاری برابر $a_i - s_i$ و حداکثر ضریب اثرگذاری نیز $a_i + s_i$ است که در دو ستون جداگانه نشان داده شده‌اند. طبق مدل متغیر اولی که وارد الگو شده درآمد سرانه است. ضریب فازی این متغیر یعنی (۰/۰۰۰۹، ۰/۹۳۰۱) بیانگر این است که درآمد سرانه تاثیر مثبتی بر انتشار گاز آلاینده دی‌اکسید کربن در ایران دارد. تاثیر مثبت افزایش درآمد سرانه روی انتشار گاز دی‌اکسیدکربن نشان دهنده این است که رشد اقتصادی به طور اجتناب‌ناپذیری موجب بروز آسیب‌های محیط زیستی و انتشار بیشتر آلاینده‌ها می‌شود. از منظر دیگر هم با توجه به این تاثیرگذاری مثبت، می‌توان ادعا کرد که کشور ایران همچنان در قسمت صعودی منحنی کوزنتس قرار دارد که می‌تواند اشاره به کارآیی و بازدهی پایین در فعالیت‌های اقتصادی کشور ایران داشته باشد. یافته‌های پژوهش حاضر با یافته‌های

مطالعات عالم و همکاران[19](۲۰۰۷)، لین و همکاران[20] (۲۰۰۹)، و منصوری و همکاران (۱٤۰٤) سازگار و منطبق می باشد. همچنین مطابق این ضریب می‌توان گفت که اگر درآمد سرانه یک درصد افزایش یابد، انتظار می‌رود که انتشار گاز دی اکسید کربن در حالت متوسط به میزان ۰/۹۳۰۱ درصد، در حالت حداکثری به میزان ۰/۹۳۱۰ درصد و در حالت حداقلی به میزان ۰/۹۲۹۲ درصد، افزایش یابد.

با توجه به خروجی مدل ارتباط بین رشد جمعیت و انتشار آلودگی هوا در ایران بسیار قوی، معنادار و مثبت است. ضریب فازی برای این متغیر برابر با (۰/۰۳۹۲، ۱/۱۳۲۷) است. در تفسیر این ضریب فازی می‌توان گفت که با افزایش جمعیت، بدیهی است که نیاز جمعیت به انرژی بیشتر نیز افزایش می‌یابد که این امر باعث استفاده بیشتر از سوخت‌های فسیلی و به تبع افزایش انتشار گازهای آلاینده‌ای هم‌چون گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود. یافته‌های بدست آمده پژوهش حاضر با یافته‌های پژوهش صادقی و سعادت (۱۳۸۳)، لین و همکاران[21] (۲۰۰۹) و دیتز و روزا[22] (۱۹۹۷) سازگار و هم جهت می‌باشد.

مطابق جدول (٤) شاخص سرمایه انسانی (HC) که معرف نسبت تعداد دانش‌آموختگان دانشگاهی به کل جمعیت است با ضریب مثلثی فازی (۰/۰۲٦٤، ۰/۰۳٦۸-) تأثیری منفی اما غیرقابل‌توجه بر انتشار آلودگی هوا در ایران داشته‌است. در تفسیر منفی بودن این ضریب می‌توان عنوان کرد که نقش سرمایه انسانی و ارتقای رشد و آگاهی افراد جامعه در کاهش انتشار آلاینده‌ها، مورد تأکید است. اما از طرف دیگر، کوچک و غیرقابل‌توجه بودن این ضریب نشان‌دهنده این است که احتمالاً در کشور ایران بیشتر نگاه کمّی و نه کیفی به تعداد فارغ‌التحصیلان دانشگاهی، وجود دارد. موید این نگاه کثرت و تعداد زیاد مراکز آموزش عالی در کشور ایران در مقایسه با کشورهای با جمعیت تقریباً مشابه است. نتیجه این قسمت از مطالعه حاضر با نتیجه مطالعات مارپو و گرن[23] (۲۰۲۱) و فتوره‌چی و همکاران (۱٤۰۲) منطبق است.

میزان مصرف انرژی (EN) متغیر بعدی است که وارد مدل گردیده و اثری قوی و مثبت بر انتشار آلودگی هوا در ایران، نشان داده‌است. این ضریب فازی نشان می‌دهد که حداکثر اثرگذاری میزان مصرف انرژی بر انتشار آلودگی هوا برابر از ۱/۰۵۹۸ بوده و حداقل

---

[19] Alam et al
[20] Lin et al
[21] Lin et al
[22] Dietz & Rosa
[23] Marbuah & Gren

اثرگذاری آن نیز برابر ۱/۰٤۰٤ خواهد شد. از مرکز این عدد فازی نیز می‌توان نتیجه گرفت که متوسط اثرگذاری آن برابر ۱/۰۵۰۱ است. این ضریب مطابق پشتوانه نظری موضوع نیز هست. زیرا با افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، انتظار می‌رود که گازهای آلاینده بیشتری آزاد شوند؛ که مطابق مطالعه مظفری و متفکرآزاد (۱۳۹۸)، دی‌اکسیدکربن حدود ۹۷ درصد از این گازها را به خود اختصاص می‌دهد. این یافته با مطالعه بهبودی و برقی گلعذانی (۱۳۸۷) تطابق دارد، همچنین عالم و همکاران [۲٤](۲۰۰۷) و تول و همکاران[۲۵] (۲۰۰٦) به وضوح نشان می‌دهند که ارتباط مثبت و قوی میان مصرف انرژی و آلودگی هوا وجود دارد.

متغیر سطح صنعتی شدن (IN) که معرف نسبت ارزش افزوده بخش صنعت به تولید ناخالص داخلی است با ضریب فازی (۰/۰۱٤۱، ۱/۳۰۰۳)، تأثیری مثبت و قابل توجه بر انتشار گاز دی‌اکسید کربن در کشور دارد. این ضریب فازی نشان می دهد که به طور متوسط، یک درصد افزایش در نسبت ارزش افزوده بخش صنعت به تولید ناخالص داخلی، میزان انتشار گاز دی اکسید کربن را به میزان ۱/۳۰۰۳ درصد افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. یکی اینکه صنایع ایران بیشتر انرژی‌بر هستند. زیرا که نظام یارانه‌ای ایران در طول چندین دهه گذشته موجب وابستگی زیاد صنایع به انرژی ارزان قیمت شده است. از طرف دیگر احتمالاً صنایع داخلی، از ماشین‌آلات و تجهیزات قدیمی، فرسوده و کم‌بازده استفاده می‌کنند که مسلماً مصرف انرژی بالایی دارند و آلاینده‌های بیشتری را نیز منتشر می‌کنند. این افزایش آلایندگی ناشی از صنعتی شدن، به خصوص در بافت اقتصادی ایران، می‌تواند ارتباط تنگاتنگی با تأثیر تحریم‌ها داشته باشد. زیرا تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی ایران به فناوری‌های نوین، قطعات یدکی پیشرفته و سرمایه‌گذاری خارجی، توانایی صنایع را برای به‌روزرسانی تجهیزات، بهبود فرآیندهای تولید و حرکت به سمت روش‌های کم‌مصرف و پاک‌تر انرژی، تضعیف می‌کنند. بنابراین، در شرایطی که صنعتی شدن به خودی خود منجر به افزایش آلایندگی می‌شود، تحریم‌ها این مشکل را با کاهش بهره‌وری انرژی و حفظ وابستگی به صنایع قدیمی‌تر و آلاینده‌تر، تشدید می‌کنند. این یافته هم‌جهت با یافته‌های جباری و همکاران[۲٦] (۲۰۲٤) و فلبرمایر و همکاران[۲۷] (۲۰۲٤) است.

---

[24] Alam et al

[25] Tol et al

[26] Jabari et al

[27] Felbermayr et al

تحریم‌های اقتصادی اعمال شده علیه کشور ایران که با نماد (K) وارد مدل شده‌اند، با ضریب (۰/۰٦۷۷، ۱/۱۰۷۳)، اثری مثبت و قابل توجه بر حجم انتشار آلودگی هوا در ایران نشان داده‌اند. این ضریب مطابق پشتوانه نظری موضوع است. زیرا در شرایط تحریم، با کاهش رقابت آزاد و محدودیت دسترسی به بازارهای جهانی، تولیدکنندگان داخلی، اغلب با روش‌هایی کم‌بازده و پرمصرف، تولید می‌کنند. از طرف دیگر تحریم‌ها با ایجاد محدودیت‌های مالی و فناوری، توانایی دولت‌ها و بخش خصوصی را برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های حیاتی زیست‌محیطی کاهش می‌دهند. همچنین، تحریم‌ها موجب می‌شوند که واردات سوخت‌های باکیفیت یا فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به کشور دشوار شود، طبیعتاً در این شرایط اتکا بیشتر به منابع داخلی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی با کیفیت پایین‌تر و آلایندگی بالاتر، بیشتر می‌شود. همچنین از منظری دیگر نیز تجربه نشان داده است که در شرایط تحریم بخاطر محدودیت منابع مالی نهادهای نظارتی، برخی صنایع ممکن است برای کاهش هزینه‌های تولید، به عدم رعایت استانداردهای زیست‌محیطی روی آورند که این موضوع نیز می‌تواند به انتشار بیشتر گازهای آلاینده، دامن بزند. این با مطالعات بوگیری[28] (۲۰۲۳)، مدنی[29] (۲۰۲۱ و ۲۰۲۰a) و مصطفوی و همکاران (۲۰۱۵) تطابق دارد. همچنین، فلبرمایر و همکاران[30] (۲۰۲٤) در مطالعه خود نشان می‌دهند که تحریم‌ها می‌توانند انتقال فناوری را مهار کنند که به طور غیرمستقیم بر نتایج زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد؛ این امر می‌تواند با وابستگی به فناوری‌های قدیمی و پرمصرف در ایران، هم‌راستا باشد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر بررسی فازی اثر تحریم‌های اقتصادی بر انتشار آلایندگی در ایران بوده است. در چرایی استفاده از رویکر فازی در این مطالعه باید اشاره کرد که چون مطالعات تجربی نشان داده‌اند که عوامل مرئی و نامرئی مختلفی در انتشار آلاینده‌ها دخیل‌اند و بخاطر محدودیت‌های مدلسازی نمی‌توان همه آنها را در یک مدل در نظر گرفت، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با نادیده گرفتن برخی عوامل، مدلی که دارای ابهام و عدم‌قطعیت است، بوجود می‌آید. در چنین شرایطی بهره‌گیری از متدولوژی رگرسیون فازی، یک مزیت و امتیاز مهم محسوب می‌شود. زیرا این روش می‌تواند عدم‌قطعیت و ابهام را در درون خود مدل، هضم نماید و پاسخ‌های که به مراتب به واقعیت نزدیک‌تر هستند، ارائه کند.

---

[28] Bogheiry
[29] Madani
[30] Felbermayr & others

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در ایران، عوامل متعددی بر افزایش آلایندگی هوا تأثیر دارند. درآمد سرانه و رشد جمعیت با افزایش نیاز به انرژی و فعالیت‌های اقتصادی، موجب رشد انتشار آلاینده‌ها می‌شوند که بیانگر قرار گرفتن ایران در قسمت صعودی منحنی کوزنتس است. همچنین، میزان مصرف انرژی مستقیماً و به شدّت با آلودگی هوا مرتبط است.

از زاویه‌ای دیگر این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که سطح صنعتی شدن، تأثیر مثبتی بر آلایندگی دارد و این موضوع ارتباط تنگاتنگی با تحریم‌ها نیز پیدا می‌کند؛ زیرا تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی به فناوری‌های نوین، قطعات یدکی و سرمایه‌گذاری خارجی، صنایع را ناچار به استفاده از ماشین‌آلات قدیمی و پرمصرف کرده و بهره‌وری انرژی را کاهش می‌دهند. از طرف دیگر، تحریم‌های اقتصادی به صورت مستقیم نیز به‌طور قابل توجهی موجب افزایش آلودگی هوا در ایران شده‌اند. این اثر به دلیل انزوای تجاری و کاهش رقابت‌پذیری صنایع و بنگاه‌ها، تولید غیربهره‌ور، محدودیت‌های مالی و تکنولوژیکی در سرمایه‌گذاری‌های زیست‌محیطی، دشواری واردات سوخت باکیفیت و فناوری‌های تجدیدپذیر و تضعیف نظارت نهادها، است. در نهایت، سرمایه انسانی اگرچه تأثیر منفی بر آلایندگی دارد، اما این تأثیر ناچیز است که می‌تواند به رویکرد کمی و نه کیفی به آموزش عالی اشاره کند.

Acknowledgments: The author would like to thank all individuals and institutions that assisted in this research.

Conflict of Interest: The author declares that there is no conflict of interest in the publication of the presented article.

Funding: The author(s) received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

۷- منابع

Reference

Abolhasani Hastiani, A., Elmi Moghaddam, M., Mansouri, N., & Amini Milani, M. (2022). Investigating the Impact of Economic Sanctions on Inflation Rate in Iran (Fuzzy Approach). *Quarterly Journal of Fiscal and Economic Policies*, *10*(38), 187-235. [In Persian].

Alam, S., Ambreeen, F., & Muhammad, B. (2007). Sustainable development in Pakistan in the context of energy consumption demand and environmental degradation. *Journal of Asian Economics*, *18*(6), 825–837.

Asgari Dehabadi, M. M., & Suri, A. (2013). Estimation of Iran's inflation function in order to improve policy making in economic sanctions conditions using fuzzy regression. Paper presented at the International Conference on Economics under Sanctions, Babolsar, Iran. [In Persian].

Barghi-Asgoui ,M. M, Shokri, Mostafa (2018). Study of economic factors affecting the attraction of foreign direct investment in Iran with emphasis on the role of income tax (fuzzy approach). Economic Growth and Development Research, Year 9, No. 33, pp. 109-120. [In Persian].

Balali, H., Farzanegan, M. R., Zamani, O., & Baniasadi, M. (2024). Economic sanctions, energy consumption, and CO2 emissions in Iran: A system dynamics model. *Policy Studies*, *24*(7), 896–912. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01442872.2024.2358842

Behbodi, D. & Barghi Golghazani, A. (2008). Environmental impacts of energy consumption and economic growth in Iran. *Quarterly Journal of Quantitative Economics (formerly Economic Studies)*, *5*(4). [In Persian].

Bogheiry, A. (2023). Air pollution: Sanctions' effect and rival hypotheses. *Center for Strategic Research*, *13*(1), Issue 35. [In Persian].

Caruso, R. (2003). The impact of international economic sanctions on trade: An empirical analysis. *Peace Economics, Peace Science, and Public Policy*, *9*(36-1,2).

Cooper, D. A. (2010). Coercive or corrosive: The negative impact of economic sanctions on democracy. *International Interactions*, *36*(3), 12–30. http://ssrn.com/abstract=1630664

Cox, E. (1992). *The fuzzy systems handbook: A practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. AP Professional.

Dietz, T. & Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on CO2 emission. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, *94*, 175–179.

Drezner, D. W. (1999). *The sanctions paradox: Economic statecraft and international relations*. Cambridge University Press.

Economic Research Forum. (2024). *Sanctions and carbon emissions in Iran* (ERF Policy Brief No. 103). https://theforum.erf.org.eg/2024/07/09/sanctions-and-carbon-emissions-in-iran/

Eyler, R. (2008). *Economic sanctions: International policy and political economy at work*. Palgrave Macmillan US.

Fadaei, M. & Derakhshan, M. (2000). Analysis of the short-term and long-term effects of economic sanctions on economic growth in Iran. *Journal of Economic Growth and Development Research*, (18), 113–132. [In Persian].

Farzanegan, M. R., Jabari, L., Salem, A. & Zamani, O. (2024). *Sanctions and energy efficiency in Iran's industries*. Economic Research Forum. https://theforum.erf.org.eg/2024/10/22/sanctions-and-energy-efficiency-in-irans-industries/

Fatoorehchi, Z. & Pourshaban Gil Chalan, A. (2023). The impact of human capital on environmental quality in developing countries. Paper presented at the Sixth National Conference on Economics, Management and Accounting. https://civilica.com/doc/1970438. [In Persian].

Felbermayr, G., Morgan, C. T., Syropoulos, C. & Yotov, Y. V. (2024). *Economic sanctions: Stylized facts and quantitative evidence*. LeBow College of Business, Drexel University. https://ideas.repec.org/p/drc/wpaper/2024-02-ep.html

Grossman, G. M. & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, *110*(2), 353–377.

Grossman, G. M. & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impact of a North American Free Trade Agreement* (Working Paper 3914). National Bureau of Economic Research.

Gutmann, J., Neuenkirch, M. & Neumeier, F. (2021). *The economic effects of international sanctions: An event study* (CESifo Working Paper No. 9007).

IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Iranmanesh, S., Salehi, N. & Jalaee, S. A. (2021). Using the fuzzy logic approach to extract the index of economic sanctions in the Islamic Republic of Iran. *MethodsX*, *8*, 101301. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8374288/

Jabari, L., Salem, A. A., Zamani, O. & Farzanegan, M. R. (2024). Economic sanctions, energy efficiency, and environmental impacts: Evidence

from Iranian industrial sub-sectors. *Energy Economics*, *139*, 107920. https://www.sciencedirect.com/science/

Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *23*(3), 665–685.

Khodaei, I. (2011). Fuzzy linear regression and its applications in social science research. *Journal of Iranian Social Studies*, *3*(4), 61–75. [In Persian].

Klir, G. J. & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Prentice Hall.

Lin, S., Zhao, D. & Marinova, D. (2009). Analysis of the environmental impact of China based on STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, *29*(6), 341–347.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8*(3), 338–353.

Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, *8*(3), 199–249.

Madani, K. (2020a). *Iran under sanctions: The unintended environmental implications of Iran sanctions*. Johns Hopkins University, School of Advanced International Studies (SAIS). https://www.rethinkingiran.com/iran-sanctions-reports/kaveh-madani

Madani, K. (2020b). How international economic sanctions harm the environment. *Environmental Science & Technology*, *54*(24), 15617–15618. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06950

Madani, K. (2021). Have international sanctions impacted Iran's environment? *World*, *2*(2). https://www.mdpi.com/2673-4060/2/2/15

Marbuah, G. & Gren, I. M. (2021). Social capital, economic development, and carbon emissions: Empirical evidence from Swedish municipalities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111691

Morgan, T. C., Bapat, M. & Morgan, M. D. (2023). The political impact of sanctions. *EconPol Forum*, *4*(3), 3–8. https://www.ifo.de/DocDL/econpol-forum-2023-3-how-sanctions-work.pdf

Mostafavi, S. M., Ghaemi Asl, M. & Hosseini Ebrahimabad, S. A. (2015). Investigating the causality relationship between economic sanctions, macroeconomic variables, and environmental pollutants in Iran (Application of the Hsiao Causality Approach). *Quarterly Journal of Quantitative Economics*, *11*(1), 103–128. [In Persian].

Mottaghi, S. (2018). Explaining the effectiveness of economic sanctions imposed against the Islamic Republic of Iran from a political economy perspective. *Rahyaft-e Enghelab-e Eslami (Approach of the Islamic Revolution)*, *12*(42), 89–106. [In Persian].

Naji Azimi, Z. (2016). *Familiarity with fuzzy linear programming*. Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian].

Peksen, D. (2009). Economic sanctions and political repression: Assessing the impact of coercive diplomacy on political freedoms. *Human Rights Review*, *10*(3), 393–411.

Rahimi Fathkouhi, I. (2022). The impact of U.S. sanctions on Iran's automotive industry self-sufficiency. *Quarterly Journal of Accounting and Management Outlook*, *5*(59), 132–138. [In Persian].

Sadeghi, H. & Rahman, S. (2004). Population growth, economic growth and environmental effects in Iran (A causal analysis). *Economic Research*, (64), 164–180. [In Persian].

Shafik, N. & Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality: Time series and cross section evidence*. World Bank.

Shim, J. H. (2006). *The reform of energy subsidies for the enhancement of marine sustainability, case study of South Korea* [Doctoral dissertation]. University of Delaware.

Strong and Herd LLP. (2025). *Export controls in 2025: Adapting to new UK sanctions, emerging risks, and stricter enforcement*. Retrieved July 17, 2025, from https://www.strongandherd.co.uk/export-controls-in-2025-adapting-to-new-uk-sanctions-emrging-risks-and-stricter-enforcement

Tanaka, H. & Ishibuchi, H. (1992). Possibility regression analysis based on linear programming. *Journal of European Research*, *2*(3), 44–60.

Tol, S. J. W., Pacala, R. & Socolow, S. R. (2006). *Understanding longterm energy use and carbon dioxide emissions in the USA*. Humbor University.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8*(3), 338–353.

Zamani Najafabadi, M. K. (2019). *Stock value forecasting with fuzzy logic approach and comparing it with linear regression model in petrochemical industry*. Venus Book Publications. [In Persian].

Fuzzy Analysis of the Impact of Economic Sanctions on Pollutant Emissions in Iran

Abstract

In addition to economic impacts, the economic sanctions imposed on Iran can also lead to unintended environmental consequences. Given the importance of accurately and quantitatively assessing these effects, the present study aims to investigate the impact of economic sanctions on pollutant emissions in Iran from 1992 to 2024. For this purpose, the fuzzy regression method, which has a high ability to examine correlation under conditions of ambiguity and uncertainty, has been used. The findings of this study show that economic sanctions are effective both directly and indirectly in the emission of pollutant volumes in Iran, with a fuzzy ratio of (0.0677, 1.1073). By limiting access to new technologies, spare parts, and foreign investment, sanctions have forced industries to use old and energy-intensive machinery and reduced energy efficiency. On the other hand, economic sanctions have led to the spread of pollutant emissions in Iran due to trade isolation and reduced competitiveness of industries and enterprises, unproductive production, financial and technological restrictions on environmental investments, difficulty in importing high-quality fuel and renewable technologies, and weakening of institutional supervision.

Keywords: Economic sanctions, pollutant emissions, environment, Iran, fuzzy logic.