Original Article

The Impact of Economic Complexity on Environmental Pollution

Zahra Azizi[1], Fatemeh Daraei[2], Alireza Naseri Boroujeni[3]

Received:2019/12/28
Revised: 2020/02/02
Accepted:2020/02/15

Abstract
Today, the global economy faces the important challenges such as environmental pollution, global warming and climate changes. Improving knowledge and technology can control the emission of pollutants. One of the newest indicators that reflects the level of knowledge and technology used in the national production structure is the economic complexity index. In this study, the impact of economic complexity, as a measure of the level of technology, knowledge and skills of an economy, on environmental pollution is investigated in the framework of Kuznets' environmental curve hypothesis using data from 99 countries over the period of 1992-2017. Environmental pollution is measured by the carbon dioxide emissions. A panel data model is estimated with Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) method to find the relationship between variables. The results show that economic complexity has a negative and significant effect on environmental pollution, and hypothesis of Kuznets' environmental curve is empirically confirmed. These results indicate that carbon dioxide emissions can be reduced by improving technology, knowledge and skills in the economy.

Keywords: Environmental Kuznets Curve, Economic Complexity, Economic Growth, CO2 Emissions
JEL Classification: C32, O13, Q55, Q56

1. Assistant Professor of Economics, Alzahra University, Tehran, Iran,(Corresponding Author),
E-mail: azizi@alzahra.ac.ir
2. MA in Economics, Alzahra University, Tehran, Iran, E-mail: f.daraei@student.alzahra.ac.ir
3. MA in Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran,
E-mail: Alireza_nasseri2009@yahoo.com

دوفصلنامهٔ سیاست‌گذاری پیشرفت اقتصادی دانشگاه الزهرا(س)
سال هفتم، شمارهٔ دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۸ (پیاپی ۲۰)

مقالهٔ پژوهشی

تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر آلودگی محیط‌زیست[۱]

زهرا عزیزی[۲]، فاطمه دارائی[۳]
و علیرضا ناصری بروجنی[۴]

تاریخ دریافت:۱۳۹۸/۱۰/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳
تاریخ پذیرش:۱۳۹۸/۱۱/۲۶

چکیده

امروزه یکی از مهمترین چالش‌های پیش‌روی اقتصاد جهانی، آلودگی محیط زیست، گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی ناشی از آن است. بهبود دانش و تکنولوژی را می توان یکی از عوامل کنترل کننده انتشار آلایندگی معرفی نمود. یکی از جدیدترین شاخص هایی که منعکس کننده میزان دانش و تکنولوژی به کار رفته در ساختار تولید یک کشور، از طریق سنجش میزان تنوع و فراگیری صادرات آن کشور است، شاخص پیچیدگی اقتصادی است. در این پژوهش، با استفاده از داده های ۹۹ کشور در دوره ۲۰۱۷-۱۹۹۲، به بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی به عنوان معیار سطح تکنولوژی، دانش و مهارت یک اقتصاد، بر آلودگی محیط زیست در چارچوب فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس پرداخته شده است. آلودگی محیط زیست با معیار میزان انتشار دی‌اکسید کربن سنجیده شده، زیرا حجم قابل توجهی از گازهای

---

۱. شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/EDP.2020.29451.1225

۲. استادیار گروه اقتصاد، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران (نویسنده مسئول)؛ z.azizi@alzahra.ac.ir
۳. کارشناس ارشد علوم اقتصادی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران؛ f.daraei@student.alzahra.ac.ir
۴. کارشناس ارشد علوم اقتصادی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران؛
Alireza_nasseri2009@yahoo.com

گلخانه‌ای مربوط به آن است. همچنین از مدل داده‌های تابلویی و روش حداقل مربعات معمولی پویا به منظور برآورد رابطه میان متغیرها استفاده شده است. نتایج این برآورد، نشان می‌دهد که پیچیدگی اقتصادی، اثر منفی و معنی‌داری بر آلودگی محیط زیست داشته و همچنین فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس به صورت تجربی، مورد تأیید قرار گرفته است. این نتایج تجربی، بیان می‌کند که با بهبود تکنولوژی، دانش و مهارت در اقتصاد، میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی، انتشار دی‌اکسید کربن

طبقه بندی JEL: Q56، Q55، O13، C32

۱. مقدمه

گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی، یکی از مهمترین مسائل زیست محیطی در دو دهه اخیر بوده که علاوه بر آثار مخرب بر محیط زیست، اثرات زیانباری بر سلامت بشر نیز داشته است. به گزارش سازمان فضایی ناسا[1]، بخش اعظمی از گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی، ناشی از فعالیت‌های بشر در دهه‌های اخیر بوده است. فرایند گرمایش زمین از تابش خورشید به زمین، بازتاب آن به اتمسفر و به دام افتادن انرژی بازتاب‌شده توسط گازهای گلخانه‌ای موجود در اتمسفر اتفاق می‌افتد. در قرن بیستم، با رشد و توسعه اقتصادی کشورها، میزان استفاده از انرژی‌های فسیلی شدت یافت و همین امر، به انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای به جو زمین منجر شد. با بروز مشکلات زیست محیطی و اهمیت یافتن آن، پژوهشگران به بررسی اثرات توسعه اقتصادی بر محیط زیست پرداختند که عمده این تحقیقات، بر پایه منحنی کوزنتس[2] صورت گرفته است.

منحنی کوزنتس که در ابتدا توسط کوزنتس[3] (۱۹۹۵) و برای بررسی اثر رشد اقتصادی بر نابرابری اقتصادی ارائه شد و سپس در بررسی‌های رابطه میان رشد اقتصادی و محیط زیست بکار برده شده، بیان می‌کند که رابطه میان رشد اقتصادی و تخریب محیط زیست به صورت منحنی U معکوس[4] است. این رابطه به معنی این است که با شروع رشد اقتصادی، آلودگی محیط زیست افزایش یافته و پس از رسیدن به یک سطح توسعه‌یافتگی، رشد اقتصادی، آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد. در صورتی که فرضیه منحنی کوزنتس درست باشد، با توجه به ویژگی این منحنی، رشد اقتصادی نه تنها تهدیدی برای محیط زیست نبوده، بلکه می‌تواند به ابزاری برای بهبود کیفیت محیط زیست تبدیل شود (سلیمی‌فر و دهنوی، ۱۳۸۸).

---

1. https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/
2. Kuznets Curve
3. Kuznets
4. Inverted U shaped

طرفداران منحنی زیست محیطی کوزنتس، بیان می‌کنند که در سطوح بالاتر توسعه، رشد اقتصادی از دو جنبه بر بهبود محیط زیست اثر می‌گذارد. از یک سو، با رشد اقتصادی و افزایش درآمد سرانه کشورها، توجه و آگاهی مردم به مسائل زیست محیطی بیشتر شده و موجب وضع قوانین بهبود محیط زیست می‌شود (پانایوتو[۱]، ۱۹۹۳)، از سوی دیگر، در این مرحله از توسعه، کشورها بر توسعه دانش‌بنیان[۲] تمرکز کرده و تغییرات ساختاری و جایگزینی تکنولوژی‌های پیشرفته با تکنولوژی‌های قدیمی، به کاهش آلایندگی محیط زیست منجر می‌شود (ین و همکاران[۳]، ۲۰۱۵).

اگرچه تغییرات ساختاری و بهبود تکنولوژی، باعث رشد درآمد سرانه کشورها می‌شود، اما سطح بالای درآمد سرانه در برخی موارد، نشان‌دهنده سطح بالای تکنولوژی و تغییرات ساختاری در اقتصاد نیست. به طور مثال، در کشورهای صادرکننده نفت و به‌عنوان نمونه، قطر، دارای بالاترین درآمد ناخالص داخلی سرانه (۱۳۹۱۷۴ دلار در سال ۲۰۱۴) بوده، در حالی که از لحاظ تکنولوژی در جایگاه پایینی در دنیا قرار دارد[۴] (کن و گوزگور[۵]، ۲۰۱۷). بنابراین استفاده از رشد اقتصادی، به تنهایی نشان‌دهنده اثر تغییرات ساختاری و تکنولوژی بر بهبود محیط زیست نخواهد بود. به همین دلیل، معیاری برای درنظر گرفتن پیشرفت‌های تکنولوژیک لازم است.

در اغلب مطالعات گذشته از جمله کومن و همکاران[۶] (۱۹۹۷)، آنگ[۷] (۲۰۰۹) و وی و یانگ[۸] (۲۰۱۰) از معیار مخارج تحقیق و توسعه، به منظور معیار پیشرفت تکنولوژیک استفاده شده است؛ اما مخارج تحقیق و توسعه، به عنوان ورودی یک فرایند توسعه کالای جدید و پیشرفت تکنولوژیک بوده و تمام مخارج تحقیق و توسعه، به پیشرفت تکنولوژیک منجر نمی‌شود. از این حیث، معیار مخارج تحقیق و توسعه، معیار مناسبی برای نشان دادن پیشرفت تکنولوژیکی نیست (کن و گوزگور، ۲۰۱۷).

هیدالگو و هاسمن[۹] (۲۰۰۹)، شاخص پیچیدگی اقتصادی[۱۰] را با استفاده از اطلاعات تجارت خارجی کشورها طراحی کردند که نشان‌دهنده سطح توسعه‌یافتگی و تجمیع ظرفیت‌های اقتصادی یک کشور است. این شاخص، کشورها را بر اساس تجمیع دانش و ظرفیت‌های تکنولوژیک، به خوبی تفکیک می‌کند. به عبارت دیگر، پیچیدگی اقتصادی تمامی ظرفیت‌ها،

---

1. Panayotou
2. Knowledge Intensive
3. Yin *et al.*
۴. کشور قطر، بر اساس شاخص پیچیدگی اقتصادی، در جایگاه ۶۰ جهان در سال ۲۰۱۴ قرار داشته است.
5. Can & Gozgor
6. Komen *et al.*
7. Ang
8. Wei & Yang
9. Hidalgo & Hausmann
10. Economic complexity

سطح تکنولوژی، نیروی کار ماهر و دانش لازم برای تولید را در خود جای داده است؛ و از این رو، می تواند ابعاد وسیع تری از بهبود تکنولوژی و دانش فنی را در خود جای دهد. به طور مثال، سنگاپور و پاکستان، دارای تعداد محصولات مشابهی در صادرات بوده، اما تفاوت فاحشی در درآمد ناخالص داخلی داشته‌اند.

هیدالگو و هاسمن، نشان دادند که این تفاوت، ناشی از سطح بالای تکنولوژی، بهره‌وری و ظرفیت‌های موجود در سنگاپور نسبت به پاکستان بوده که توسط شاخص پیچیدگی اقتصادی، توضیح داده می‌شود. بنابراین، شاخص پیچیدگی اقتصادی، می‌تواند به عنوان معیار مناسبی از توسعه‌یافتگی کشورها که نشان دهنده تغییرات ساختاری و تکنولوژیکی است، در نظر گرفته شود.

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی بر آلودگی محیط زیست در چهارچوب فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس است. بدین منظور، از اطلاعات ۹۹ کشور که در دوره ۲۰۱۷-۱۹۹۲ اطلاعات کاملی از متغیرهای مورد استفاده را داشته اند، بهره‌گیری شده است. آلودگی محیط زیست، مطابق با مطالعات گذشته، با میزان انتشار دی‌اکسید کربن سنجیده می‌شود؛ زیرا عامل اصلی گرمایش زمین، تغییرات اقلیمی و تخریب محیط زیست، انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده و بخش اعظم گازهای گلخانه‌ای، مربوط به انتشار دی‌اکسید کربن است.

شاخص پیچیدگی اقتصادی نیز به عنوان معیار توسعه‌یافتگی و سطح تکنولوژیک کشورها در نظر گرفته شده، و متغیر میزان مصرف انرژی سرانه نیز به عنوان متغیر توضیحی در کنار درآمد ناخالص داخلی سرانه و مربع آن، در مدل تجربی ارائه، و به منظور برآورد مدل تجربی، از روش داده‌های ترکیبی و حداقل مربعات معمولی پویا[1] استفاده شده است. مزیت استفاده از این روش نسبت به روش‌های ایستا، تصحیح مشکل درونزایی و خودهمبستگی است (کائو و چیانگ[2]، ۲۰۰۱). در ادامه، مبانی نظری، بیان، و مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بررسی می‌شود. پس از آن، مدل تجربی و داده‌های مربوط به آن، تشریح و برآوردها، ارائه، و در نهایت، به بحث و نتیجه‌گیری نتایج به‌دست آمده، پرداخته می‌شود.

۲. مبانی نظری

۲-۱. منحنی زیست محیطی کوزنتس و عوامل شکل‌دهنده آن

مفهوم منحنی زیست محیطی کوزنتس، به اوایل دهه ۱۹۹۰ و مطالعه نوآورانه گروسمن و کروگر[3] (۱۹۹۱) در این زمینه برمی‌گردد. این مفهوم به طور مشخص، در گزارش توسعه جهانی

1. Dynamic Ordinary Least Square (DOLS)
2. Kao & Chiang
3. Grossman & Krueger

بانک جهانی[1] (۱۹۹۲) ارائه شد که بیان می‌کرد، این تصور که رشد اقتصادی بیشتر به ناچار به محیط زیست آسیب می‌رساند، بر پایه فرضیات ثابت[2] در خصوص تکنولوژی، تمایلات و سرمایه‌گذاری‌های در حوزه محیط زیست است و با افزایش درآمد، تقاضا برای بهبود کیفیت محیط زیست نیز افزایش می‌یابد، که به ایجاد منابع لازم برای سرمایه‌گذاری در این زمینه، منجر می‌شود.

بکرمن[3] (۱۹۹۲) نیز عنوان می‌کند که شواهد آشکاری در خصوص اثر نامطلوب رشد اقتصادی بر محیط زیست وجود دارد؛ اما تنها و بهترین راه برای جلوگیری از تخریب محیط زیست در بسیاری از کشورها، ثروتمند شدن است (استرن[4]، ۲۰۰۴).

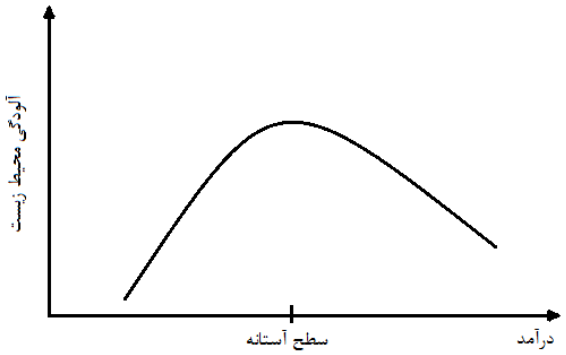
منحنی زیست محیطی کوزنتس، به طور مختصر بیان می‌کند که در مراحل اولیه رشد اقتصادی، آگاهی مردم در خصوص مشکلات زیست محیطی، پایین بوده و تکنولوژی‌های دوستدار طبیعت نیز موجود نیست. به همین جهت با رشد اقتصادی تا زمان رسیدن به سطح آستانه، آلودگی محیط زیست نیز افزایش می‌یابد؛ اما پس از عبور از سطح آستانه، کیفیت محیط زیست بهبود می‌یابد. این رابطه را می‌توان در یک منحنی U معکوس در شکل ۱ نمایش داد. در فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، تلاش می‌شود تا رابطه‌ای بلندمدت بین اثرات زیست محیطی و رشد اقتصادی تبیین گردد. با تشدید فعالیت‌های اقتصادی در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، نرخ استفاده از منابع، از نرخ جایگزینی منابع بیشتر می‌شود. همچنین نرخ تولید زباله از نظر حجم و سمی بودن[5] نیز افزایش می‌یابد؛ اما در سطوح بالاتر توسعه اقتصادی، تغییرات ساختاری در جهت اقتصاد دانش‌بنیان، در کنار آگاهی مردم در خصوص مسائل زیست محیطی و ایجاد قوانین دوستدار طبیعت، تکنولوژی بهتر و مالیات‌های زیست‌محیطی بیشتر، موجب می‌شود تا از آلودگی بیشتر محیط زیست، جلوگیری شده و بهبود محیط زیست را در پی داشته باشد. این یک فرایند طبیعی بلندمدت توسعه یک اقتصاد سنتی کشاورزی به اقتصاد صنعتی آلاینده و سپس اقتصاد پاک مبتنی بر خدمات است (ارو و همکاران[6]، ۱۹۹۵ به نقل از دیندا[7]، ۲۰۰۴).

فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، خلاصه تغییرات پویای یک اقتصاد است. عوامل متعددی فرایند منحنی زیست محیطی کوزنتس را شکل می‌دهند. با این حال، دو عامل مهم مؤثر در شکل‌گیری منحنی کوزنتس، افزایش درآمد مردم و به تبع آن، افزایش تقاضا برای

---

1. World Bank's World Development Report
2. Static Assumptions
3. Beckerman
4. Stern
5. Toxicity
6. Arrow *et al.*
7. Dinda

استانداردهای بهتر زندگی و تغییرات مقیاس، ساختار و تکنولوژیکی در اقتصاد است. با افـزایش درآمد مردم و دستیابی به سطوح بالاتر استانداردهای زندگی، تقاضا بـرای محـیط زیسـت سـالم، بیشتر می‌شود. همچنین مردم به نسبت گذشته، بخش بیشتری از درآمد خود را صـرف بهبـود کیفیت محیط زیست می‌کنند. بنابراین، می‌توان گفـت کـه کشـش درآمـدی تقاضـای کیفیـت محیط زیست، بیشتر از یک بوده و کیفیت محیط زیست به عنوان یـک کـالای لـوکس در نظـر گرفته می‌شود. مردم فقیر، تقاضای پایینی برای کیفیت محیط زیست دارند، اگرچـه بـا افـزایش درآمد و ثروتمند شدن جامعه، تقاضا بـرای کالاهـای سـالم و دوسـتدار محـیط زیسـت بیشـتر می‌شود. مصرف‌کنندگان با درآمد بیشتر، نه تنها خواهان پرداخت بیشتر برای محصولات سـبز[1] می شوند، بلکه فشارهای اجتماعی برای ایجاد قوانین محافظـت از محـیط زیسـت نیـز افـزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در بسیاری از موارد، کاهش آلودگی محیط زیست، ناشی از اصـلاحات در سطح منطقه‌ای و یا کشوری در قالب قوانین زیست محیطی و ارائه مشوق‌های کاهش آلایندگی بوده است (دیندا، ۲۰۰۴).



شکل ۱. منحنی زیست محیطی کوزنتس

اثرگذاری رشد اقتصادی بر محیط زیست، از طریق سه کانال اثر مقیاس[2]، اثر تکنولـوژی[3] و اثر ترکیب منابع[4] بر محیط زیست است. در صورتی که هیچ تغییری در ساختار و یـا تکنولـوژی یک اقتصاد اتفاق نیافتد، با رشد اقتصادی، آلودگی محیط زیست نیز به تناسب افزایش می‌یابـد؛ زیرا تولید بیشتر، نیازمند منابع بیشتر از جمله مصرف بیشتر انرژی است. به این اثر، اثر مقیاس گفته می‌شود. دیدگاه سنتی که رشد و توسعه اقتصادی و مسائل مربوط به محیط زیسـت را در تضاد با یکدیگر می‌بینند، صرفاً به اثر مقیاس اشاره می‌کنند (استرن، ۲۰۰۴).

---

1. Green Products
2. Scale Effect
3. Technology Effect
4. Composition Effect

در مقابل این دیدگاه سنتی، طرفداران فرضیه زیست محیطی کوزنتس، بر دو اثر ترکیب منابع و تکنولوژی تأکید می‌کنند. صنایع مختلف دارای شدت آلایندگی متفاوتی هستند و به طور معمول، در فرایند توسعه اقتصادی، ترکیب تولید[1] تغییر می‌کند. در مراحل اولیه، تغییری از اقتصاد سنتی کشاورزی به سمت تولید کالاهای صنعتی با آلایندگی زیاد و صنایع سنگین اتفاق می‌افتد، در حالی که در مراحل بعدی توسعه اقتصادی، گذار از تولید کالاهای صنعتی به توسعه بخش خدمات و صنایع سبک‌تر صورت می‌پذیرد که دارای شدت آلایندگی کمتری هستند. در این فرایند، ترکیب ورودی تولید کالاها به نفع استفاده از منابع کمتر آلاینده تغییر می‌کند. به طور مثال، استفاده از گاز طبیعی به‌جای زغال سنگ و یا جایگزینی زغال سنگ با مقادیر کم گوگرد به‌جای زغال سنگ دارای مقادیر بالای گوگرد که آلایندگی کمتری در پی دارد. بنابراین، با فرض عدم تغییر تکنولوژی، تغییر ترکیب منابع به نفع منابع کمتر آلاینده، به کاهش آلودگی محیط زیست منجر می‌شود (استرن، ۲۰۰۴).

از طرف دیگر، با ثروتمندتر شدن جامعه، منابع لازم برای مخارج تحقیق و توسعه نیز افزایش می‌یابد و در پی آن، تکنولوژی‌های قدیمی با تکنولوژی‌های جدید جایگزین می‌گردد (دیندا، ۲۰۰۴). این پیشرفت تکنولوژیک از طریق بهبود بهره‌وری و آلایندگی کمتر در فرایند تولید، به بهبود کیفیت محیط زیست منجر می‌شود. از یک سو، با فرض ثابت بودن سایر شرایط، افزایش در بهره‌وری کل، به معنی استفاده کمتر از منابع آلاینده در تولید یک واحد کالا است. از سوی دیگر، تکنولوژی‌های جدید با توجه به قوانین زیست محیطی، آلودگی کمتری تولید و منتشر می‌کنند. بنابراین، تغییرات تکنولوژیکی نیز کاهش آلودگی محیط زیست رد در پی خواهد داشت (استرن، ۲۰۰۴).

فرضیه زیست محیطی کوزنتس، بیان می‌کند که اگرچه در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، اثر مقیاس باعث افزایش آلودگی محیط زیست می‌شود، اما در مراحل بعدی، اثر مثبت ترکیب منابع و تکنولوژی، اثر منفی مقیاس را بر آلودگی محیط زیست خنثی کرده و به بهبود کیفیت محیط زیست منجر می‌شود (ووکینا و همکاران[2]، ۱۹۹۹ به نقل از دیندا، ۲۰۰۴).

۲-۲. پیچیدگی اقتصادی و اثر آن بر آلودگی زیست محیطی

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، یکی از مواردی که می تواند به کاهش انتشار آلایندگی منجر شود، بهبود تکنولوژی و سطح دانش در فرآیند تولید است. معیارهای مختلفی برای سنجش این متغیر تا کنون مطرح شده، اما یکی از جدیدترین شاخص های منعکس کننده میزان دانش و تکنولوژی به کار رفته در ساختار تولید یک کشور، شاخص پیچیدگی اقتصادی

1. Output mix
2. Vukina *et al.*

است. شاخص پیچیدگی اقتصادی، در تلاش برای توضیح تفاوت در رشد اقتصادی کشورهای مختلف توسط هیدالگو و هاسمن (۲۰۰۹) ارائه شد.

برخلاف نظریات متداول رشد که تفاوت رشد اقتصادی کشورها را در میزان تولید کالاها و خدمات، بدون توجه به ساختار تولید آن در نظر گرفته‌اند، به عقیده هیدالگو و هاسمن، ثروت کشورها ارتباط نزدیکی با ساختار اقتصادی آنها دارد. مشاهدات تجربی نیز در سال‌های گذشته مغایر با نظریات متداول رشد اقتصادی بوده است. به طور مثال، کشورهایی که از نظر منابع طبیعی بسیار غنی هستند، نتوانسته‌اند بیشتر از کشورهای با منابع طبیعی محدود، شاهد رشد اقتصادی باشند. در مقابل، کشورهایی مثل کره جنوبی و تایوان با صادرات کالاهایی که دارای ماهیت متفاوت از صادرات کشورهای ونزوئلا و نیجریه بوده است، توانسته‌اند به رشد بالایی دست یابند. بنابراین، نوع کالای تولید شده نیز می تواند دارای اهمیت باشد (هیدالگو، ۲۰۰۹).

برای حل این مشکل، آنها با ترکیب فیزیک آماری شبکه‌ها[1] و اقتصاد توسعه و با استفاده از اطلاعات تجارت خارجی کشورها، شاخص پیچیدگی اقتصادی را برای هر کشور محاسبه کردند. این شاخص میزان سطح تکنولوژی، دانش و مهارت در اختیار یک کشور را با استفاده از متنوع و پیچیده بودن[2] محصولاتی که صادر می شود، نشان می‌دهد. این گزاره بر این پایه استوار است که کشورهایی که کالاهای با پیچیدگی بالا تولید می‌کنند، مطمئناً دارای تکنولوژی، دانش و مهارت لازم برای تولید آن کالا هستند (هیدالگو و هاسمن، ۲۰۰۹).

شاخص پیچیدگی اقتصادی به عنوان معیار تولید نوآورانه، دارای برتری‌هایی نسبت به سایر معیارها (از جمله تعداد اختراعات و هزینه‌های تحقیق و توسعه) است. این معیار ظرفیت‌های متناسب با ساختار تولید یک کشور در جهت ایجاد نوآوری و همچنین توانایی استفاده از این نوآوری‌ها در ساختار تولید را نشان می‌دهد. دو مفهوم مهم در محاسبه این شاخص مورد استفاده قرار گرفته، که یکی، تنوع محصولات و دیگری، فراگیر بودن[3] محصولات است. تنوع محصولات، به تعداد محصولات متمایزی که یک کشور تولید می‌کند، اشاره داشته و میزان بیشتر آن، نشان‌دهنده دانش تجمیع‌شده و توانایی استفاده از تاکتیک‌ها و نوآوری‌های صورت گرفته در ساختار تولید یک کشور است. فراگیر بودن محصولات نیز، تعداد کشورهایی که قادر به تولید آن محصول مشابه هستند، را نشان می‌دهد. محصولاتی که نیازمند سطح بالای دانش هستند، تنها در کشورهایی تولید می‌شوند که تکنولوژی و دانش تولید آن وجود دارد؛ بنابراین، هرچه کالای تولید شده، دارای پیچیدگی بیشتری باشد، از درجه فراگیری کمتری برخوردار است. به طور مثال، تکنولوژی تصویربرداری پزشکی، محصولی است که تنها توسط چند کشور (آمریکا و آلمان) صادر می‌شود، نسبت به محصولات چوبی که توسط بسیاری از کشورها صادر می‌شود، فراگیری کمتری دارد. در همین، حال آلمان و آمریکا محصولات متنوعی را صادر می‌کنند.

---

1. Statistical Physics of Networks
2. Diversified and Complex
3. Ubiquity

استفاده از دو مفهوم تنوع و فراگیر بودن محصولات در محاسبه پیچیدگی اقتصادی، اجازه می‌دهد تا توانایی یک کشور در بازتولید محصولات رقابت‌پذیر از طریق نوآوری‌های سازمانی را نشان دهد. در مجموع، در حالی که معیارهای دیگر اندازه‌گیری ظرفیت‌های نوآورانه یک اقتصاد از جمله تعداد ثبت اختراعات[1] و مخارج تحقیق و توسعه، به ترتیب، معیارهایی برای نشان دادن حقوق قانونی ثبت اختراع و نحوه تخصیص منابع شرکت‌ها بوده، شاخص پیچیدگی اقتصادی، نشان‌دهنده ظرفیت‌های موجود در ساختار تولید یک کشور تلقی می‌شود (هاسمن و همکاران[2]، ۲۰۱۳ به نقل از سویت و ماجیو[3]، ۲۰۱۵). به همین دلیل، در گروهی از مطالعات در سالهای اخیر به عنوان معیار پیشرفت تکنولوژی، از آن استفاده شده است (به عنوان مثال کن و گوزگور، ۲۰۱۷ و نیگو و تئودور[4]، ۲۰۱۹ از آن جمله‌اند).

بسیاری از محققان، بر این باورند که نوآوری های تکنولوژیکی و استفاده از عوامل تولید با تکنولوژی بالاتر، می‌تواند کارآیی انرژی را بهبود بخشد. همچنین یک ساختار پیچیده تر تولید، کشور را قادر می‌سازد که در فعالیت‌های تولیدی خود، بهره‌وری بالاتری را تجربه نماید. در نتیجه، می تواند مصرف انرژی را برای مقدار مشخصی از تولید کاهش دهد و انتشار آلایندگی را کمتر کند (احمد و ارشدخان[5]، ۲۰۰۹).

از سوی دیگر، بهبود تکنولوژی، سبب افزایش تولید و رشد اقتصادی شده و در کنار این، رشد میزان استفاده از انرژی‌های فسیلی شدت می یابد و این امر، به انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای به جو زمین منجر می شود. تلاش برای افزودن محصولات جدید به سبد تولیدی نیز سبب تغییر ترکیب تولید و تغییر در انتشار $CO2$ می گردد. برای مثال، تغییر تولید از محصولات سنتی اولیه به محصولات صنعتی، می تواند به افزایش انتشار آلایندگی منجر گردد (گوزگرو کن و ۲۰۱۷).

در واقع، تغییرات تکنولوژیک، دارای دو اثر مستقیم و غیرمستقیم بر محیط زیست است. اثر مستقیم، عمدتاً به واسطه تکنولوژی‌های جدیدی است که مواد و کالاهای جدید تولید می‌کند. این تکنولوژی‌های جدید، می‌توانند به آلودگی بیشتر محیط زیست منجر شوند، و یا آلودگی را کاهش دهند. در مقابل، وجود قوانین و مالیات‌های آلایندگی، باعث شده تا نوآوران به سمت ارائه تکنولوژی‌های جدید کاهنده آلایندگی حرکت کنند. به عنوان مثال، تکنولوژی کاتالیست‌های کاهنده آلایندگی هوا، با تبدیل گازهای مضر به گازهای کمتر مضر، به طور مستقیم از آلایندگی بیشتر محیط زیست جلوگیری می‌کنند.

---

1. Patents
2. Hausmann *et al.*
3. Sweet & Maggio
4. Neagu & Teodoru
5. Ahmed & Arshad Khan

اثر غیرمستقیم تکنولوژی بر محیط زیست نیز به واسطه بهبود بهره‌وری و کارآیی خطوط تولید و تغییر ترکیب منابع در تولید کالاها است. با افزایش بهره‌برداری از تکنولوژی‌های جدید در تولید کالاها، میزان نهاده‌های مورد استفاده در تولید از جمله انرژی، کاهش یافته و به کاهش آلایندگی محیط زیست منجر می‌شود. از سوی دیگر، با تغییرات تکنولوژیک، تغییر در ترکیب منابع انرژی از سوخت‌های آلاینده از جمله زغال سنگ و نفت، به انرژی‌های کمتر آلاینده مثل گاز، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر، میزان آلایندگی محیط زیست را کاهش داده است. (ارن[1]، ۲۰۰۱)

اثر غیرمستقیم دیگر تکنولوژی بر آلایندگی محیط زیست، کاهش هزینه‌های کنترل آلایندگی است. در صورتی که روند توسعه تکنولوژی و بهره‌وری نیروی کار و سرمایه صعودی باشد، سطح آلایندگی در جامعه با هزینه‌های نزولی روبه‌رو می‌شود. به عبارتی، با رشد اقتصادی و افزایش درآمد سرانه، تقاضای حفاظت از محیط زیست بیشتر شده و از طرف دیگر، با توسعه تکنولوژی و بهره‌وری، هزینه کنترل آن کاهش یافته و به همین دلیل، میزان آلایندگی کاهش خواهد یافت (بروک و تیلور[2]، ۲۰۰۵).

۳. پیشینه مطالعات

بخش عمده ای از مطالعات حوزه انتشار آلایندگی در ارتباط با آزمون فرضیه زیست محیطی کوزنتس است که اثرات محیط زیستی رشد اقتصادی را تبیین می کند. فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، با مطالعه نوآورانه گروسمن و گروکر (۱۹۹۱) مطرح شد. مطالعه آنها در خصوص اثر قراردادهای تجاری بین‌المللی و آزادی تجاری (به طور خاص قرارداد نفتا[3])، بر آلودگی محیط زیست بود. بررسی آنها نشان داد که قراردادهای تجاری بین المللی که به آزادی در حوزه تجارت بین‌الملل و به تبع آن، رشد اقتصادی منجر می‌شود، در سطوح پایین درآمدی، به افزایش آلودگی محیط زیست منجر شده، در حالی که در سطوح بالای درآمدی، آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد.

پس از آن، در مطالعات گسترده ای، به بررسی اثرات توسعه اقتصادی بر جنبه‌های مختلف کیفیت محیط زیست پرداختند و ابعاد دیگری را نیز به الگوی اولیه کوزنتس اضافه کردند. یکی از این ابعاد، پیشرفت تکنولوژی است که در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. خلاصه‌ای از این پژوهش‌ها که به بررسی اثرات تغییر در تکنولوژی بر انتشار آلایندگی پرداخته اند، در جدول (۱) ارائه گردیده است.

---

1. Eren
2. Brock & Taylor
3. North American Free Trade Agreement (NAFTA)

جدول ۱. خلاصه‌ای از مطالعاتی که به بررسی اثر تکنولوژی بر انتشار آلایندگی پرداخته اند

نویسنده	نمونه	روش	نتایج پژوهش
لانتز و فنگ[1] (۲۰۰۶)	کانادا	GLS	نتایج نشان داد که رابطه‌ای معنی‌دار میان سطح درآمد و انتشار دی‌اکسید کربن وجود نداشته و فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس رد شده اما، این رابطه U معکوس برای تکنولوژی برقرار بوده است. بدین معنی که در مراحل اولیه استفاده از تکنولوژی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن افزایش یافته، اما با توسعه تکنولوژی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش یافته است.
آنگ (۲۰۰۹)	چین	ARDL	شدت تحقیق و توسعه، انتقال تکنولوژی و ظرفیت جذب تکنولوژی‌های خارجی، اثر منفی و معنی‌داری بر انتشار دی‌اکسید کربن در این کشور داشته است، در حالی که رشد اقتصادی، آزادی تجاری و مصرف انرژی، عوامل اصلی در انتشار بیشتر دی‌اکسید کربن بوده‌اند.
هانگ و یانگ - شنگ[2] (۲۰۱۱)	چین	OLS	مقیاس اقتصاد، جمعیت و درآمد، اثر مثبت بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن داشته، درحالی که اثر تکنولوژی بر انتشار دی‌اکسید کربن پیچیده بوده است، به گونه‌ای که در مراحل اولیه توسعه تکنولوژی در چین، اثر تکنولوژی مثبت، اما در مراحل بعدی، در اثر بهبود تکنولوژی‌ها، منفی شده و میزان انتشار آلایندگی را کاهش داده است.
وانگ و همکاران[3] (۲۰۱۲)	۳۰ استان چین	پانل	نتایج نشان داد که نوآوری‌ها در زمینه سوخت‌های فسیلی، اثر معنی‌داری بر انتشار دی‌اکسید کربن نداشته است، اگرچه نوآوری‌ها در زمینه تکنولوژی انرژی‌های پاک، نقش موثر و اساسی در کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن را در استان‌های شرقی چین داشته است، اگرچه در استان‌های مرکزی، غربی و در سطح کشوری، این اثر معنی‌دار نبوده است.
علی و همکاران[4] (۲۰۱۶)	مالزی	ARDL	نوآوری تکنولوژیک در دوره مورد بررسی، دارای اثر منفی، اما به لحاظ آماری، معنی‌دار نبوده است. همچنین نتایج نشان داد که در بلندمدت، رشد اقتصادی، میزان انتشار آلایندگی را کاهش داده که همسو با فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس بوده است. توسعه مالی نیز دارای اثر منفی و معنی‌دار در بلندمدت بر انتشار دی‌اکسید کربن در مالزی بوده است.
سمرقندی[5] (۲۰۱۷)	عربستان سعودی	ARDL	نتایج این مطالعه، نشان داد که اثر تکنولوژی بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن به لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. همچنین ارزش افزوده بخش‌های خدمات و صنعت، به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن منجر شده، درحالی که ارزش افزوده بخش کشاورزی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش داده است.
یی و گیتا[6] (۲۰۱۷)	مالزی	VECM	نوآوری تکنولوژیک، دارای اثر منفی و معنی‌دار در کوتاه‌مدت بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن بوده، اما رابطه‌ای معنی‌دار میان این دو متغیر در بلندمدت وجود نداشته است؛ در حالی که هیچ رابطه علیتی میان نوآوری تکنولوژیک و انتشار دی‌اکسید کربن در بلندمدت توسط آزمون علیت گرنجر، مشاهده نشده است.
سویوشی و همکاران[7] (۲۰۱۹)	چین	DA	نتایج نشان داد که فعالیت‌های اقتصادی (رشد اقتصادی)، تغییرات تکنولوژیک و تغییرات شدت انرژی، عوامل مهم در انتشار دی‌اکسید کربن بوده‌اند و دو عامل تغییرات تکنولوژیک و تغییرات شدت انرژی در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن نقش موثری داشته‌اند.
برخورداری (۱۳۹۶)	کشورهای عضو اوپک	پانل	همگرایی مطلق و شرطی در سرانه انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای مورد بررسی وجود ندارد و جریان تکنولوژی، اثر منفی و جمعیت شهری و رانت منابع طبیعی، اثر مثبت و معنادار بر انتشار دی‌اکسید کربن دارند. همچنین کیفیت مقررات، اثر منفی و معنادار و کارآیی دولت، اثری مثبت و معنادار بر سرانه انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای مورد مطالعه دارند.

1. Lantz & Feng
2. Hang & Yuan-Sheng
3. Wang *et al.*
4. Ali *et al.*
5. Samargandi
6. Yii & Geetha
7. Sueyoshi *et al.*

به منظور سنجش اثر تکنولوژی بر انتشار آلایندگی، در پژوهش های ذکر شده، محققان از شاخص‌های مختلفی همچون میزان ثبت اختراع[1]، مخارج تحقیق و توسعه[2] و بهره‌وری کل عوامل تولید[3] برای سنجش رشد تکنولوژی بهره برده اند؛ اما در سال های اخیر، با مطرح شدن شاخص پیچیدگی اقتصادی، گروهی از محققان از این معیار، برای سنجش تغییر در ساختار تولید و بهبود تکنولوژی استفاده کرده اند. در این میان، تنها مطالعه موجود که به بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی بر انتشار آلایندگی پرداخته است، مطالعه کن و گزگور (۲۰۱۷) است که این اثر را در چارچوب فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس برای کشور فرانسه مورد بررسی قرار دادند. نتایج، وجود رابطه‌ای U معکوس میان درآمد سرانه و انتشار دی‌اکسید را در کشور فرانسه تأیید کرد. همچنین اثر پیچیدگی اقتصادی در بلندمدت بر انتشار دی‌اکسید کربن منفی و معنی‌دار بوده، و مصرف انرژی نیز به عنوان یک متغیر توضیحی دیگر در مدل آنها به طور معنی‌داری سطح انتشار دی‌اکسید کربن را افزایش داده است.

اگر چه فرضیه زیست محیطی کوزنتس به صورتی گسترده در مطالعات تجربی آزمون شده، اما در این مقاله، برای نخستین بار، اثر پیچیدگی اقتصادی بر انتشار دی اکسید کربن، با استفاده از داده های جامع بین کشوری در چارچوب الگوی پانل، مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیچیدگی اقتصادی، یک مفهوم نسبتاً جدید برای مشخص نمودن میزان دانش مفید و مولد درون یک کشور است که این امکان را می‌دهد تا تنوع دانش موجود در یک کشور و توانایی آن کشور در ترکیب نمودن و استفاده کردن از آن دانش را مشاهده و درک نماییم.

با توجه به اینکه شاخص پیچیدگی اقتصادی، ابعاد کامل‌تری از دانش، مهارت و تکنولوژی را منعکس می‌کند، می تواند سنجش مناسب تری را نسبت به سایر معیارها ایجاد نماید.

۴. الگوی تجربی و معرفی داده‌ها

همان‌طور که در بخش دوم مقاله اشاره شد، بهبود تکنولوژی می تواند بر کیفیت محیط زیست مؤثر باشد؛ و از این رو، مشابه مطالعات یی و گیتا (۲۰۱۷)، کن و گزگور (۲۰۱۷) و لانتز و فنگ (۲۰۰۶) در چارچوب الگوی شناخته شده کوزنتس، شاخص پیچیدگی اقتصادی در مدل وارد شده و بدین ترتیب، مدل تجربی این پژوهش، به صورت زیر ارائه می گردد:

$$ln(CO2_{it}) = \beta_1 + \beta_2\, ln(GDPPC_{it}) + \beta_3(\ln(GDPPC_{it}))^2 + \beta_4\, ln(ENERGY_{it}) + \beta_5 ECI_{it} + \varepsilon_{it}$$

در این مدل، از میزان انتشار دی‌اکسید کربن ($CO2$) به عنوان معیار آلودگی محیط زیست استفاده شده است. این متغیر، به صورت لگاریتم طبیعی سرانه انتشار دی‌اکسید کربن

1. Patent
2. Research and development (R&D)
3. Total Factor Productivity (TFP)

اندازه‌گیری می‌شود. متغیرهای توضیحی مدل نیز شامل تولید ناخالص داخلی سرانه (GDPPC)، توان دوم تولید ناخالص داخلی سرانه، سرانه مصرف انرژی (ENERGY) و شاخص پیچیدگی اقتصادی (ECI) می‌باشد. اگرچه مطالعات اولیه از جمله شافیک[1] (۱۹۹۴) و سلدن و سونگ[2] (۱۹۹۴) در زمینه منحنی زیست محیطی کوزنتس، تنها از متغیر تولید ناخالص داخلی سرانه و مربع آن در مدل استفاده کرده بودند، اما مطالعات بعدی، سرانه مصرف انرژی را نیز به مدل اضافه کردند (آنگ، ۲۰۰۹).

مطابق با فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، برای تأیید این فرضیه، باید ضریب تولید ناخالص داخلی سرانه، مثبت و ضریب مربع تولید ناخالص داخلی سرانه، منفی باشد؛ بدان معنی که با رشد درآمد، میزان انتشار دی‌اکسید کربن نیز افزایش می‌یابد ($\beta_2 > 0$) و با رسیدن به سطح آستانه، با رشد درآمد سرانه، میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش پیدا می‌کند ($\beta_3 < 0$) (کن و گوزگور، ۲۰۱۷).

همچنین میزان مصرف انرژی بیشتر نیز به انتشار بیشتر دی‌اکسید کربن منجر می‌شود؛ بنابراین، ضریب این متغیر در مدل ($\beta_4 > 0$) نیز باید مثبت باشد (آنگ، ۲۰۰۹).

در نهایت، مطابق با مبانی نظری، انتظار می‌رود که ضریب متغیر پیچیدگی اقتصادی، منفی باشد (β_5)؛ زیرا هرچه پیچیدگی اقتصادی یک کشور بیشتر باشد، نشان‌دهنده سطح بالاتر تکنولوژی، دانش و مهارت نیروی کار آن کشور بوده و انتظار می‌رود که سطح بالاتر تکنولوژی و ساختار توسعه یافته تولید، به کاهش آلودگی محیط زیست منجر گردد.

به منظور بررسی‌های تجربی، در این پژوهش، از اطلاعات ۹۹ کشور توسعه یافته و در حال توسعه در دوره ۲۰۱۷-۱۹۹۲ استفاده شده است. اطلاعات مربوط به انتشار دی‌اکسید کربن، تولید ناخالص داخلی سرانه، مصرف انرژی و کل جمعیت، از پایگاه داده بانک جهانی[3] استخراج، و برای سرانه دی‌اکسید کربن، از میزان انتشار کل دی‌اکسید کربن تقسیم بر جمعیت، استفاده شده، و همچنین تولید ناخالص داخلی سرانه نیز با بهره‌گیری از اطلاعات تولید ناخالص داخلی سرانه به قیمت ثابت سال ۲۰۱۱ و شاخص برابری قدرت خرید نسبی[4] محاسبه شده است. سرانه مصرف انرژی نیز به صورت میزان مصرف سرانه معادل کیلوگرم نفت خام[5]، در نظر گرفته شده، و در نهایت، شاخص پیچیدگی اقتصادی از پایگاه اطلس دانشگاه ام‌ای‌تی[6] گردآوری شده است.

---

1. Shafik
2. Selden & Song
3. World Bank
4. GDP per capita PPP (Constant 2011 USD)
5. Kg of oil equivalent per capita
6. www.atlas.media.mit.edu/en/rankings/country/eci/

با توجه به ماهیت داده‌ها، روش این پژوهش، مدل داده‌های تابلویی - ترکیبی از داده‌های مقطعی و سری زمانی - می‌باشد. همچنین از میان روش‌های برآورد مدل، به جای استفاده از روش‌های ایستا (حداقل مربعات معمولی)، از روش حداقل مربعات معمولی پویا استفاده شده است؛ زیرا این روش، نه تنها به ایجاد برآوردگرهای با توزیع مجانبی نرمال با میانگین صفر منجر می‌شود، بلکه روش مناسبی برای تصحیح مشکل درونزایی و خودهمبستگی در مدل است.

نادیده گرفتن درونزایی، می‌تواند به ایجاد خطای همزمان[1] در برآورد ضرایب منجر گردد. علاوه بر این، یکی دیگر از مزیت‌های روش حداقل مربعات معمولی پویا، عدم ایجاد تورش همزمان و توزیع مجانبی نرمال در نمونه های کوچک است. همچنین این روش، در حالت‌هایی که درجه هم‌جمعی متغیرهای توضیحی متفاوت باشد، قابل استفاده است. بنابراین، تخمین‌زننده حداقل مربعات معمولی پویا، امکان تخمین بردارهای همگرایی مشتمل بر متغیرهای جمعی دارای مرتبه‌های هم انباشتگی متفاوت را نیز فراهم می‌سازد (کائو و چیانگ، ۲۰۰۰ و پدرونی[2]، ۲۰۰۴ به نقل از پایتختی اسکویی و طبقچی اکبری، ۱۳۹۳).

۵. برآورد مدل

قبل از استفاده از اطلاعات اقتصادسنجی، باید نسبت به مانا بودن متغیرهای مورد استفاده در پژوهش اطمینان حاصل شود. در این پژوهش، به منظور بررسی مانایی متغیرها، از آزمون لوین، لین و چو[3] (LLC) استفاده شده، و فرض صفر این آزمون، مبتنی بر وجود ریشه واحد بوده، و نتایج این آزمون، در جدول (۲) بیانگر مانا بودن کلیه متغیرها در سطح است.

جدول ۲. آزمون ایستایی متغیرهای پژوهش با استفاده از آزمون لوین، لین و چو

متغیر	سطح		نتیجه
	آماره	احتمال	
لگاریتم انتشار دی اکسید کربن سرانه	-۲/۷۶۵	۰/۰۰۲۸	I(۰)
لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه	-۳/۹۸۷	۰/۰۰۰۰	I(۰)
مربع لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه	-۲/۴۴۷	۰/۰۰۷۲	I(۰)
لگاریتم مصرف انرژی سرانه	-۱/۹۵۷	۰/۰۲۵۲	I(۰)
پیچیدگی اقتصادی	-۳/۶۸۶	۰/۰۰۰۱	I(۰)

مأخذ: یافته های پژوهش

1. Simultaneity bias
2. Pedroni
3. Levin, Lin and Chu

پس از تأیید مانایی متغیرهای پژوهش، برای به دست آوردن بردار هم انباشـتگی، از روش حداقل مربعات معمولی پویا استفاده شده است. نتایج این بـرآورد در جـدول (۳) ملاحظـه مـی شود.

جدول ۳. تخمین بردار هم انباشتگی با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی پویا

متغیر وابسته: لگاریتم سرانه انتشار دی‌اکسید کربن				
تعداد مقاطع: ۹۹	دوره: ۲۰۱۷-۱۹۹۲		کل مشاهدات: ۲۵۷۴	
متغیرهای غیرتصادفی در معادله هم‌انباشتگی: ضریب ثابت (β_1)				
متغیرهای توضیحی	ضریب	خطای استاندارد	آماره t	احتمال
لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه	۳/۸۲۲	۰/۴۱۱	۹/۲۷۸	۰/۰۰۰۰
مربع لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه	-۰/۱۹۱	۰/۰۲۲	-۸/۷۰۹	۰/۰۰۰۰
لگاریتم مصرف انرژی سرانه	۰/۷۴۱	۰/۰۳۶	۲۰/۵۵۹	۰/۰۰۰۰
پیچیدگی اقتصادی	-۰/۰۸۴	۰/۰۲۹	-۲/۸۸۶	۰/۰۰۴۰
R^2	۰/۹۹۷			

مأخذ: یافته های پژوهش

نتایج به‌دست آمده از برآورد مدل برای متغیر لگاریتم تولید ناخـالص داخلـی سـرانه، نشـان می‌دهد که ضریب این متغیر در سطح خطای ۱ درصد، مثبت و معنـی‌دار، و همچنـین ضـریب مربع لگاریتم تولید ناخالص داخلی سرانه در سطح خطای ۱ درصد، منفی و معنی‌دار بوده است. این نتایج برای این دو متغیر، فرضیه زیست محیطی کوزنتس را تأیید می‌کند و نشان مـی‌دهـد که در ابتدا، با رشد اقتصاد، انتشار دی‌اکسید کربن افزایش یافته، اما پس از رسـیدن بـه سـطح آستانه، با رشد اقتصاد، میزان انتشار دی‌اکسید کربن، کاهش می‌یابد.

با توجه به مقادیر به‌دست آمـده بـرای ایـن دو متغیـر ($\beta_2 = ۳/۸۲۲$ و $\beta_3 = -۰/۱۹۱$)، سـطح آستانه درآمد سرانه در منحنی کوزنتس برابر ۲۱۴۰۹ دلار خواهد بود؛ بدین معنی که با عبور از این سطح درآمد سرانه، میزان انتشار دی‌اکسید کربن با رشد اقتصادی بیشتر، کاهش مـی‌یابـد. ضریب متغیر سرانه مصرف انرژی نیز در سطح خطـای ۱ درصـد معنـی‌دار بـوده و علامـت آن، نشان می‌دهد که افزایش در مصرف سرانه انرژی، به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن منجر می‌شود.

ضریب شاخص پیچیدگی اقتصادی نیز در سطح خطای ۱ درصد، معنی‌دار و منفی به‌دسـت آمده است؛ بدین معنی که با افزایش پیچیدگی اقتصادی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن، کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار ضریب به‌دست آمـده ($\beta_5 = -۰/۰۸۴$)، بـا افـزایش ۱ واحـد در شـاخص پیچیدگی اقتصادی، به طور تقریبی ۸/۴ درصد میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش مـی‌یابـد.[۱]

---

۱. با توجه به فرم لگاریتمی انتشار دی‌اکسید کربن، درصد تغییرات دی‌اکسید کربن نسبت به تغییـرات پیچیـدگی اقتصادی به صورت $\Delta CO_2\% = 100*(e^{\beta_5 \Delta ECI} - 1)$ محاسبه می‌شود.

شاخص پیچیدگی اقتصادی، نشان‌دهنده سطح تکنولوژی، دانش و مهارت در یک اقتصاد است. همان‌طور که در بخش نظری بیان شد، بسیاری از پژوهشگران حوزه محیط زیست نیز بر این باورند که نوآوری های تکنولوژیکی و استفاده از عوامل تولید با تکنولوژی بالاتر، می‌تواند بهره وری عوامل تولید و کارآیی انرژی را بهبود بخشد و از این طریق، انتشار آلایندگی را کمتر کند. همچنین تغییرات تکنولوژیکی، از طریق تغییر در ترکیب منابع انرژی، از سوخت‌های آلاینده به انرژی‌های کمتر آلاینده و تجدیدپذیر، میزان آلایندگی محیط زیست را کاهش داده است. نتایج این مطالعه نیز به صورت تجربی، تأیید می‌کند که حرکت کشورها به سمت اقتصاد پیچیده تر، می تواند به بهبود کیفیت محیط زیست کمک نماید.

در گذشته، این باور وجود داشت که رشد اقتصادی، از طریق استفاده بیش از حد منابع محدود و انتشار آلاینده‌ها، به تخریب محیط زیست منجر می‌گردد و میان رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست، تضاد وجود دارد. با این حال، نتایج این تحقیق با تأیید فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، نشان می‌دهد که نه تنها در بلندمدت، رشد اقتصادی به تخریب محیط زیست منجر نمی‌شود، بلکه از دو کانال افزایش درآمد مردم و تقاضای بیشتر برای کیفیت محیط زیست و توسعه و بهبود تکنولوژی و حرکت به سوی اقتصاد دانش‌بنیان، کیفیت محیط زیست را بهبود می‌بخشد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

امروزه، مهمترین چالش دنیای مدرن، آلودگی محیط زیست، گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی ناشی از گرمایش زمین، و به گفته سازمان فضایی ناسا، عامل اصلی این آلودگی و تغییرات آب و هوایی در دهه‌های گذشته، ناشی از فعالیت‌های بشری بوده است. با این وجود، نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، نشان می‌دهد که توسعه اقتصادی در نهایت، به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن منجر می‌شود.

نتایج بدست آمده، به طور خاص، از اثر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر انتشار دی‌اکسید کربن، نشان داد که توسعه تکنولوژیکی، تغییرات ساختاری و افزایش سطح دانش و مهارت نیروی کار در یک اقتصاد، به طور معنی‌داری در بلندمدت، انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد. از این رو، حرکت به سمت یک اقتصاد متنوع و دانش محور، می تواند به بهبود کیفیت محیط زیست کمک نماید و لازم است سیاستگذاران در کنار سایر سیاست هایی که با هدف کاهش آلودگی اعمال می کنند، به ساختار تولید و دانش محور بودن اقتصاد نیز توجه نمایند.

اغلب مطالعاتی که از سایر شاخص‌ها برای سنجش تکنولوژی استفاده کرده اند نیز اثر منفی تکنولوژی بر انتشار آلایندگی را مورد تأیید قرار داده اند. بدین ترتیب که بهبود سطح دانش و تکنولوژی، توانسته به افزایش کیفیت محیط زیست منجر گردد. به عنوان مثال، آنگ (۲۰۰۹)، علی و همکاران (۲۰۱۶)، یی و گیتا (۲۰۱۷) و برخورداری (۱۳۹۶) نیز همین نتیجه را

استخراج نموده اند. همچنین کن و گزگور (۲۰۱۷)، نشان داده اند که اثـر پیچیـدگی اقتصـادی در بلندمدت، بر انتشار دی‌اکسید کربن درکشور فرانسـه، منفـی و معنـی‌دار بـوده اسـت. نتـایج مطالعه حاضر که با استفاده از حداکثر داده های موجود در کشورهای جهان و بـه صـورت پانـل بوده است نیز نتیجه مشابهی را به‌دست آورده است.

نتایج مطالعه حاضر، نشان می دهد که حرکت کشورها به سمت تکنولوژی هـای جدیـد و ساختار تولید پیچیده تر، تاچه اندازه می تواند به بهبود وضعیت محیط زیست در جهـان کمـک نماید. به هر حال، برای برنامه ریزی بهتر در حوزه محیط زیست که یکی از دغدغه هـای اصـلی بشر بویژه در دهه‌های اخیر بوده است، شناخت عوامل اثرگذار بر انتشـار آلاینـدگی و ابزارهـای کاهش آن، می تواند حائز اهمیت باشد.

همچنین تأیید تجربی فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس، مؤید آن اسـت کـه اگرچـه با تشدید فعالیت‌های اقتصادی در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، آلودگی محیط زیسـت افـزایش می‌یابد، اما در سطوح بالاتر توسعه اقتصادی، تغییرات ساختاری در جهت اقتصاد دانش‌بنیان، در کنار آگاهی مردم در خصوص مسائل زیست محیطی و ایجاد قوانین دوستدار طبیعت، تکنولوژی بهتر و مالیات‌های زیست محیطی بیشتر، موجب می‌شود تـا از آلـودگی بیشـتر محـیط زیسـت جلوگیری شده و بهبود محیط زیست را در پی داشته باشد. به عبـارت دیگـر، بـه بیـان بکـرمن (۱۹۹۲)، اگرچه شواهد آشکاری در خصوص اثر نامطلوب رشد اقتصادی بر محیط زیست وجـود دارد، اما تنها و بهترین راه برای جلوگیری از تخریب محیط زیست، ثروتمند شدن است

منابع

- برخورداری دورباش، سجاد. (۱۳۹۶). همگرایی یا واگرایی در سرانه انتشار دی اکسید کربن در بـین کشورهای عضو اوپک با تأکید بر کیفیت مقررات و کارآیی دولت (رهیافت GMM). *مجله تحقیقـات اقتصادی*، ۵۳ (۲): ۳۰۱-۲۷۹.
- سلیمی فر، مصـطفی و دهنـوی، جـلال. (۱۳۸۸). مقایسـه منحنـی زیسـت محیطـی کـوزنتس در کشورهای عضو OECD و کشورهای در حال توسعه: تحلیل مبتنی بر داده‌های پانل. *دانش و توسعه*، ۱۶ (۲۹): ۲۰۰-۱۸۱.
- پایتختی اسکویی، سید علی و طبقچی اکبری، لاله. (۱۳۹۳). بـرآورد بـردار هـم انباشـتگی اقتصـاد خاکستری و توسعه انسانی با روش حداقل مربعات پویای پانلی. *فصلنامه مدلسازی اقتصادسنجی*، ۱ (۳): ۱۴۲-۱۲۵.

- Ahmed, U., & ArshadKhan, M. (2009). Energy demand in Pakistan: A disaggregate analysis. *The Pakistan Development Review*, 47(4), 437-455.
- Ali, W., Abdullah, A., & Azam, M. (2016). The dynamic linkage between technological innovation and carbon dioxide emissions in Malaysia: An autoregressive distributed lagged bound approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 6(3), 389-400.

- Ang, J. B. (2009). CO2 emissions, research and technology transfer in China. *Ecological Economics*, 68(10), 2658-65.
- Arrow, K.; Bolin, B.; Costanza, R.; Dasgupta, P.; Folke, C., Holling, C. S., & Pimentel, D. (1995). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological Economics*, *15*(2), 91-95.
- Barkhordari, S. (2018). Convergence or divergence in per capita CO2 emissions among OPEC countries focused on regularity quality and government effectiveness (GMM approach). *Journal of Economic Research,* 53(2), 279-301 (In Persian).
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment?. *World Development*, *20*(4), 481-496.
- Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2005). Economic growth and the environment: A review of theory and empirics. In Handbook of economic growth (Vol. 1, pp. 1749-1821). Elsevier.
- Can, M., & Gozgor, G. (2017). The impact of economic complexity on carbon emissions: Evidence from France. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 16364-70.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455.
- Eren, H. (2001). Environmental impacts of technology. Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (No. w3914). National Bureau of Economic Research.
- Hang, G., & Yuan-Sheng, J. (2011). The relationship between CO2 emissions, economic scale, technology, income and population in China. *Procedia Environmental Sciences*, 11, 1183-88.
- Hausmann, R.; Hidalgo, C. A.; Bustos, S.; Coscia, M.; Simoes, A., & Yildirim, M. A. (2013). *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. Mit Press.
- Hidalgo, C. A. (2009). *The Dynamics of Economic Complexity and the Product Space over a 42 Year Period* (No. 189). Center for International Development at Harvard University.
- Hidalgo, C. A., & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(26), 10570-75.
- Kao, C., & Chiang, M. H. (2001). On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. In *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels* (pp. 179-222). Emerald Group Publishing Limited.
- Komen, M. H.; Gerking, S., & Folmer, H. (1997). Income and environmental R&D: Empirical Evidence from OECD Countries. *Environment and Development Economics*, *2*(4), 505-515.
- Kuznets, S. (1995). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, *45*(1), 1-28.
- Lantz, V., & Feng, Q. (2006). Assessing income, population, and technology impacts on CO2 emissions in Canada: Where's the EKC?. *Ecological Economics,* 57(2), 229-238.
- Neagu, O., & Teodoru, M. C. (2019). The relationship between economic complexity, energy consumption structure and greenhouse gas emission: heterogeneous panel evidence from the EU countries. *Sustainability*, 11(2), 497.
- Panayotou, T. (1993). *Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development* (No. 992927783402676). International Labour Organization.

- Paytakhti Oskooe, S. A. & Tabaghchi Akbari, L. (2016). Cointegration vector estimation by panel DOLS: Gray economy and human development, *Econometric Modelling*, 1(3), 125-142 (In Persian).
- Pedroni, P. (2004). Panel cointegration: Asymptotic and finite sample properties of pooled time series tests with an application to the PPP hypothesis. *Econometric Theory*, 20(3), 597-625.
- Salimifar, M. & Dehnavi J. (2010). The Comparison of the environmental Kuznets curve in developing and OECD countries: a panel data analysis. *Financial Monetary Economics*, 16(29), 181-200 (In Persian).
- Samargandi, N. (2017). Sector value addition, technology and CO2 emissions in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 868-877.
- Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental quality and development: Is there a Kuznets curve for air pollution emissions?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147-162.
- Shafik, N. (1994). Economic development and environmental quality: An econometric analysis. *Oxford Economic Papers*, 46, 757-773.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-39.
- Stern, D. I., & Common, M. S. (2001). Is there an environmental Kuznets curve for sulfur?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 41(2), 162-178.
- Sueyoshi, T.; Li, A., & Liu, X. (2019). Exploring sources of China's CO2 emission: Decomposition analysis under different technology changes. *European Journal of Operational Research*, 279(3), 984-995.
- Sweet, C. M., & Maggio, D. S. E. (2015). Do stronger intellectual property rights increase innovation?. *World Development*, *66*, 665-677.
- Vukina, T.; Beghin, J. C., & Solakoglu, E. G. (1999). Transition to markets and the environment: Effects of the change in the composition of manufacturing output. *Environment and Development Economics*, 4(4), 582-598.
- Wang, Z.; Yang, Z.; Zhang, Y., & Yin, J. (2012). Energy technology patents-CO2 emissions nexus: An empirical analysis from China. *Energy Policy*, 42, 248-260.
- Wei, W. X., & Yang, F. (2010). Impact of technology advance on carbon dioxide emission in China. *Stat Res*, 27(7), 36-44.
- World Bank. (1992). The World Bank annual report 1992. Washington, DC: The World Bank.
- Yii, K. J., & Geetha, C. (2017). The nexus between technology innovation and CO2 emissions in Malaysia: Evidence from granger causality test. *Energy Procedia,* 105, 3118-24.
- Yin, J.; Zheng, M., & Chen, J. (2015). The effects of environmental regulation and technical progress on CO2 Kuznets curve: An evidence from China. *Energy Policy*, 77, 97-108.