

Examining the Impact of Renewable Energy Consumption Shock on the Circular Economy in Iran

Fateh Habibi *

Associate professor, Department of Economic sciences, faculty of humanities and social sciences, University of Kurdistan, sanandaj, iran.

**Mohammad Parsa
Ehterami**

Ph.D. student, Department of Economic sciences, faculty of humanities and social sciences, University of Kurdistan, sanandaj, iran

Abstract

This study examined the asymmetric effects of positive and negative changes in renewable energy consumption on circular economy performance in Iran from 1990 to 2020. Data for seven variables—including recycled energy from biomass and waste, renewable energy consumption, GDP growth, industrialization, urbanization, population density, and carbon emissions—were collected for the period. The nonlinear autoregressive distributed lag (NARDL) method was used to analyze short-run and long-run relationships, while the fully modified ordinary least squares (FMOLS) method confirmed the stability of long-run relationships. Findings from both methods showed complete alignment in the direction and significance of variables. Carbon emissions, urbanization, and negative changes in renewable energy consumption had a negative and significant effect on the circular economy, whereas positive changes demonstrated a considerable reinforcing effect. Population density and industrialization approached statistical significance, but GDP growth showed no significant effect. In the short run, the circular economy responded quickly and positively to positive renewable energy changes, while urbanization and carbon emissions exhibited dual effects. Based on the results, sustainable

* Corresponding Author: f.habibi@uok.ac.ir

How to Cite: xxxxxxxx

investment in renewable energy, development of urban green infrastructure, and reform of pollution control policies were identified as the most critical strategies for strengthening Iran's circular economy.

Keywords: renewable energy consumption, Circular economy, Nonlinear autoregressive distributed lag model, Fully modified ordinary least squares model, Iran

JEL Classification: Q42, Q57, C32, C13, O53



بررسی تأثیر شوک مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی در کشور ایران

فاتح حبیبی * ID

دانشیار، گروه علوم اقتصادی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه کردستان،
شهر سنندج، ایران

محمد پارسا

احترامی ID

دانشجوی دکتری، گروه علوم اقتصادی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه
کردستان، شهر سنندج، ایران

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات نامتقارن تغییرات مثبت و منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر بر عملکرد اقتصاد چرخشی در ایران طی سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ انجام شد. داده‌های هفت متغیر شامل سهم انرژی بازآفرینی از زیست توده و زباله در سبد انرژی کشور، مصرف انرژی تجدیدپذیر، رشد تولید ناخالص داخلی، صنعتی شدن، شهرنشینی، تراکم جمعیت و انتشار کربن برای دوره زمانی مورد بررسی گردآوری شد. برای تحلیل روابط کوتاه مدت و بلندمدت از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی غیرخطی و برای تأیید پایداری روابط بلندمدت از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده استفاده گردید. یافته‌های هر دو روش نشان دهنده همراستایی کامل در جهت گیری و معنی داری متغیرها بود؛ به گونه‌ای که انتشار کربن، شهرنشینی و تغییرات منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر اثر منفی و معناداری بر اقتصاد چرخشی داشتند، در حالی که تغییرات مثبت آن اثر تقویتی قابل توجهی نشان داد. تراکم جمعیت و صنعتی شدن در آستانه‌ی معنی داری قرار گرفتند، اما رشد تولید ناخالص داخلی فاقد اثر معنادار بود. در کوتاه مدت، واکنش اقتصاد چرخشی به تغییرات مثبت انرژی تجدیدپذیر سریع و مثبت بوده و اثرات شهرنشینی و انتشار کربن دوگانه ظاهر شد. بر اساس نتایج، سرمایه گذاری پایدار در انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه‌ی زیرساخت‌های سبز شهری و اصلاح سیاست‌های کنترل آلودگی به عنوان مهم ترین راهکارهای تقویت اقتصاد چرخشی در ایران شناسایی شدند.

کلیدواژه‌ها: مصرف انرژی تجدیدپذیر، اقتصاد چرخشی، مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی غیرخطی، مدل حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده، ایران
طبقه بندی JEL: O53، C13، C32، Q57، Q42

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، الگوی اقتصاد خطی (استخراج، تولید، مصرف، دفع) به عامل اصلی تخریب محیط‌زیست، هدررفت منابع و افزایش ریسک ناشی از کمبود مواد اولیه تبدیل شده است. رشد جمعیت، افزایش تقاضا و محدودیت منابع تجدیدناپذیر، پایداری این الگو را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. در چنین شرایطی، اقتصاد چرخشی به‌عنوان پارادایمی جایگزین برای افزایش بهره‌وری منابع، کاهش پسماند و حفظ ارزش مواد در چرخه تولید، موردتوجه قرار گرفته است (گیس‌دورفر و همکاران^۱، ۲۰۱۷). این رویکرد از طریق تمرکز بر طراحی پایدار، استفاده مجدد، تعمیر، بازیافت و بازتولید، سعی می‌کند که رشد اقتصادی را از مصرف روبه رشد منابع طبیعی تفکیک کند (الن مک‌آرتور^۲، ۲۰۱۵). لذا، بررسی ابعاد اقتصادی، نهادی و سیاستی اقتصاد چرخشی و همچنین تحلیل موانع و الزامات استقرار آن می‌تواند در خصوص تحقق توسعه پایدار و افزایش تاب‌آوری اقتصادی ایفای نقش کند (گیسلینی و همکاران^۳، ۲۰۱۶).

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های اقلیمی، نوسان قیمت سوخت‌های فسیلی و مسائل امنیت انرژی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را در بسیاری از اقتصادها افزایش داده است. بااین‌حال، این مصرف به‌طور خطی و یکنواخت پیش نمی‌رود و تحت تأثیر شوک‌هایی مانند تغییرات سیاستی، پیشرفت‌های فناوری، بحران‌های اقتصادی یا تنش‌های ژئوپلیتیکی دچار نوسان می‌شود (بلوخ و همکاران^۴، ۲۰۱۵). در اقتصاد کشورهای در حال توسعه، به‌دلیل محدودیت‌های نهادی، مالی و فناوری ساختارهای انرژی، همچنان ابهامات قابل توجهی در خصوص ماهیت، پایداری و کانال‌های انتقال شوک‌های مصرف انرژی تجدیدپذیر وجود دارد (باتاچاریا و همکاران^۵، ۲۰۱۶). لذا، شناسایی اثرات تغییرات مصرف انرژی تجدیدپذیر بر عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی، می‌تواند نقش مهمی را در جهت طراحی سیاست‌های انرژی پایدار و افزایش تاب‌آوری اقتصادی در مقابل شوک‌های انرژی داشته باشد.

بررسی اثر شوک‌های مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی در ایران از نظر کمی و سیاست‌گذاری اهمیت دارد؛ زیرا ساختار انرژی کشور به‌شدت متکی بر سوخت‌های

¹ Geissdoerfer et al.

² Ellen MacArthur

³ Ghisellini et al.

⁴ Bloch et al.

⁵ Bhattacharya et al.

فسیلی است. بیش از ۹۶ درصد انرژی مصرفی از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر کمتر از ۲ درصد است، در حالی که میانگین جهانی حدود ۱۳ تا ۱۵ درصد برآورد می‌شود. همچنین، شدت انرژی در ایران حدود ۲/۳ برابر میانگین جهانی و انتشار کربن دی اکسید بیش از ۷۰۰ میلیون تن در سال است. این وضعیت نشان می‌دهد که حتی تغییرات محدود در مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌تواند آثار قابل توجهی بر کاهش فشارهای زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری منابع در چارچوب اقتصاد چرخشی داشته باشد (بانک جهانی^۱، ۲۰۲۲).

پس از تبیین مسأله و ضرورت پژوهش، بخش دوم به مبانی نظری و مرور مهم‌ترین مطالعات پیشین داخلی و خارجی، بخش‌های سوم و چهارم به ترتیب به روش‌شناسی و یافته‌های پژوهش، و در نهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها و سیاستی می‌پردازد.

۲. مبانی نظری

اقتصاد چرخشی رویکردی در توسعه پایدار است که با کاهش مصرف منابع، جلوگیری از اتلاف مواد و افزایش بهره‌وری، در پی حفظ ارزش محصولات و منابع در چرخه اقتصادی تا حد ممکن است. این رویکرد در مقابل الگوی خطی سنتی قرار دارد که بر بهره‌برداری، ساخت، استفاده و دورریزی استوار است و بر کاهش پسماند، استفاده مجدد، تعمیر، بازتولید و بازیافت تأکید می‌کند. تحقق آن نیازمند تغییر در الگوی مصرف انرژی و حرکت به سوی تولید و مصرف کارآمدتر و کم‌کربن است. انرژی پاک و پایدار با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، فشارهای زیست‌محیطی را کم کرده و کارایی منابع را افزایش می‌دهد. بنابراین، اقتصاد چرخشی فراتر از مدیریت پسماند بوده و نیازمند توجه هم‌زمان به ساختار مصرف انرژی و توسعه منابع تجدیدپذیر است (کریستیا و ربی^۲، ۲۰۲۳). شوک مصرف انرژی تجدیدپذیر به تغییرات ناگهانی، غیرمنتظره و معنادار در سطح یا سهم مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر اطلاق می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل سیاستی، اقتصادی، فناورانه و نهادی باشد. این شوک‌ها در اثر تغییر یارانه‌ها، سیاست‌های خرید تضمینی برق، نرخ ارز، محدودیت‌های سرمایه‌گذاری، تحریم‌ها و شوک‌های اقلیمی مانند خشکسالی و تغییرات

¹ World Bank

² Kristia & Rabbi

الگوی باد و تابش ایجاد می‌شوند. برخلاف تغییرات تدریجی، شوک‌های انرژی ماهیتی ناپایدار و نامتقارن دارند؛ به گونه‌ای که اثر تغییرات مثبت لزوماً با تغییرات منفی برابر و متقارن نیست (آدبایو و همکاران^۱، ۲۰۲۳). انرژی علاوه بر یک نهاده تولیدی، عاملی کلیدی در جهت حفظ ارزش مواد در چرخه اقتصادی محسوب می‌شود. بدون دسترسی به انرژی پایدار، پاک و مقرون به صرفه، اجرای مؤثر راهبردهای چرخشی در حوزه‌هایی مانند مدیریت پسماند، بازچرخانی آب و تولید صنعتی کم کربن امکان‌پذیر نخواهد بود (کرچیر و همکاران^۲، ۲۰۲۵).

۱-۲. کانال‌های انتقال شوک مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی

کانال زیست‌محیطی و انتشار کربن: اصلی‌ترین راه‌های انتقال اثرات انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی را می‌توان بهبود کیفیت محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بیان کرد. استفاده فراوان از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و زیست‌توده منجر به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی شده که این کاهش با اهداف اقتصاد چرخشی در رابطه با کاهش اتلاف منابع و حفظ اکوسیستم‌ها همسو خواهد بود (وانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۵).

کانال کارایی منابع و حلقه‌های بسته انرژی و مواد: مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌تواند از طریق افزایش کارایی منابع و تقویت حلقه‌های بسته در اقتصاد چرخشی اثرگذار باشد. هدف نهایی و اصلی اقتصاد چرخشی بازپس‌گیری انرژی و مواد در طول چرخه تولید و مصرف است. ترکیب و تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر با چرخه زندگی محصولات و انرژی در کاهش ضایعات، افزایش بازیابی مواد و بهبود مدیریت پسماند می‌تواند نقش داشته باشد (القحطانی و افی‌شراره^۴، ۲۰۲۵).

کانال اقتصادی، مالی و سرمایه‌گذاری: یکی از کانال‌های مهم اثرگذاری تغییرات مصرف انرژی تجدیدپذیر، بعد اقتصادی، مالی و سرمایه‌گذاری است. به این معنا که افزایش یا کاهش مصرف انرژی‌های پاک می‌تواند بر مخارج سرمایه، ریسک پروژه‌ها و انتظارات

¹ Adebayo et al.

² Kirchherr et al.

³ Wang et al.

⁴ Alqahtani & Afy-Shararah

سرمایه گذاران تأثیر بگذارند و در نتیجه موجب تقویت یا تضعیف جریان سرمایه گذاری در فعالیت‌های مرتبط با اقتصاد چرخشی شود (تقی زاده حصاری و رسولی نژاد^۱، ۲۰۲۵)

۲-۲. تأثیر شوک مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی در کشور ایران

تغییرات مصرف انرژی تجدیدپذیر در ایران به تغییرات ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی در سطح یا سهم مصرف انرژی‌های پاک مانند خورشیدی، بادی و زیست‌توده گفته می‌شود که می‌تواند بر اثر تصمیم‌های سیاستی، محدودیت‌های شبکه، تغییرات ارزی و غیره رخ دهد. هر تغییری که در مصرف انرژی پاک صورت می‌گیرد می‌تواند مسیر حلقه بستگی منابع را با ضعف و قدرت مواجه کند (عقلی مقدم^۲، ۲۰۲۵). از مهم‌ترین مسیرهای اثرگذاری تغییرات مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی در ایران، می‌توان به تغییر سیگنال‌های سیاستی و ریسک سرمایه‌گذاری اشاره کرد. بهبود حمایت‌های سیاستی، مانند قراردادهای تضمینی و اتصال به شبکه، با ایجاد تغییر مثبت در مصرف انرژی تجدیدپذیر، اطمینان بنگاه‌ها برای ورود به فعالیت‌های چرخشی را افزایش می‌دهد. در مقابل، ضعف یا بی‌ثباتی سیاستی موجب تغییر منفی شده و در نهایت اجرای پروژه‌های چرخشی را به تعویق می‌اندازد (مسرت^۳، ۲۰۰۴). از طرفی دیگر، ضعف هماهنگی، بی‌ثباتی سیاست‌ها و تعارض منافع می‌تواند توسعه انرژی‌های پاک را ناپایدار کرده و اجرای اقتصاد چرخشی را دشوار کند. همچنین، پذیرش اجتماعی، توان اجرایی دولت و اعتماد به سیاست‌ها نقش مهمی در موفقیت گذار انرژی و پیشبرد اقتصاد چرخشی دارند (عقلی مقدم^۴، ۲۰۲۵). به‌طور کلی، تغییرات مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌توانند اثرات زمان‌مند و نامتقارنی را بر اقتصاد چرخشی داشته باشند. بنابراین، هماهنگی سیاست‌های اقتصادی، زیرساختی و نهادی نقش مهمی در تبدیل شوک‌های مصرف انرژی تجدیدپذیر به یک عامل تقویت‌کننده اقتصاد چرخشی دارد (پاپا و همکاران^۵، ۲۰۲۲).

۲-۳. پیشنهادها و پژوهش

۲-۳-۱. پیشنهاد پژوهش داخلی

¹ Taghizadeh-Hesary and Rasoulinezhad

² Aghlimoghadam

³ Massarrat

⁴ Aghlimoghadam

⁵ Popa et al.

استادزاد (۱۴۰۴) در پژوهش خود به بررسی نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران در بازه زمانی (۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲) با استفاده از یک رویکرد پویایی سیستمی^۱ پرداخته است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از اتخاذ سیاست‌های مناسب و حمایت از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم ۴۷ درصدی منابع تجدیدپذیر در خصوص تولید برق تا سال ۱۴۳۰ قابل دسترسی است.

طباطبایی (۱۴۰۳) در مطالعه خود به بررسی اثر انرژی تجدیدپذیر و توسعه مالی بر انتشار کربن بر اساس مصرف در ایران طی بازه زمانی (۱۹۹۰ الی ۲۰۲۱) با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه توزیعی^۲، حداقل مربعات معمولی کاملاً تعدیل شده^۳ و حداقل مربعات معمولی پویا^۴ پرداخته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که توسعه مالی و مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌توانند به کاهش انتشار کربن مبتنی بر مصرف در ایران کمک کنند؛ در مقابل، توسعه اقتصادی و توسعه مالی می‌توانند موجب افزایش انتشار کربن مبتنی بر مصرف شوند. قادری و پرورش (۱۴۰۲) در پژوهش خود به بررسی حکمرانی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، شهرنشینی و رشد اقتصادی بر انتشار دی‌اکسید کربن در ایران در بازه زمانی (۲۰۰۰ الی ۲۰۲۰) با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی^۵ پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که افزایش تولید ناخالص داخلی سرانه موجب رشد انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. همچنین، مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی در کوتاه‌مدت و بلندمدت انتشار دی‌اکسید کربن در ایران را افزایش می‌دهد. در مقابل، شهرنشینی در کوتاه‌مدت اثر مثبت و در بلندمدت اثر معکوس بر انتشار کربن دی‌اکسید دارد. پرهیزکار کهنه اوغاز و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه خود به بررسی اثر مصرف انرژی تجدیدپذیر بر توسعه پایدار در کشورهای عضو اوپک طی دوره زمانی (۱۹۹۰ الی ۲۰۱۹) با استفاده از روش داده‌های تابلویی^۶ پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که در کشورهای نمونه، مصرف انرژی تجدیدپذیر با رشد اقتصادی و انتشار کربن دی‌اکسید رابطه معنی‌داری ندارد؛ اما مصرف انرژی تجدیدناپذیر با هر دو متغیر، همبستگی مثبت و معناداری دارد که ناشی از

¹ System Dynamics

² Autoregressive Distributed Lag Model

³ Fully Modified Ordinary Least Squares

⁴ Dynamic Ordinary Least Squares

⁵ Autoregressive Distributed Lag Model

⁶ Panel Data method

سهم اندک انرژی‌های پاک در برابر سهم غالب سوخت‌های فسیلی در سبد انرژی این کشورهاست.

۲-۳-۲. پیشینه پژوهش خارجی

یانگ و کیو^۱ (۲۰۲۵) در مطالعه خود به بررسی پیشبرد اقتصاد چرخشی از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر در مقابل انرژی هسته‌ای در کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی در بازه زمانی (۲۰۰۰ الی ۲۰۱۹) با استفاده از روش رگرسیون کوانتایل گشتاوری^۲ پرداخته‌اند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که نقش انرژی هسته‌ای در ترویج اقتصاد چرخشی در تمامی کوانتایل‌ها منفی است، درحالی‌که انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور مثبت از تحقق اقتصاد چرخشی در کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی حمایت می‌کنند.

وانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۵) در پژوهش خود به بررسی رابطه متقابل بین استفاده از انرژی تجدیدپذیر و اجرای چارچوب‌های اقتصاد چرخشی و نقش آن در شکل‌دهی به پایداری زیست‌محیطی در ۳۰ استان چین در بازه زمانی (۲۰۰۰ الی ۲۰۲۳) پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو عامل اقتصاد چرخشی و انرژی تجدیدپذیر در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن مؤثرند؛ انرژی تجدیدپذیر وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد و اقتصاد چرخشی با افزایش کارایی منابع و کاهش پسماند، کارایی قانون ترویج اقتصاد چرخشی چین را نشان می‌دهد.

لورتی و همکاران^۴ (۲۰۲۳) در پژوهش خود به بررسی تأثیر تولید برق تجدیدپذیر بر پایداری در چارچوب اقتصاد چرخشی طی بازه زمانی (۲۰۱۱ الی ۲۰۲۰) با استفاده از روش داده‌های تابلویی با اثرات ثابت^۵ و حداقل مربعات تجمیع شده^۶ پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تولید برق تجدیدپذیر با پس‌انداز تعدیل شده، کاهش خالص پوشش جنگلی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر رابطه مثبت و مستقیم، و با انتشار دی‌اکسید کربن و روزهای درجه سرمایشی رابطه منفی و معکوس دارد.

^۱ Yang & Qiu

^۲ Method of Moments – Quantile Regression

^۳ Wang et al.

^۴ Laureti et al.

^۵ Fixed Effects

^۶ Pooled Ordinary Least Squares

خان و اوسینسکا^۱ (۲۰۲۲) در مطالعه خود به بررسی مصرف انرژی تحت شرایط اقتصاد چرخشی در کشورهای اتحادیه اروپا در بازه زمانی (۲۰۱۰ الی ۲۰۱۹) با استفاده از رگرسیون داده‌های تابلویی^۲ پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بنابه صنعتی‌شدن، شهرنشینی و رشد جمعیت، تقاضای جهانی انرژی روبه رشد است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم پژوهش‌های متعدد در زمینه انرژی تجدیدپذیر و اقتصاد چرخشی، همچنان خلأ علمی قابل‌توجهی در تحلیل یکپارچه این دو حوزه در بستر اقتصاد ایران وجود دارد. پژوهش حاضر در چهار سطح به کاستن از این خلأ می‌پردازد. نخست، برخلاف پژوهش‌های پیشین که بر مصرف کلی انرژی تجدیدپذیر یا تأثیر آن بر رشد اقتصادی و انتشار کربن متمرکز بوده‌اند، در این مطالعه برای نخستین بار در ادبیات داخلی، انرژی بازیافتی از زیست‌توده و زباله به‌عنوان شاخص عملکردی اقتصاد چرخشی وارد مدل شده است. دوم، ترکیب دو روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی غیرخطی و حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده، امکان سنجش اثرات نامتقارن شوک‌های مثبت و منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کند. سوم، با در نظر گرفتن همزمان هفت متغیر کلیدی اقتصادی، جمعیتی و زیست‌محیطی، چارچوبی جامع‌تر از مطالعات قبلی ارائه شده است. چهارم، تمرکز بر ایران با ویژگی‌های خاص ساختاری و استفاده از بازه زمانی مناسب، دانش موجود را در زمینه کشورهای با شرایط مشابه توسعه می‌بخشد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. روش NARDL

در مدل‌های خودرگرسیون با وقفه توزیعی^۳ اثر بلندمدت بین متغیرها هم در جهت افزایش و هم در جهت کاهش یک اندازه خواهد بود. هنگامی که اثرات افزایش و یا کاهش به یک اندازه نباشد و به عبارت دیگر در صورت مواجه شدن با اثرات نامتقارن در افزایش و کاهش متغیرها، باید از الگوی غیرخطی و نامتقارن استفاده کرد. لذا، در این پژوهش از رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی^۴ استفاده می‌شود. شین و همکاران^۵ (۲۰۱۴) با گسترش مدل خطی خودرگرسیون با وقفه توزیعی، رهیافت الگوی خود

^۱ Khan & Osińska

^۲ Panel Data Regression

^۳ Autoregressive Distributed Lag

^۴ Nonlinear Auto Regressive Distributed Lag Method (NARDL)

^۵ Shin et al.

رگرسیون با وقفه‌های توزیعی غیرخطی را مطرح کردند. در این روش حتی اگر تمام متغیرها هم‌جمع از درجه یک $I(1)$ یا ترکیبی از درجه صفر $I(0)$ و یک $I(1)$ باشند، می‌توان برآورد مدل را انجام داد و این ویژگی مزیت بالقوه‌ای در این مدل به حساب می‌آید (پسران و همکاران^۱، ۲۰۰۱). همچنین وقتی تعداد مشاهدات اندک باشد و زمانی که متغیرهای توضیحی درون‌زا هستند، می‌توان از رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی استفاده کرد. روابط نامتقارن ممکن است در کوتاه‌مدت یا بلندمدت و یا در هر دو، وجود داشته باشد و در این روش ساختار برآورد به شکلی است که اثر تغییرات (مثبت و منفی) متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته در کوتاه‌مدت و بلندمدت و به‌صورت مجزا را ممکن می‌کند (آریز و همکاران^۲، ۲۰۱۷).

لازم به توضیح است که در این پژوهش، اجزای مثبت و منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر به معنای شناسایی شوک‌های ساختاری یا برون‌زای این متغیر نیستند؛ بلکه بیانگر افزایش‌ها و کاهش‌های انباشته مصرف انرژی تجدیدپذیر هستند که بر اساس تجزیه جزئی متغیر در چارچوب مدل رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی محاسبه می‌شوند. از این رو، هدف از این تفکیک، شناسایی و مقایسه آثار نامتقارن افزایش و کاهش مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی است. در مدل رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی متغیر مستقل مصرف انرژی تجدیدپذیر به مقادیر مثبت و منفی تجزیه می‌شود که در معادله زیر قابل مشاهده است.

$$\begin{aligned} REC_t &= REC_t^+ + REC_t^- \\ REC_t^+ &= \sum_{j=1}^t \Delta REC_j^+ = \sum_{j=1}^t \max(\Delta REC_j, 0) \\ REC_t^- &= \sum_{j=1}^t \Delta REC_j^- = \sum_{j=1}^t \min(\Delta REC_j, 0) \end{aligned} \quad (1)$$

بنابراین

$$CRW_t = \beta_1 + \beta_2 LGDP_t + \beta_3 LIND_t + \beta_4 URB_t + \beta_5^+ REC_t^+ + \beta_6^- REC_t^- + \beta_7 POD_t + \beta_8 CO2_t + \varepsilon_t$$

¹ Pesaran et al.

² Arize et al.

(۲)

در مدل فوق، REC_t^+ تغییرات مثبت و REC_t^- تغییرات منفی شاخص مصرف انرژی تجدیدپذیر است. β_2 تا β_8 پارامترهای بلندمدت متغیرهای مدل هستند. براساس مدل نامتقارن (NARDL) اگر β_5^+ مثبت باشد، نشان می‌دهد که REC_t^+ رابطه مثبتی با اقتصاد چرخشی دارد و بالعکس. اگر β_6^- مثبت باشد، بدین معنی است که REC_t^- رابطه منفی با متغیر اقتصاد چرخشی دارد و بالعکس. برای آنکه بتوان از مدل NARDL در برآورد ضرایب کوتاه مدت و بلندمدت مدل استفاده کرد باید بین متغیرها هم‌انباشتگی نامتقارن وجود داشته باشد. از این رو مدل تصحیح خطای نامقید (UECM) به منظور تحلیل هم‌انباشتگی کرانه‌ها پسران و همکاران (۲۰۰۱) نیاز است.

$$\begin{aligned} \Delta CRW_t = & \delta_0 + \sum_{j=1}^{p1} \delta_{1i} \Delta LCRW_{t-i} + \sum_{j=1}^{p2} \delta_{2i} \Delta LGDP_{t-i} \\ & + \sum_{j=1}^{p3} \delta_{3i} \Delta IND_t + \sum_{j=1}^{p4} \delta_{4i} \Delta URB_{t-i} \\ & + \sum_{j=1}^{p5} (\delta_j^+ \Delta REC_{t-j}^+ + \delta_j^- \Delta REC_{t-j}^-) \\ & + \sum_{j=1}^{p6} \delta_{6i} \Delta CO2_{t-1} + \sum_{j=1}^{p7} \delta_{7i} \Delta POD_{t-1} \\ & + \lambda_1 CRW_{t-1} + \lambda_2 GDP_{t-1} + \lambda_3 IND_{t-1} \\ & + \lambda_4 URB_{t-1} + \lambda_5 REC_{t-1}^+ + \lambda_6 REC_{t-1}^- \\ & + \lambda_7 POD_{t-1} + \lambda_8 CO2_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه بالا، λ_1 تا λ_8 ضرایب بلندمدت، Δ عملگر تفاضل، ε_t جمله اختلال و p تعداد وقفه‌های بهینه در مدل است. این وقفه‌ها با کمک معیارهایی مانند اکائیک، شوارتز-بیزین و حنان کوئین تعیین می‌شود. در این رابطه پویایی کوتاه مدت توسط متغیر وابسته، مقادیر با وقفه و جاری متغیرهای مستقل نشان داده می‌شود.

تجدیدپذیر (REC) است. $\beta_5^- = -\frac{\lambda_6}{\lambda_1}$ و $\beta_6^+ = -\frac{\lambda_5}{\lambda_1}$ ضرایب نامتقارن بلندمدت متغیر مصرف انرژی

برای بررسی وجود رابطه هم‌جمعی غیرخطی (نامتقارن) میان متغیرهای مستقل و وابسته از آزمون کرانه‌ها^۱ و مقادیر اصلاح شده آماره F ارائه شده توسط پسران و همکاران (۲۰۰۱) و شین و همکاران (۲۰۰۱) استفاده می‌شود. به منظور انجام آزمون باند که عدم وجود ارتباط سطحی بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته را نشان می‌دهد باید ضرایب سطوح با وقفه متغیرهای مستقل و وابسته را در معادله زیر برابر صفر قرار داد. از این جهت فرضیه صفر که مبتنی بر عدم وجود هم‌انباشتگی است به صورت معادله زیر بیان می‌شود.

$$H_0: \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_8 = 0 \quad (۴)$$

۲-۳. روش FMOLS

در این پژوهش برای بررسی هم‌انباشتگی و روابط بلندمدت متغیرها، روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده^۲ که توسط فیلیپس و هانسن^۳ (۱۹۹۰)، معرفی شده استفاده شده است. روش حداقل مربعات معمولی انگل-گرنجر، اگرچه از ویژگی سازگاری برخوردار است، اما برآوردهای آن در نمونه‌های کوچک ممکن است دارای تورش و توزیع غیرنرمال باشند. با افزایش حجم نمونه، سازگاری و کارایی این روش بهبود می‌یابد؛ با این حال، محدودیت آن در نمونه‌های کوچک ضرورت استفاده از روش‌های اصلاح‌شده را مطرح می‌کند. در این راستا، روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده با اعمال اصلاح تورش و درون‌زایی، می‌تواند برآوردهای مناسب‌تری از روابط بلندمدت میان متغیرهای هم‌انباشته ارائه دهد. همچنین فیلیپس نشان داد که برآوردهای حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده مانند روش یوهانسن^۴ (۱۹۸۸)، در شرایطی که تمام متغیرها درون‌زا هستند به‌طور مجانبی کارا است. در مجموع، می‌توان گفت که روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده که توسط فیلیپس و هانسن ارائه شد، امکان برآورد کارآمد و سازگار بردار هم‌انباشتگی و در نتیجه، استخراج رابطه بلندمدت میان متغیرهای هم‌انباشته را فراهم می‌کند. در این خصوص چنانچه فضای $n+1$ بعدی فرایند برداری سری زمانی (X, Y) و معادله هم‌جمعی مربوطه را در نظر بگیریم:

$$Y_t = X_t + D_{it}Y_1 + u_{1t} \quad (۵)$$

^۱ Bound Test

^۲ Fully Modified Ordinary Least Squares

^۳ Phillips & Hansen

^۴ Johansen

$D_t = (D_{it} \cdot D_{2t})$ رگرسیونهای روند معین قطعی و X متغیرهای توضیحی تصادفی است که توسط یک دستگاه معادله FMOLS به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\beta_{FMOLS} = (\sum_{t=1}^T Z_t Z_t')^{-1} (\sum_{t=1}^T Z_t MP_t^+ - T [\lambda_{22}^+, 0]') \quad (۶)$$

که با تصحیح متغیر وابسته داریم:

$$MP_t^+ = MP_t - \hat{\omega}_{12} \hat{\Omega}_{22}^{-1} \hat{u}_{2t} \quad (۷)$$

همچنین، ماتریس متغیرهای توضیحی عبارت است از:

$$Z_t = [REC, GDP, IND, URB, POD, CO2, D_t] \quad (۸)$$

و جمله تصحیح اریب:

$$\hat{\lambda}_{22}^+ = \hat{\lambda}_{12} - \hat{\omega}_{12} \hat{\Omega}_{22}^{-1} \hat{\Lambda}_{22} \quad (۹)$$

و ماتریس کوواریانس بلندمدت:

$$\Omega = [\omega_{11} \omega_{12}, \omega_{21} \Omega_{22}] = \lim T (T \rightarrow \infty) f_0(1/T) \sum_{t=1}^T E[u_t u_s'] \quad (۱۰)$$

به منظور برآورد FMOLS با تصحیح کامل داریم:

$$\hat{\beta} - FMOLS = [\sum_{t=1}^T \tilde{X}_t \tilde{X}_t']^{-1} \times [\sum_{t=1}^T \tilde{X}_t \tilde{MP}_t] - T(\hat{\Lambda}_{21}^+ - \hat{\omega}_{21} \hat{\Omega}_{22}^{-1} \hat{\Lambda}_{22}) \quad (۱۱)$$

مدل تصحیح شده نهایی به صورت زیر است:

$$CRW_t^+ = \hat{\beta}_1 REC_t + \hat{\beta}_2 GDP_t + \hat{\beta}_3 IND_t + \hat{\beta}_4 URB_t + \hat{\beta}_5 POD_t + \hat{\beta}_6 CO2_t + D_1 \hat{\gamma} + \eta_t \quad (۱۲)$$

جدول (۱): خلاصه‌ای از متغیرهای پژوهش

نام به فارسی	نام به انگلیسی	توضیحات	نماد	منبع استخراج
سهم انرژی بازیافتی از زیست‌توده و زباله در سبد انرژی کشور	Combustible renewables and waste	سهم انرژی قابل احتراق حاصل از زیست‌توده و زباله در ترکیب کل مصرف انرژی کشور. این شاخص اگرچه تمامی ابعاد اقتصاد چرخشی را پوشش نمی‌دهد، اما به‌عنوان نماینده عینی و قابل‌دسترس بعد انرژی-بازیافتی آن، به‌دلیل وجود داده‌های معتبر و پیوسته در بازه زمانی پژوهش برای ایران انتخاب شده است.	CRW	بانک جهانی
مصرف انرژی تجدیدپذیر	Renewable Energy Consumption	بیانگر میزان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ترکیب کل مصرف انرژی کشور یا منطقه مورد مطالعه.	REC	بانک جهانی
رشد تولید ناخالص داخلی	GDP Growth	رشد تولید ناخالص داخلی، درصد تغییرات ارزش کل کالاها و خدمات نهایی یک کشور در یک سال نسبت به سال قبل است و نشان‌دهنده‌ی انقباض یا انقباض اقتصاد است.	GDP	بانک جهانی
صنعتی شدن	industrilization	سهم بخش صنعت در رشد تولید ناخالص داخلی.	IND	بانک جهانی
شهرنشینی	Urbanization	درصد جمعیت شهری از کل جمعیت.	URB	بانک جهانی
تراکم جمعیت	Population density	تعداد افراد ساکن در هر کیلومتر مربع از سطح زمین، به‌عنوان شاخصی از فشار جمعیتی بر منابع و زیرساخت‌های منطقه‌ای.	POD	بانک جهانی
انتشار کربن	CO ₂ emissions	انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و	CO ₂	بانک جهانی

		تولید سیمان، برحسب میلیون تن متریک در سال. این متغیر به عنوان شاخص فشار زیست محیطی و شدت آلودگی در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است.		
--	--	--	--	--

منبع: یافته‌های پژوهش

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. آزمون مانایی

به منظور بررسی درجه انباشتگی متغیرهای پژوهش و جلوگیری از بروز رگرسیون کاذب، آزمون ریشه واحد دیکی-فولر تعمیم یافته به کار گرفته شد. در اجرای این آزمون، عرض از مبدأ و بدون روند قطعی در نظر گرفته شد و طول وقفه بر اساس معیار شوارتز-بیزین به صورت خودکار تعیین گردید. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که متغیرهای سهم انرژی بازیافتی از زیست توده و زباله در سبد انرژی کشور، مصرف انرژی تجدیدپذیر، صنعتی شدن، تراکم جمعیت و انتشار کربن در سطح نامانا و پس از یک بار تفاضل گیری مانا هستند، در حالی که متغیرهای رشد تولید ناخالص داخلی و شهرنشینی در سطح مانا هستند. بنابراین، هیچ یک از متغیرهای مدل از مرتبه انباشتگی بالاتر از یک، یعنی $I(2)$ ، برخوردار نیستند و از این نظر استفاده از رویکرد خود توضیح با وقفه های گسترده غیرخطی امکان پذیر است. با توجه به احتمال وقوع تغییرات ساختاری در اقتصاد ایران طی دوره مورد بررسی، از جمله تشدید تحریم‌ها، اصلاح قیمت حامل‌های انرژی و همه گیری کووید-۱۹، پایداری ساختاری سری‌های زمانی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های مربوط به شکست ساختاری نشان‌دهنده وجود تغییرات ساختاری در برخی از سری‌ها طی دوره مورد مطالعه است؛ از این رو، نتایج آزمون ریشه واحد در کنار شواهد مربوط به شکست ساختاری مورد توجه قرار گرفت.

جدول (۲): آزمون مانایی دیکی فولر تعمیم یافته

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۱۷

متغیرها	در سطح		نتیجه	با یکبار تفاضل گیری		نتیجه
سهم انرژی بازیافتی از زیست توده و زباله در سبد انرژی کشور	۰/۲۵	-۲/۰۶	نامانا	۰/۰۰	-۵/۳۱	مانا
مصرف انرژی تجدیدپذیر	۰/۱۵	-۲/۳۹	نامانا	۰/۰۰	-۵/۰۶	مانا
رشد تولید ناخالص داخلی	۰/۰۰	-۴/۴۱	مانا	-	-	-
صنعتی شدن	۰/۲۵	-۲/۰۷	نامانا	۰/۰۰	-۵/۵۳	مانا
شهرنشینی	۰/۰۱	-۳/۴۱	مانا	-	-	-
تراکم جمعیت	۰/۹۹	۱/۷۶	نامانا	۰/۰۰	-۳/۸۴	مانا
انتشار کربن	۰/۱۶	-۲/۳۳	نامانا	۰/۰۰	-۳/۸۳	مانا

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج نشان می‌دهد که به‌غیر از متغیر رشد تولید ناخالص داخلی و شهرنشینی که در سطح مانا بوده‌اند بقیه متغیرها با یکبار تفاضل گیری مانا شده‌اند.

۴-۲. آزمون وجود هم‌انباشتگی

در این آزمون آماره F با مقادیر جدول‌بندی شده توسط پسران و همکاران^۱ (۲۰۰۱) مقایسه می‌شود. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که آماره F برابر با ۶/۳۰۰ است. این مقدار در سطوح معناداری ۱۰، ۵ و ۱ درصد، به ترتیب از کرانه بالایی $I(1)$ برابر با ۳/۷۲۸، ۴/۴۴۵ و ۶/۱۵۱ بزرگتر است. بنابراین، فرض صفر مبنی بر نبود رابطه سطحی میان متغیرهای مدل رد شده و وجود رابطه بلندمدت میان متغیرهای مورد بررسی تأیید می‌شود. بر این اساس، استفاده از چارچوب رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی برای بررسی روابط کوتاه‌مدت و بلندمدت میان مصرف انرژی تجدیدپذیر و اقتصاد چرخشی قابل توجیه است.

جدول (۳): وجود رابطه هم‌جمعی پسران و کرانه‌های آزمون هم‌جمعی در NARDL

¹ Pesaran et al.

سطح معنی داری	Bound I(0)	Bound I(1)	آماره F	نتیجه
٪۱۰	۲/۳۸۴	۳/۷۲۸	۶/۳۰۰	وجود همجمعی
٪۵	۲/۸۷۵	۴/۴۴۵	۶/۳۰۰	وجود همجمعی
٪۱	۴/۱۰۴	۶/۱۵۱	۶/۳۰۰	وجود همجمعی

منبع: یافته‌های پژوهش

۳-۴. آزمون عدم تقارن

بعد از اطمینان از صحت اعتبار الگو برای بررسی آزمون عدم تقارن بلندمدت و کوتاه‌مدت از آزمون والد^۱ استفاده می‌شود. در جدول (۴) اگر فرضیه صفر رد شود نشان می‌دهد مدل عدم تقارن دارد.

جدول (۴): آزمون تقارن والد تست

آماره آزمون	آماره	احتمال
F-Statistic	۵/۵۰	۰/۰۲

منبع: یافته‌های پژوهش

با توجه به جدول (۴) فرضیه صفر مبنی بر اثرات متقارن شوک مثبت و منفی متغیر مصرف انرژی تجدیدپذیر بر سهم انرژی بازیافتی از زیست‌توده و زباله در سبد انرژی کشور در بلندمدت و کوتاه‌مدت، رد می‌شود؛ یعنی اثر شوک مثبت و منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر بر سهم انرژی بازیافتی از زیست‌توده و زباله در سبد انرژی کشور اثرات نامتقارن دارد. بنابراین وجود اثرات نامتقارن تأیید می‌شود.

۴-۴. برآورد بلندمدت و کوتاه‌مدت روش خودرگرسیون توزیعی (NARDL)

جدول (۵): برآورد بلندمدت مدل به‌صورت رگرسیون با وقفه‌های توزیعی غیرخطی NARDL

¹ wald

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۱۹

بلندمدت				
متغیرها	ضریب	احتمال	آماره t	انحراف معیار
CRW(-1)	-۰/۷۹	۰/۰۰	-۴/۷۹	۰/۱۶
CO2(-1)	-۰/۱۱	۰/۰۳	-۲/۴۶	۰/۰۴
GDP(-1)	-۰/۰۰۲	۰/۴۷	-۰/۷۴	۰/۰۰
IND(-1)	۰/۰۰۴	۰/۰۷	۱/۹۹	۰/۰۰
POD(-1)	۰/۰۴	۰/۰۷	۱/۹۸	۰/۰۲
URB(-1)	-۰/۰۷	۰/۰۲	-۲/۵۴	۰/۰۲
REC+	۰/۳۴	۰/۰۰	۷/۴۷	۰/۰۴
REC-	-۰/۲۱	۰/۰۰	-۳/۷۶	۰/۰۵
کوتاهمدت				
DCRW(-1)	-۰/۲۸	۰/۰۰	-۶/۴۶	۰/۰۴
DCO2	۰/۰۶	۰/۰۲	۲/۳۸	۰/۰۲
DGDP	-۰/۰۰۸	۰/۵۸	-۰/۵۴	۰/۰۰۱
DIND	-۰/۰۰۲	۰/۲۳	-۱/۲۱	۰/۰۰۱
DPOD	۰/۰۱	۰/۰۳	۲/۳۲	۰/۰۰۵
DURB(-1)	-۰/۰۱	۰/۰۰	-۳/۵۶	۰/۰۰۴
DREC(-1)	۰/۰۴۱	۰/۰۵	۲/۰۳	۰/۰۲
DURB	۰/۳۸	۰/۰۲	۲/۴۸	۰/۱۵
DREC+	۰/۳۴	۰/۰۰	۶/۸۳	۰/۰۵
DREC-	-۰/۰۲	۰/۳۴	-۰/۹۷	۰/۰۲

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج بلندمدت مدل NARDL نشان می‌دهد که متغیرهای مورد بررسی اثرات معنادار و بعضاً نامتقارن بر شاخص اقتصاد چرخشی داشته‌اند. در رأس این روابط: متغیر وابسته $CRW(-1)$ با ضریب (-0.79) و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان‌دهنده وجود یک فرآیند اصلاحی درون‌زا در ساختار اقتصاد چرخشی است؛ به‌طوری‌که انحراف از تعادل در دوره‌های گذشته در بلندمدت با تمایل به بازگشت به مسیر پایدار همراه بوده است.

انتشار کربن (CO_2) با ضریب (-0.11) و سطح معنی‌داری پنج درصد، اثر منفی بر اقتصاد چرخشی دارد. این رابطه بیانگر آن است که افزایش آلودگی زیست‌محیطی در بلندمدت موجب کاهش بهره‌وری منابع، اختلال در فرآیندهای بازیافت و تضعیف پایداری اکوسیستم‌ها می‌شود. بنابراین، کنترل انتشار کربن شرط لازم برای تقویت اقتصاد چرخشی در افق بلندمدت است.

رشد تولید ناخالص داخلی (GDP) با ضریب (-0.002) و غیرمعنادار، نشان می‌دهد که رشد اقتصادی به‌تنهایی نمی‌تواند تضمین‌کننده بهبود عملکرد چرخشی باشد. این یافته تأکید می‌کند که کیفیت رشد اقتصادی، به‌ویژه از منظر زیست‌محیطی و ساختاری، اهمیت بیشتری نسبت به کمیت آن دارد.

صنعتی‌شدن (IND) با ضریب (0.004) و احتمال در آستانه معنی‌داری (0.07) ، نشان‌دهنده آن است که توسعه صنعتی در بلندمدت می‌تواند اثر مثبت بر اقتصاد چرخشی داشته باشد، مشروط بر آنکه با فناوری‌های پاک، تولید سبز و سیاست‌های زیست‌محیطی همراه باشد. این رابطه بیانگر گذار از صنایع سنتی به صنایع نوآور و کم‌کربن است.

تراکم جمعیت (POD) با ضریب (0.04) و احتمال نزدیک به سطح معنی‌داری (0.07) ، نشان می‌دهد که در صورت برخورداری از زیرساخت‌های مناسب، افزایش تراکم جمعیت می‌تواند به بهبود بهره‌وری در مصرف منابع و ارتقای نظام‌های جمع‌آوری و بازیافت منجر شود. با این حال، تحقق و تداوم این اثر مستلزم مدیریت کارآمد شهری و برنامه‌ریزی مناسب فضایی است.

شهرنشینی (URB) با ضریب (-0.07) و سطح معنی‌داری پنج درصد، اثر منفی بر اقتصاد چرخشی دارد. این یافته نشان می‌دهد که رشد بی‌رویه و غیرپایدار شهرها، بدون توسعه

زیرساخت‌های سبز و مدیریت پسماند، موجب افزایش ضایعات، فشار بر منابع و کاهش کارایی سیستم‌های بازیافت می‌شود.

تغییرات مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر (REC^+) با ضریب (۰/۳۴) و سطح معنی‌داری پنج درصد نقش کلیدی در تقویت اقتصاد چرخشی ایفا می‌کند. این اثر از طریق کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، ارتقاء بهره‌وری منابع و تحریک سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک تثبیت شده است. در مقابل، تغییرات منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر (REC^-) با ضریب (-۰/۲۱) و سطح معنی‌داری پنج درصد موجب تضعیف عملکرد اقتصاد چرخشی شده است؛ زیرا کاهش دسترسی به انرژی‌های پاک در بلندمدت مانع توسعه پایدار و افزایش آسیب‌پذیری زیست‌محیطی می‌شود.

نتایج کوتاه‌مدت مدل NARDL نشان می‌دهد که واکنش اقتصاد چرخشی به شوک‌های ساختاری و زیست‌محیطی سریع، معنادار و در برخی موارد نامتقارن بوده است: متغیر وابسته $DCRW(-1)$ با ضریب (-۰/۲۸) و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان می‌دهد که اقتصاد چرخشی در کوتاه‌مدت دارای رفتار اصلاحی است و انحراف از تعادل در دوره قبل به سرعت تعدیل می‌شود.

انتشار کربن (DCO_2) با ضریب (۰/۰۶) و سطح معنی‌داری پنج درصد در کوتاه‌مدت اثر افزایشی بر شاخص اقتصاد چرخشی دارد. این یافته در نگاه اول متناقض به نظر می‌رسد، اما می‌توان آن را به افزایش فعالیت‌های صنعتی و تولیدی در دوره‌های پراشتار نسبت داد که به‌طور همزمان موجب رشد برخی شاخص‌های چرخشی مانند بازیافت یا مصرف منابع شده‌اند، هرچند این اثر در بلندمدت منفی بود.

رشد تولید ناخالص داخلی (DGDP) با ضریب (-۰/۰۰۸) اثر غیرمعنی‌داری بر اقتصاد چرخشی در کوتاه‌مدت دارد. این نشان می‌دهد که نوسانات GDP در افق کوتاه‌مدت تأثیر مستقیمی بر ساختار چرخشی اقتصاد ندارد، مگر آن‌که با سیاست‌های هدفمند همراه باشد.

صنعتی‌شدن (DIND) با ضریب (-۰/۰۰۲) و غیرمعنی‌دار، نشان می‌دهد که تغییرات صنعتی در کوتاه‌مدت نمی‌تواند به‌تنهایی موجب تقویت یا تضعیف اقتصاد چرخشی شود. این اثر نیازمند زمان و زیرساخت‌های حمایتی است تا در بلندمدت ظاهر شود.

تراکم جمعیت (DPOD) با ضریب (۰/۰۱) و سطح معنی‌داری پنج درصد در کوتاه‌مدت اثر مثبتی بر اقتصاد چرخشی دارد. این رابطه می‌تواند ناشی از افزایش بهره‌وری

در مصرف منابع و تمرکز فعالیت‌های بازیافتی در مناطق پرتراکم باشد، به‌ویژه اگر زیرساخت‌های شهری پاسخ‌گو باشند.

شهرنشینی در دو قالب بررسی شده: $DURB(-1)$ با ضریب $(-0/01)$ و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان‌دهنده اثر منفی شهرنشینی دوره قبل بر عملکرد چرخشی است که احتمالاً ناشی از فشار بر منابع و ناکارآمدی سیستم‌های مدیریت پسماند بوده است. در مقابل، $DURB$ با ضریب $(0/38)$ و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان می‌دهد که در همان دوره، شهرنشینی فعلی به‌دلیل بهبود زیرساخت‌ها یا اجرای سیاست‌های شهری سبز توانسته اثر مثبتی بر اقتصاد چرخشی داشته باشد.

مصرف انرژی تجدیدپذیر نیز در سه حالت بررسی شده: $DREC(-1)$ با ضریب $(0/41)$ و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان می‌دهد که مصرف انرژی پاک در دوره قبل اثر مثبت و پایدار بر عملکرد چرخشی داشته است. $DREC^+$ با ضریب $(0/34)$ و سطح معنی‌داری پنج درصد، نشان‌دهنده آن است که شوک‌های مثبت انرژی تجدیدپذیر در کوتاه‌مدت به‌سرعت موجب بهبود شاخص‌های چرخشی شده‌اند، از جمله افزایش نرخ بازیافت و کاهش ضایعات. در مقابل، $DREC^-$ با ضریب $(-0/02)$ اثر منفی و غیرمعنی‌داری دارد. این امر نشان می‌دهد که کاهش مصرف انرژی‌های پاک در کوتاه‌مدت هنوز به‌طور کامل اثر تخریبی خود را نشان نداده، اما در بلندمدت این اثر تشدید می‌شود.

۴-۵. برآورد ضریب ECM

جدول (۶): نتایج برآورد ضریب (ECM)

متغیرها	ضریب	آماره t	احتمال
$ECM(-1)$	$-1/82$	$-10/99$	$0/00$
R^2		$0/96$	

منبع: یافته‌های پژوهش

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، ضریب تصحیح خطا برابر با $-1/82$ است. از آنجا که این ضریب در بازه $(-1$ تا $0)$ قرار ندارد، فرآیند تعدیل به‌سمت تعادل به‌صورت همگرایی نوسانی (با نوسانات میرا) خواهد بود. به‌این معنا که در هر دوره، انحراف از تعادل

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۲۳

بلندمدت با شدت بیش از یک برابر اصلاح می‌شود و این اصلاح همراه با نوسانات کاهش‌یابنده (میرا) تا رسیدن به تعادل پایدار ادامه می‌یابد. چنین رفتاری در مدل‌هایی که دارای نوسانات ادواری در داده‌ها هستند، قابل‌انتظار است و نشان‌دهنده واکنش سریع و پویای اقتصاد چرخشی به انحرافات گذشته است. علاوه‌براین، ضریب تعیین بالای مدل ($R^2 = ۰/۹۶$) نشان‌دهنده برازش بسیار خوب مدل و تبیین حدود ۹۶ درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای توضیحی است.

۴-۶. آزمون رابطه بلندمدت FMOLS

برای برآورد روابط بلندمدت میان متغیرهای هم‌انباشت، از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده (FMOLS) استفاده شده است.

جدول (۷): نتایج تخمین روش FMOLS

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره t	احتمال
مصرف انرژی تجدیدپذیر	۰/۱۳	۰/۰۳	۳/۸۰	۰/۰۰
انتشار کربن	۰/۱۳	۰/۰۲	۵/۴۷	۰/۰۰
رشد تولید ناخالص داخلی	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	-۱/۷۵	۰/۰۹
صنعتی‌شدن	-۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۲	-۰/۲۸	۰/۷۸
تراکم جمعیت	۰/۰۲۷	۰/۰۱۲	۲/۱۳۳	۰/۰۴
شهرنشینی	-۰/۰۰۵	۰/۰۱	-۴/۱۹	۰/۰۰
R- Squared		۰/۷۶		
Adjusted R- Squared		۰/۷۰		
S.E Of Regression		۰/۰۴		
Long Run Variance		۰/۰۰۱		
Mean dependent Var		۰/۲۲		
S.D dependent Var		۰/۰۸		
Sum Squared Resid		۰/۰۴		

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از برآورد مدل با استفاده از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده نشان می دهد که متغیرهای مصرف انرژی تجدیدپذیر، انتشار کربن، تراکم جمعیت و شهرنشینی اثرات معنادار بر متغیر وابسته دارند؛ اما متغیر رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی شدن اثر معنی داری بر متغیر وابسته ندارند.

مقایسه نتایج دو مدل رهیافت خود توضیح با وقفه های گسترده غیرخطی و روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده نشان دهنده همراستایی کامل در جهت گیری و معنی داری متغیرهای کلیدی است. در هر دو روش، مصرف انرژی تجدیدپذیر، انتشار کربن، تراکم جمعیت و شهرنشینی به عنوان متغیرهای معنی دار شناسایی شده اند و رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی شدن نیز در هر دو مدل فاقد اثر معنادار بوده اند. این همراستایی که با دو رویکرد اقتصادسنجی متفاوت به دست آمده است، نشان دهنده استحکام و پایایی نتایج پژوهش می باشد. به عنوان نمونه، جمع ضرایب تغییرات مثبت و منفی در مدل خودرگرسیون با وقفه های توزیعی غیرخطی (۰/۳۴ و -۰/۲۱-) برابر ۰/۱۳ است که با ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیر در مدل حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده که برابر با (۰/۱۳) است تطابق کامل دارد. این هم راستایی، اعتماد به یافته های پژوهش را افزایش می دهد.

۴-۷. آزمون های تشخیصی

جدول (۸): نتایج آزمون های تشخیصی

آزمون	آماره آزمون	احتمال	نتیجه در سطح معنی داری ۵ درصد
واریانس ناهمسانی	۱/۵۰	۰/۳۴	همسان بودن واریانس
خودهمبستگی سریالی	۳/۵۴	۰/۱۶	عدم خودهمبستگی
نرمالیتی	۰/۰۵	۰/۹۷	نرمال بودن جملات خطا
رمزی	۲/۴۳	۰/۰۷	مناسب بودن تصریح مدل

منبع: یافته های پژوهش

باتوجه به نتایج به دست آمده مشخص می گردد که فروض کلاسیک در مدل برآوردی برقرار بوده و نتایج به دست آمده از برآورد مدل قابل اعتماد و تفسیر است.

۵. نتیجه گیری و ارائه پیشنهادهای سیاستی

در افق بلندمدت، نتایج مدل رهیافت خود توضیح با وقفه های گسترده غیرخطی نشان می دهد که انتشار کربن، شهرنشینی و تغییرات منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر، اثر منفی و معناداری بر عملکرد اقتصاد چرخشی دارند. این یافته ها نشان می دهند که تداوم الگوهای ناپایدار توسعه شهری و انرژی در ایران، علاوه بر محدود کردن اهداف زیست محیطی، ظرفیت های اقتصاد چرخشی را نیز تضعیف می کند. رشد شهرنشینی بدون توسعه زیرساخت های مدیریت پسماند، حمل و نقل پاک و بازیافت، با افزایش ضایعات و کاهش بهره وری منابع همراه است. همچنین، انتشار کربن ناشی از وابستگی به سوخت های فسیلی، از طریق تشدید آلودگی و هزینه های اجتماعی و اکولوژیکی، کارایی بازیافت، تولید پاک و بهره برداری پایدار از منابع را کاهش می دهد؛ اثری که با سهم اندک انرژی های تجدیدپذیر در سبد انرژی ایران تشدید می شود.

تغییرات منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر در بلندمدت اثر منفی و معناداری بر اقتصاد چرخشی دارند؛ به گونه ای که کاهش دسترسی یا سرمایه گذاری در انرژی های پاک، گذار به اقتصاد سبز را مختل می کند. در ایران، نوسانات سیاستی، نبود مشوق های پایدار و ضعف زیرساخت های تولید انرژی تجدیدپذیر می توانند این اثرات منفی را تشدید کنند. در مقابل، تغییرات مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر اثر مثبت و قوی بر اقتصاد چرخشی دارند؛ زیرا با کاهش آلودگی و وابستگی به سوخت های فسیلی، زمینه توسعه صنایع بازیافتی، اشتغال سبز و نوآوری در فناوری های پاک را فراهم می کنند. از این رو، توسعه هدفمند انرژی های خورشیدی، بادی و زیست توده در ایران می تواند محرکی برای تقویت اقتصاد چرخشی، به ویژه در مناطق صنعتی و محروم، باشد.

متغیرهای صنعتی شدن و تراکم جمعیت در بلندمدت اثر مثبت و نزدیک به سطح معناداری بر اقتصاد چرخشی داشته اند. این نتایج نشان می دهد که توسعه صنعتی، در صورت برخورداری از زیرساخت های مناسب، از طریق بهینه سازی تولید، کاهش ضایعات و ارتقای فناوری های سبز می تواند اقتصاد چرخشی را تقویت کند. همچنین تراکم جمعیت، در صورت همراهی با مدیریت شهری هوشمند و زیرساخت های بازیافت، می تواند بهره وری مصرف منابع را افزایش و هزینه های جمع آوری و پردازش پسماند را کاهش دهد. در مقابل، رشد تولید ناخالص داخلی در هیچ یک از افق های زمانی اثر معناداری بر اقتصاد چرخشی نداشته است؛ موضوعی که بیانگر غلبه الگوی رشد کمی و سنتی در ایران است. بنابراین،

هم‌راستاسازی سیاست‌های توسعه اقتصادی با اقتصاد سبز، بهره‌وری منابع و کاهش شدت انرژی برای تقویت نقش رشد اقتصادی در اقتصاد چرخشی ضروری است.

در افق کوتاه‌مدت، اقتصاد چرخشی واکنش سریع و معناداری به شوک‌های ساختاری نشان داده است. تغییرات مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر بلافاصله عملکرد اقتصاد چرخشی را بهبود داده‌اند، درحالی‌که اثرات منفی تغییرات کاهش‌ی هنوز به‌طور کامل ظاهر نشده است که می‌تواند ناشی از تأخیر نهادی یا انعطاف‌پذیری موقت سیستم باشد. شهرنشینی نیز اثر دوگانه‌ای داشته است؛ به‌گونه‌ای که شهرنشینی دوره قبل اثر منفی و شهرنشینی جاری اثر مثبت داشته که به‌ترتیب می‌تواند ناشی از فشار بر منابع و ناکارآمدی زیرساخت‌ها، و بهبود زیرساخت‌های شهری، اجرای سیاست‌های سبز و افزایش آگاهی عمومی باشد. انتشار کربن نیز در کوتاه‌مدت اثر مثبت داشته است که می‌توان آن را به هم‌زمانی افزایش تولید صنعتی، انتشار کربن و فعالیت‌های چرخشی مانند بازیافت نسبت داد؛ هرچند این اثر در بلندمدت معکوس شده و تداوم آلودگی موجب کاهش پایداری و فرسایش منابع می‌شود.

مصرف انرژی تجدیدپذیر دارای ضریب مثبت و معنادار است و با تأیید نتایج مدل رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی، نشان می‌دهد که افزایش پایدار مصرف انرژی‌های پاک در بلندمدت عملکرد اقتصاد چرخشی را تقویت می‌کند. این رابطه با اصول اقتصاد سبز هم‌راستا بوده و در ایران، با توجه به ظرفیت‌های خورشیدی، بادی و زیست‌توده، می‌تواند از طریق کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، افزایش بهره‌وری منابع و تحریک سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافتی مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گیرد. انتشار کربن نیز اثر مثبت و معناداری داشته است که می‌تواند بیانگر آن باشد که تشدید فشارهای زیست‌محیطی، سیاست‌گذاران و بنگاه‌ها را به بهبود مدیریت پسماند، بازیافت و استفاده مجدد از منابع سوق می‌دهد. همچنین، تراکم جمعیت و شهرنشینی اثر مثبت و معناداری بر اقتصاد چرخشی داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که در صورت وجود زیرساخت‌های مناسب، تمرکز جمعیتی و توسعه برنامه‌ریزی‌شده شهری می‌تواند بهره‌وری منابع، کارایی بازیافت و مدیریت پسماند را بهبود بخشد. در این راستا، توسعه شهرهای هوشمند و سبز و تقویت زیرساخت‌های زیست‌محیطی در کلان‌شهرهای ایران ضروری است. در مقابل، عدم‌معناداری رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی‌شدن نشان می‌دهد که رشد اقتصادی و توسعه صنعتی در ایران هنوز عمدتاً کمی و سنتی بوده و پیوند کافی با پایداری و اقتصاد چرخشی ندارند؛ بنابراین،

اصلاحات ساختاری، توسعه فناوری‌های پاک و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی برای تقویت این پیوند ضروری است.

برای اعتبارسنجی نتایج مدل رهیافت خود توضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی و بررسی پایداری روابط بلندمدت بین متغیرها، از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده استفاده شد. نتایج حاصل از برآورد مدل نشان داد که چهار متغیر اصلی شامل مصرف انرژی تجدیدپذیر، انتشار کربن، تراکم جمعیت و شهرنشینی اثرات معنادار و قابل توجهی بر شاخص اقتصاد چرخشی دارند، در حالی که رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی شدن فاقد اثر آماری معنادار بوده‌اند.

شایان ذکر است که نتایج این پژوهش عمدتاً بر اساس شاخص انرژی بازیافتی از زیست‌توده و زباله تفسیر شده‌اند و این شاخص به‌عنوان نماینده بعد انرژی - بازیافتی اقتصاد چرخشی، نمی‌تواند به‌تنهایی گویای تمامی ابعاد گسترده این مفهوم باشد. از این رو، تعمیم نتایج به سایر ابعاد اقتصاد چرخشی مانند مدیریت پسماند جامد، طراحی محصول و بهره‌وری مواد، نیازمند پژوهش‌های تکمیلی با استفاده از شاخص‌های ترکیبی و چندبعدی است.

۵-۱. توصیه‌های سیاستی

بر اساس یافته‌های پژوهش، توصیه‌های سیاستی زیر در چهار حوزه اصلی تدوین شده است.

- **حوزه انرژی و سرمایه‌گذاری سبز:** با توجه به اثر مثبت و معنادار شوک‌های مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر بر اقتصاد چرخشی، تداوم سیاست‌های حمایتی بلندمدت ضروری است. در این راستا، طراحی قراردادهای خرید تضمینی بلندمدت برق برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری، ایجاد صندوق ملی توسعه انرژی‌های پاک برای تأمین مالی پروژه‌های خورشیدی، بادی و زیست‌توده، ارائه معافیت‌های مالیاتی به بنگاه‌های جایگزین‌کننده سوخت‌های فسیلی و تسهیل ورود سرمایه‌گذاران خارجی از طریق قراردادهای بیع متقابل یا مشارکت در تولید با تمرکز بر فناوری‌های نوین انرژی پیشنهاد می‌شود.

- **حوزه مدیریت شهری و زیرساخت‌های سبز:** با توجه به اثر منفی و معنادار شهرنشینی بر اقتصاد چرخشی در بلندمدت، اصلاح الگوی توسعه شهری و حرکت به‌سوی شهرهای هوشمند و سبز ضروری است. در این راستا، تدوین برنامه‌های جامع مدیریت پسماند با تأکید بر تفکیک از مبدأ و بازیافت، توسعه حمل‌ونقل عمومی پاک و برقی، احداث

نیروگاه‌های تولید برق از پسماند و اجرای برنامه‌های آموزشی و فرهنگ‌سازی برای افزایش مشارکت شهروندان و کاهش تولید پسماند پیشنهاد می‌شود.

- حوزه کنترل انتشار کربن و صنعت پاک: با توجه به اثر منفی انتشار کربن بر اقتصاد چرخشی، اتخاذ سیاست‌های فرابخشی برای کاهش آلودگی ضروری است. در این راستا، وضع مالیات کربن و اختصاص درآمد آن به پروژه‌های بازیافت و بهینه‌سازی انرژی، تدوین استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی برای صنایع و نیروگاه‌ها، حمایت از صنایع دانش‌بنیان در حوزه فناوری‌های پاک و بازنگری در سبد سوخت نیروگاه‌ها با افزایش سهم گاز طبیعی و کاهش مصرف مازوت و گازوئیل، به‌عنوان گامی در مسیر گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر، پیشنهاد می‌شود.

- حوزه رشد اقتصادی و صنعتی شدن پایدار: با توجه به عدم‌معناداری رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی شدن در مدل‌های برآوردی، توجه سیاست‌گذاران به کیفیت رشد اقتصادی به‌جای کمیت آن ضروری است. در این راستا، بازتعریف شاخص‌های توسعه صنعتی بر مبنای بهره‌وری و کاهش شدت انرژی، تدوین نقشه‌راه ملی گذار به اقتصاد چرخشی با مشارکت وزارتخانه‌های مرتبط، ارائه تسهیلات ارزان‌قیمت برای نصب سامانه‌های خورشیدی و بازیافت حرارت و ایجاد شهرک‌های صنعتی سبز با زیرساخت‌های متمرکز بازیافت آب، انرژی و پسماند پیشنهاد می‌شود.

۶. تعارض منافع

تعارض منافی نداریم.

۷. سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از داوران محترم نشریه به سبب ارائه نظرات سازنده و ارزشمندی که به ارتقاء کیفی این پژوهش انجامید، ابراز می‌دارند.

۸. منابع

استادزاد، علی حسین. (۱۴۰۴). نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقق امنیت انرژی پایدار برای اقتصاد ایران: یک رویکرد پویایی سیستمی، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، ۲۱(۸۵)، ۱۷۱-۲۰۸.

<http://iiesj.ir/article-1-1646-fa.html>

پرهیزکار کهنه اوغاز، مرتضی، نیکوقدم، مسعود، و خوشنودی، عبدالله. (۱۴۰۰). بررسی اثر مصرف انرژی تجدیدپذیر بر توسعه پایدار در کشورهای عضو اوپک، *نشریه اقتصاد و تجارت نوین*، ۱۶(۱)، ۶۰-۲۹. <https://doi.org/10.30465/jnet.2021.7105>

طباطبائی، سیدجلال. (۱۴۰۳). اثر انرژی تجدیدپذیر و توسعه مالی بر انتشار کربن بر اساس مصرف در ایران، *نشریه راهبرد توسعه*، ۲۰(۱)، ۱۱۶-۱۵۰. <http://rahbord-mag.ir/Article/47367>

قادری، سیمین، و پرورش، حمزه. (۱۴۰۲). حکمرانی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، شهرنشینی و رشد اقتصادی بر انتشار دی‌اکسید کربن در ایران، *نشریه حکمرانی و توسعه*، ۳(۳)، ۹۴-۷۹. <https://doi.org/10.22111/jipaa.2024.392792.1114>

References

- Adebayo, T. S., Oladipupo, S. D., Rjoub, H., Kirikkaleli, D., & Adeshola, I. (2023). Asymmetric effect of structural change and renewable energy consumption on carbon emissions: designing an SDG framework for Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 25(1), 528-556. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02065-w>
- Aghlimoghadam, L. (2025). New-institutional explanations for energy transition in Iran: investigating the interplays between institutions, actors, and technology. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 1-27. <https://doi.org/10.1080/13511610.2025.2467835>
- Alqahtani, M. F., & Afy-Shararah, M. (2025). Integrating Circular Economy Practices into Renewable Energy in the Manufacturing Sector: A Systematic Review of the Literature. *Sustainability*, 17(16), 7301. <https://doi.org/10.3390/su17167301>
- Al-Saidi, M., & Dehnavi, S. (2024). Growing the portfolio: circular economy through water reuse in Iran. *Frontiers in Water*, 6, 1341715. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1341715>
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I., & Filis, G. (2017). Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 808-824.
- Arize, A. C., Malindretos, J., & Igwe, E. U. (2017). Do exchange rate changes improve the trade balance: An asymmetric nonlinear cointegration approach. *International Review of Economics & Finance*, 49, 313-326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iref.2017.02.007>
- Aryanpur, V., Fattahi, M., Mamipour, S., Ghahremani, M., Gallachóir, B. Ó., Bazilian, M. D., & Glynn, J. (2022). How energy subsidy reform can drive the Iranian power sector towards a low-carbon future. *Energy Policy*, 169, 113190. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113190>
- Barahona, I., & Almulhim, T. (2024). Renewable energies and circular economies: A systematic literature review before the ChatGPT boom.

- Energy Reports*, 11, 2656-2669.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.02.027>
- Bergougui, B. (2025). Circular Pathways to Sustainability: Asymmetric Impacts of the Circular Economy on the EU's Capacity Load Factor. *Land*, 14(6), 1216.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied energy*, 162, 733-741.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Bloch, H., Rafiq, S., & Salim, R. (2015). Economic growth with coal, oil and renewable energy consumption in China: Prospects for fuel substitution. *Economic Modelling*, 44, 104-115.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.econmod.2014.09.017>
- Briguglio, L. (2014). A vulnerability and resilience framework for small states.
- Foundation, E. M. (2015). Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghaderi, S., & Parvaresh, H. (2023). Governance of renewable and non-renewable energy development, urbanization, and economic growth on carbon dioxide emissions in Iran. *Journal of Governance and Development*, 3(3), 79-94. [In Persian]
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production*, 114, 11-32.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Hassan, S. T., Wang, P., Khan, I., & Zhu, B. (2023). The impact of economic complexity, technology advancements, and nuclear energy consumption on the ecological footprint of the USA: Towards circular economy initiatives. *Gondwana Research*, 113, 237-246.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.11.001>
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of economic dynamics and control*, 12(2-3), 231-254.
[https://doi.org/10.1016/0165-1889\(88\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0165-1889(88)90041-3)
- Khan, A. M., & Osińska, M. (2022). Energy consumption under circular economy conditions in the EU countries. *Energies*, 15(21), 7839.
<https://doi.org/10.3390/en15217839>
- Kirchherr, J., Jones, M. P., Geissdoerfer, M., & Coffay, M. (2025). A defense of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*.
<https://doi.org/10.1111/jiec.70128>
- Kristia, K., & Rabbi, M. F. (2023). Exploring the synergy of renewable energy in the circular economy framework: a bibliometric study. *Sustainability*, 15(17), 13165.
- Laureti, L., Massaro, A., Costantiello, A., & Leogrande, A. (2023). The impact of renewable electricity output on sustainability in the context

- of circular economy: a global perspective. *Sustainability*, 15(3), 2160. <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/115627/>
- Massarrat, M. (2004). Iran's energy policy: Current dilemmas and perspective for a sustainable energy policy. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 1(3), 233-245.
- Ostadzad, Ali Hossein. (2025). The Role of Renewable Energies in Achieving Sustainable Energy Security for Iran's Economy: A System Dynamics Approach. *Quarterly Journal of Energy Economics Studies*, 21(85), 171–208. [In Persian]
- Parhizkār-e Kohneh Oghāz, M., Nikouqadam, M., & Khoshnoudi, A. (2021). Investigating the effect of renewable energy consumption on sustainable development in OPEC member countries. *Journal of Modern Economics and Trade*, 16(1), 29–60. [In Persian]
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of applied econometrics*, 16(3), 289-326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Phillips, P. C., & Hansen, B. E. (1990). Statistical inference in instrumental variables regression with I (1) processes. *The review of economic studies*, 57(1), 99-125. <https://doi.org/10.2307/2297545>
- Popa, A. F., Burcă, V., Sahlian, D. N., & Trașcă, D. L. (2022). The interaction between renewable energy consumption and the institutional framework from the circular economy-based perspective. *Amfiteatru Economic*, 24(61), 648-663.
- Shin, Y., Yu, B., & Greenwood-Nimmo, M. (2014). Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework. In *Festschrift in honor of Peter Schmidt: Econometric methods and applications* (pp. 281-314). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8008-3_9
- Tabatabaei, Seyed Jalal. (2024). The Effect of Renewable Energy and Financial Development on Carbon Emissions Based on Consumption in Iran. *Development Strategy Journal*, 20(1), 116–150. [In Persian]
- Taghizadeh-Hesary, F., & Rasoulinezhad, E. (2025). Impact of renewable energy expansion on government debt in developing countries. *Energy Strategy Reviews*, 58, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101684>
- Wang, Y., He, Y., & Gao, X. (2025). Synergizing Renewable Energy and Circular Economy Strategies: Pioneering Pathways to Environmental Sustainability. *Sustainability*, 17(5), 1801. <https://doi.org/10.3390/su17051801>
- Yang, Z., & Qiu, Y. (2025). Rethinking energy and policy: Driving the circular economy through renewables versus nuclear energy in OECD countries. *Geoscience Frontiers*, 16(3), 102037. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2025.102037>

<https://www.unep.org>

<https://worldbank.org>

استناد به این مقاله: نام خانوادگی نویسنده اول، نام. (سال). عنوان مقاله. عنوان نشریه (ایتالیک)، سال (شماره)، ص
آغاز-ص پایان.



Name of Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.