



بررسی عوامل علی تعیین کننده شاخص های کیفیت محیط زیست در ایران با استفاده از رویکرد نوین علیت گرنجری فوریه بوت استراپ در کوانتایل (BFGC-Q)

صاحبه محمدیان منصور^{۱*}، ابوالقاسم گل خندان^۲

^{۱*} - گروه اقتصاد، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲ - گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: بر اساس آمار منتشر شده توسط شبکه رد پای جهانی، کسری اکولوژیکی ایران که در سال ۱۹۶۱، ۵۵/۰- سرانه هکتار جهانی بوده، با ۵۵۴ درصد افزایش به ۲/۵۰ سرانه هکتار جهانی در سال ۲۰۲۲ رسیده است که نشان می دهد عرضه موجود منابع طبیعی در ایران برای حفظ الگوهای تولید و مصرف فعلی کافی نیست. بر این اساس، تجزیه و تحلیل عوامل تعیین کننده شاخص های کیفیت محیط زیست در ایران می تواند پیشنهادات ارزشمندی را در زمینه طراحی سیاست های زیست محیطی مناسب ارائه دهد. در این راستا، هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی تعیین کنندگان علی شاخص های زیست محیطی در ایران می باشد.
تاریخچه مقاله:	دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲
کلمات کلیدی:	مواد و روش ها: مطالعه توصیفی-تحلیلی و کاربردی حاضر با استفاده از داده های سری زمانی سال های ۲۰۲۲-۱۹۷۰ به بررسی تعیین کنندگان علی شاخص های زیست محیطی در ایران با استفاده از دو شاخص سنتی انتشار CO ₂ و رد پای اکولوژیکی (EF) و همچنین، شاخص جدید ضریب ظرفیت بار (LCF) که به طور همزمان عرضه و تقاضای طبیعت را در نظر می گیرد، پرداخته است. بر این اساس، تأثیر علی رشد اقتصادی، وابستگی به منابع طبیعی، شهرنشینی و مصرف انرژی تجدیدپذیر بر شاخص های کیفیت محیط زیست با به کارگیری رویکرد نوین علیت گرنجری فوریه بوت استراپ در کوانتایل (BFGC-Q) بررسی شده است. این رویکرد، بر خلاف آزمون های علیت گرنجری گذشته، مسأله غیرخطی بودن و شکست های ساختاری را در نظر می گیرد و می تواند اطلاعات مفیدی در مورد یک رابطه علی دنباله دار ارائه دهد.
شاخص های کیفیت زیست محیطی، ضریب ظرفیت بار (LCF)، علیت گرنجری، بسط فوریه، رگرسیون کوانتایل	نتایج: نتایج تجربی این پژوهش نشان می دهد که شهرنشینی در تمام کوانتایل های مورد بررسی (۱۰ th -۹۰ th) به افزایش انتشار CO ₂ و EF و کاهش LCF می انجامد. تولید ناخالص داخلی سرانه در کوانتایل های پایین و متوسط (۱۰ th -۵۰ th) یک رابطه علی منفی با LCF و در کوانتایل ابتدایی ۱۰ th و کوانتایل بالایی ۷۰ th یک رابطه علی مثبت با EF نشان می دهد. علاوه بر این، تولید ناخالص داخلی سرانه در تمام کوانتایل ها (۱۰ th -۹۰ th) منجر به افزایش انتشار CO ₂ شده است. در مورد متغیر رانت منابع طبیعی، به طور کلی نتایج تجربی این پژوهش از فرضیه خنثی و عدم وجود رابطه علی حمایت می کند. مصرف انرژی تجدیدپذیر نیز در تمام کوانتایل ها (۱۰ th -۹۰ th) به افزایش LCF و در کوانتایل های ۱۰ th -۷۰ th به کاهش EF می انجامد. این درحالیست که این متغیر در هیچ یک از کوانتایل ها رابطه علی معناداری با انتشار CO ₂ نداشته است.
	بحث: نتایج نشان می دهد که بسته به شاخص زیست محیطی مورد بررسی، اثرات رشد اقتصادی، وابستگی به منابع طبیعی، شهرنشینی و مصرف انرژی تجدیدپذیر بر کیفیت محیطی تا حدودی متفاوت است. بر اساس نتایج، شهرنشینی منجر به تخریب محیط زیست کشور شده است. بنابراین، سیاست گذاران و برنامه ریزان شهری

لازم است در فرایند گسترش شهرنشینی جلوگیری از تخریب محیط زیست را مورد توجه و مصرف صحیح انرژی را در اولویت قرار دهند. تأثیر علی مثبت تولید ناخالص داخلی سرانه در تمام کوانتایلها بر انتشار CO₂ نشان می‌دهد مسیرهای رشد و توسعه در ایران با کربن فشرده‌تر دنبال می‌شود. بنابراین، باید تلاش شود تا رشد اقتصادی بالاتر که مستلزم استفاده از انرژی بیشتر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید است، با ایجاد و تقویت انرژی‌های پاک و همچنین به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته و سازگار با محیط زیست در فرایند تولید صورت بگیرد. با توجه به تأثیر مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر بر شاخص LCF و تأثیر منفی آن بر EF، می‌توان گفت که افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش ردپای اکولوژیکی و پیشی گرفتن ظرفیت زیستی از آن شده است؛ بر این اساس افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به بهبود کیفیت محیط زیست در کشور کمک کند.

مقدمه

تغییرات آب و هوایی به‌عنوان مهم‌ترین مشکلی که در حال حاضر کشورهای مختلف با آن دست‌وپنجه نرم می‌کنند، ظاهر شده است. فشار محیطی و انتشار CO₂ به‌طور قابل‌توجهی در نتیجه رشد اقتصادی و فرآیندهای صنعتی شدن برخی کشورها افزایش یافته است (Zheng et al., 2023). همچنین طی دهه‌های گذشته میزان کسری اکولوژیکی در کشورهای جهان از جمله ایران به‌دلیل افزایش سطح ردپای اکولوژیکی^۱ (EF) و کاهش ظرفیت زیستی که ناشی از افزایش مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی، بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی، روش‌های تولید ناپایدار و فعالیت‌های اقتصادی می‌باشد، افزایش یافته است (Du et al., 2024). بر اساس آمار اعلام‌شده از سوی بانک جهانی (۲۰۲۴) سرانه انتشار CO₂ در ایران از مقدار ۳/۶ متریک تن در سال ۱۹۹۰ به مقدار ۷/۱ متریک تن در سال ۲۰۲۰ رسیده است (چیزی حدود ۲ برابر). همچنین، بر اساس آمار منتشرشده توسط شبکه ردپای جهانی^۲ (۲۰۲۴)، میزان ردپای اکولوژیکی در ایران در سال ۲۰۲۲ (۳/۲۵ سرانه هکتار جهانی)، ۳۳۳ درصد از ظرفیت زیستی آن (۰/۷۵ سرانه هکتار جهانی) فراتر رفته است. کسری اکولوژیکی ایران که در سال ۱۹۶۱، ۰/۵۵- سرانه هکتار جهانی بوده، با ۵۵۴ درصد افزایش به ۲/۵۰ سرانه هکتار جهانی در سال ۲۰۲۲ رسیده است که نشان می‌دهد عرضه موجود منابع طبیعی در ایران برای حفظ الگوهای تولید و مصرف فعلی کافی نیست. بر این اساس، تجزیه و تحلیل عوامل تعیین‌کننده شاخص‌های کیفیت محیط زیست در ایران می‌تواند پیشنهادات ارزشمندی را

در زمینه طراحی سیاست‌های زیست‌محیطی مناسب ارائه دهد. در این راستا، هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی تعیین‌کنندگان علی شاخص‌های زیست‌محیطی در ایران طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۷۰ می‌باشد.

موضوع مهمی که در ادبیات گذشته در زمینه شناسایی عوامل مؤثر بر پایداری محیط زیست مطرح می‌شود آنست که کدام شاخص بایستی برای مدل‌سازی متغیر وابسته استفاده شود. رویکرد متداول و سنتی در این زمینه استفاده از انتشار کربن (CO₂) به‌عنوان نماینده‌ای برای کیفیت محیط زیست به‌دلیل داشتن بالاترین سهم در سطوح انتشار کل گازهای گلخانه‌ای است. با این حال، گروهی از محققان استدلال می‌کنند که تخریب محیطی یک موضوع پیچیده است و CO₂ تنها بر یک بعد آن متمرکز است و بخش کوچکی از مسائل زیست‌محیطی را پوشش می‌دهند (Sun et al., 2023). بر این اساس، استفاده از شاخص ردپای اکولوژیکی (EF) به جای CO₂ و سایر ابعاد تخریب محیط زیست به‌دلیل در نظر گرفتن شش بعد فرعی تخریب محیطی (شامل ردپای کربن، زمین‌های ماهی‌گیری (بسترهای صید)، زمین‌های زراعی، زمین‌های ساخته‌شده، منطقه جنگلی و مراتع) پیشنهاد شده است (Erdogan, 2023). "ردپای اکولوژیکی" تقاضا برای دارایی‌های طبیعی یا دارایی‌های اکولوژیکی مورد نیاز یک جمعیت برای تولید منابع زیست‌محیطی مصرفی و جذب زباله‌های ناشی از آن را در هکتارهای جهانی ارزیابی می‌کند. با این حال، EF به‌دلیل آن که در مدل‌سازی تنها جنبه تقاضای اکولوژی را در نظر می‌گیرد و از بخش عرضه غفلت می‌کند، توسط محققان مورد انتقاد قرار گرفته است و یک شاخص محدود برای کیفیت محیطی در نظر گرفته می‌شود (Jin & Huang, 2023; Zheng et al.)

¹ Ecological Footprint

² Global Footprint Network

فوریه بوت‌استرپ در کوانتایل^۵ (BFGC-Q) بررسی می‌شود. این رویکرد بسط آزمون علیت گرنجری فوریه تودا-یاماموتو^۶ (F-TY) می‌باشد که توسط Cheng و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده است. BFGC-Q یک رویکرد کامل و انعطاف‌پذیر برای ارزیابی ارتباطات علی ارائه می‌کند و مسأله غیرخطی بودن و شکست‌های ساختاری را در نظر می‌گیرد. همچنین اطلاعات مفیدی در مورد یک "رابطه علی دنباله‌دار"^۷ ارائه می‌دهد. در واقع در این رویکرد ارتباط علی در همه چندک‌های شرطی به جای تمرکز بر یک ناحیه واحد از توزیع شرطی بررسی می‌شود. در ادامه به تشریح اثرگذاری متغیرهای مؤثر بر کیفیت محیط‌زیست (شامل: رشد اقتصادی، منابع طبیعی، شهرنشینی و مصرف انرژی تجدیدپذیر) می‌پردازیم. ارتباط بین رشد اقتصادی و شاخص‌های تخریب محیطی مانند EF و انتشار CO₂ با استفاده از منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (EKC) که توسط Grossman & Krueger (۱۹۹۱) مطرح شده است، بررسی می‌شود. EKC معتقد است که در سطوح پایین رشد اقتصادی، ارتباط مثبت و در سطوح بالای رشد اقتصادی، ارتباط منفی بین رشد اقتصادی و تخریب محیط‌زیست وجود دارد (Daliri, 2020). به عبارت دیگر، EKC کلاسیک معتقد است که رابطه بین رشد اقتصادی و تخریب محیط‌زیست به شکل U معکوس می‌باشد. فرم EKC کلاسیک بیان‌گر آمیزه‌ای از سه ارتباط عمده بین رشد اقتصادی (درآمد سرانه) و تخریب محیط‌زیست می‌باشد که عبارتند از: اثر مقیاس، اثر ترکیب و اثر تکنولوژی (تکنیک) (Kazerouni et al., 2019). طبق فرضیه EKC، رشد اقتصادی در ابتدا به دلیل اثر مقیاس، آلودگی را افزایش و سپس با اثرات ترکیب و تکنیک، آلودگی را کاهش می‌دهد. با گذار از بخش کشاورزی به صنعت، تولید به دلیل افزایش صرفه‌جویی در مقیاس، افزایش می‌یابد که با مصرف بیشتر منابع طبیعی همراه است. این افزایش در تولید، افزایش مصرف منابع طبیعی و افزایش مصرف به دلیل صرفه‌جویی در مقیاس، منجر به آلودگی بیشتر محیط‌زیست می‌شود. در مراحل بعدی فرآیند رشد اقتصادی، ساختار اقتصاد با گذار از بخش صنعتی به بخش

اساس بسیاری از مطالعات تجربی جدیدتر از مفهوم ضریب ظرفیت بار (LCF) که توسط Siche و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است، به‌عنوان شاخص جدیدی برای پایداری محیط‌زیست استفاده کرده‌اند و آن را به دلیل مدل‌سازی ابعاد تقاضا و عرضه محیط، شاخص برتر عملکرد زیست‌محیطی دانستند. ضریب ظرفیت بار با تقسیم ظرفیت زیستی بر ردپای اکولوژیکی به دست می‌آید. "ظرفیت زیستی"^۳ نمادی از ظرفیت عرضه طبیعت یا دارایی‌های زیست‌محیطی موجود برای پاسخ‌گویی به تقاضا در یک منطقه یا سیستم خاص می‌باشد (Pata & Isik, 2021; Fang et al., 2024). اگر LCF بزرگ‌تر از عدد ۱ باشد، مازاد اکولوژیک وجود دارد و شرایط محیطی و منابع طبیعی موجود برای رفع نیازهای انسان کافی است؛ اما اگر LCF کوچک‌تر از عدد ۱ باشد، نشان‌گر کسری اکولوژیک است و عادات مصرفی جامعه به محیط‌زیست آسیب می‌رساند. بدیهی است که اگر ظرفیت زیست‌محیطی با ردپای اکولوژیک برابر باشد، عرضه و تقاضای اکوسیستم، مساوی و تعادل اکولوژیک وجود دارد. این حالت نشان‌دهنده حد پایداری است و در آن مقدار LCF مساوی عدد ۱ است (Pata, 2021; Pata & Ertugrul, 2023; Uche & Ngpeah, 2024).

اگرچه تاکنون مطالعات متعددی در زمینه عوامل مؤثر بر شاخص‌های کیفیت محیط‌زیست در ایران انجام شده است، اما مطالعه حاضر از حیث دو جنبه مهم با مطالعات گذشته متفاوت است. نخست آن‌که پژوهش حاضر نخستین تحقیقی است که علاوه بر بررسی عوامل علی تعیین‌کننده شاخص‌های سنتی و رایج زیست‌محیطی شامل انتشار CO₂ و EF، به بررسی تعیین‌کنندگان علی شاخص جدید زیست‌محیطی "ضریب ظرفیت بار"^۴ (LCF) نیز می‌پردازد. LCF به‌عنوان یک شاخص مناسب و جدید برای بررسی کیفیت محیط‌زیست هر دو طرف عرضه و تقاضای اکوسیستم را در نظر می‌گیرد و به نتایج دقیق‌تری منجر می‌گردد. دوم آن‌که در این مطالعه رابطه علی بین متغیرهای مستقل و شاخص‌های کیفیت محیط‌زیست با به‌کارگیری رویکرد نوین علیت گرنجری

⁵ Bootstrap Fourier Granger Causality in Quantile (BFGC-Q)

⁶ Fourier-Toda Yamamoto (F-TY)

⁷ Tail-Causal Relationship

³ Biocapacity

⁴ Load Capacity Factor (LCF)

فساد، سوء مدیریت و نهادهای ضعیف را ایجاد کند. این چالش‌ها مانع وضع مقررات زیست‌محیطی مؤثر می‌شوند و جریان انتشار CO₂ را در اقتصادهای غنی از منابع افزایش می‌دهد (Wang *et al.*, 2023). دیدگاه مثبت مبتنی بر اثر سازگار منابع طبیعی بر محیط‌زیست استدلال می‌کند که رانت منابع طبیعی تأثیر مثبت بر کیفیت محیط‌زیست دارد و منابع طبیعی، کیفیت محیط‌زیست را با کاهش واردات و مصرف سوخت‌های فسیلی بهبود می‌بخشد. در واقع، فراوانی منابع طبیعی می‌تواند با افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر و ارائه منابع انرژی پاک‌تر و کم‌آلاینده‌تر، فشار بر محیط‌زیست را کاهش دهد (Uzar, 2024). از طرفی، تغییر فناوری‌های سنتی به فناوری‌های پیشرفته و پاک‌تر می‌تواند با ایجاد صندوق‌های سبز از طریق درآمدهای ناشی از فروش منابع طبیعی امکان‌پذیر باشد (Pata & Ertugrul, 2023). علاوه بر این، فراوانی منابع طبیعی می‌تواند به بهبود عملکرد اقتصادی یک کشور منجر گردد که به صعود و بالا رفتن از نردبان توسعه و رشد اقتصادی کمک می‌کند. بر این اساس می‌توان نتایج نامطلوب توسعه اقتصادی بر روی کیفیت محیط‌زیست را همان‌طور که در فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (EKC) پیش‌بینی شده است، درونی کرد (Erdogan, 2023).

در مورد تأثیر متغیر شهرنشینی بر کیفیت محیط‌زیست دو دیدگاه متفاوت و غیر هم‌سو وجود دارد. دیدگاه نخست معتقدست که شهرنشینی نیاز به صنعتی‌شدن، استفاده از زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل و سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یک منبع انرژی را افزایش می‌دهد که باعث افزایش زوال اکولوژیک و تخریب محیط‌زیست می‌شود (Faisal *et al.*, 2021). در مقابل، دیدگاه دوم تأکید می‌کند که گسترش شهرنشینی، زمینه بهره‌گیری از صرفه‌های ناشی از مقیاس در استفاده از منابع را ایجاد می‌کند و باعث می‌شود تا انرژی در شهرها نسبت به روستاها به‌صورت کارا تر مصرف گردد. همچنین، چنان‌چه شهرها دارای مدیریت صحیح و کارآمد بوده و دسترسی جمعیت شهرنشین به تکنولوژی‌های پاک و دوست‌دار طبیعت امکان‌پذیر باشد، می‌توان انتظار داشت که گسترش شهرنشینی موجب کاهش سرانه انتشار آلودگی شود (Tarazkar *et al.*, 2018: 156). از طرفی، نرخ بالای شهرنشینی باعث ایجاد درآمد به قیمت کاهش میزان منابع طبیعی می‌شود. از

خدمات تغییر می‌کند. بنابراین، اقتصاد دست‌خوش یک تغییر ساختاری از بخش صنعتی که در آن انرژی با شدت بیشتری استفاده می‌شود، به بخش خدمات که در آن فناوری و سرمایه انسانی با شدت بیشتری استفاده می‌شود، خواهد شد. این اثر ساختاری ممکن است به این معنی باشد که رشد اقتصادی بر اساس بخش خدمات، فشار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد (Pata & Isik, 2021; Wang *et al.*, 2023; Pata & Tanriover, 2023). Dogan & Pata (۲۰۲۲) با الهام از فرضیه EKC یک رابطه U شکل بین تولید ناخالص داخلی/سرانه و LCF را گزارش کردند و این رابطه را به عنوان فرضیه "منحنی ظرفیت بار"^۸ (LCC) توضیح دادند. بر این اساس، تولید و رشد اقتصادی جوامعی که در مراحل نخست هیچ توجهی به محیط‌زیست ندارند می‌تواند منجر به کاهش کیفیت اکولوژیک و در نتیجه کاهش LCF شود. در واقع استفاده از سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های انسانی بدون توجه به محیط‌زیست به شدت کیفیت محیطی را در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی کاهش می‌دهد. اما وقتی کشورها از سطح درآمد معینی فراتر می‌روند، رشد اقتصادی می‌تواند کیفیت محیطی و LCF را به لطف سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تولید پاک‌تر و سبز، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و محصولات دوست‌دار محیط‌زیست و آگاهی بیشتر از محیط‌زیست افزایش دهد (Sun *et al.*, 2023; Pata & Ertugrul, 2023).

دیدگاه‌های متفاوتی در متون اقتصادی در مورد تأثیرات اکولوژیک و رفاهی منابع طبیعی وجود دارد (Erdogan, 2023). دیدگاه منفی در این زمینه معتقد است که استخراج انبوه منابع طبیعی و استفاده ناپایدار از آن‌ها در شیوه‌های تولید و مصرف باعث از بین رفتن تنوع زیستی و کاهش منابع می‌شود و چالش‌های زیست‌محیطی مانند کمبود آب، جنگل‌زدایی و گرم‌شدن زمین را ایجاد می‌کند (Danish *et al.*, 2019). طرفداران این دیدگاه با تأکید بر فرضیه "نفرین کربن"^۹ نشان می‌دهند که سطح انتشار CO₂ در کشورهای غنی از منابع نسبت به کشورهای کم‌برخوردار و یا فاقد این منابع بالاتر است (Khan *et al.*, 2022). همچنین، وجود رانت منابع طبیعی قابل توجه می‌تواند چالش‌های حاکمیتی، از جمله مسائل مربوط به

^۸ Load Capacity Curve (LCC)

^۹ Carbon Curse

توسعه یافته است، تأثیر درآمد، تنوع صادرات، مصرف انرژی تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر را بر ضریب ظرفیت بار (LCF) در اندونزی طی سال‌های ۱۹۶۵-۲۰۱۴ و با استفاده از داده‌های فصلی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده وجود رابطه علیت از مصرف انرژی تجدیدناپذیر به LCF در همه چندک‌ها است؛ در حالی که درآمد، تنوع صادرات و انرژی‌های تجدیدپذیر علت گرنجری کیفیت محیطی در چندک‌های متوسط و بالاتر (در محدوده ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹) هستند. Pata و Samour (۲۰۲۲) تأثیر انرژی هسته‌ای و انرژی تجدیدپذیر را بر ردپای اکولوژیک، انتشار دی‌اکسید کربن (CO₂) و ضریب ظرفیت بار و همچنین اعتبار فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (EKC) را برای فرانسه از سال ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۷ بررسی کرده‌اند. به این منظور از آزمون‌های هم‌انباشتگی و علیت با تبدیل فوریه استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که هیچ رابطه U شکل معکوس بین انتشار CO₂ و درآمد وجود ندارد؛ اما فرضیه EKC برای ضریب ظرفیت بار برقرار است. انرژی هسته‌ای انتشار CO₂ را کاهش و ضریب ظرفیت بار را افزایش می‌دهد؛ اما انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر طولانی‌مدت بر شرایط محیطی ندارد. Zheng و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از آزمون علیت گرنجری فوریه مبتنی بر بوت‌استرپ در چندک (BFGC-Q)، تأثیر شهرنشینی، انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع طبیعی و رشد اقتصادی را بر پروکسی‌های محیطی (LF، EF و CO₂) در چین طی سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۸ و با استفاده از داده‌های فصلی ارزیابی کرده‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که رشد اقتصادی، کیفیت اکولوژیک را کاهش داده است؛ اما شهرنشینی، انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع طبیعی کیفیت اکولوژیک را ارتقاء می‌دهند. Fang و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی نقش منابع طبیعی، استفاده از زیست‌توده، شهرنشینی و ریسک سیاسی بر ضریب ظرفیت بار در کشور تایلند و در چارچوب فرضیه LCC بین سال‌های ۱۹۸۴ و ۲۰۱۸ پرداخته‌اند. نتیجه برآوردگر ARDL نشان می‌دهد که منابع طبیعی، ریسک سیاسی و شهرنشینی، LCF را کاهش می‌دهند، در حالی که زیست‌توده، LCF را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این مطالعه فرضیه LCC را تأیید می‌کند. همچنین، نتایج روش علیت دامنه فرکانس نشان می‌دهد که رابطه علی

آن‌جایی که ساکنان شهری اکنون قدرت خرید بیشتری دارند، ممکن است تقاضای بیشتری برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر داشته باشند که این موضوع می‌تواند سرعت تخریب محیط‌زیست را کاهش دهد (Zheng et al., 2023).

انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند با ترویج توسعه پایدار و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی انرژی‌های تجدیدپذیر، تأثیر مثبت احتمالی بر پایداری محیطی داشته باشند (Sarkodie et al., 2020). منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی‌های بادی، خورشیدی و برق آبی، بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر CO₂ یا سایر آلاینده‌های مرتبط با سوخت‌های فسیلی، تولید الکتریسیته می‌کنند. با جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای انرژی‌های تجدیدناپذیر، می‌توان سطح کلی ردپای اکولوژیک، انتشار CO₂ و سرعت گرمایش جهانی را کاهش داد. این موضوع می‌تواند به کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی و حفاظت از محیط‌زیست کمک کند. علاوه بر این، پذیرش و پیاده‌سازی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند فرصت‌های جدیدی را برای ایجاد شغل و رشد تولید ناخالص داخلی فراهم کند. این می‌تواند به ترویج توسعه پایدار و کاهش فقر کمک کند و در عین حال اثرات منفی زیست‌محیطی مرتبط با رشد تولید ناخالص داخلی را نیز کاهش دهد (Feng et al., 2024). علاوه بر این، انرژی‌های تجدیدپذیر راه مناسبی برای استفاده مجدد از مازاد مالی قابل توجه ایجادشده از تولید نفت ارائه دهد و امکان تغییر فناوری‌های سنتی به فناوری‌های پیشرفته و پاک‌تر را فراهم کند (Amer et al., 2024a).

در ادامه به ترتیب منتخبی از جدیدترین مطالعات تجربی خارجی انجام‌شده در زمینه موضوع تحقیق و منتخبی از مطالعات داخلی نزدیک به موضوع تحقیق بررسی می‌گردد. Cheng و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مجدد پیوندهای علیت بین شهرنشینی، مصرف زغال‌سنگ و انتشار CO₂ در چین با استفاده از آزمون جدید توسعه‌یافته علیت گرنجر فوریه بوت‌استرپ در کوانتایل طی دوره ۱۹۶۹-۲۰۱۹ پرداخته‌اند. نتایج آزمون علیت گرنجری نشان‌دهنده وجود علیت از شهرنشینی به انتشار CO₂ (در کوانتایل ۰/۲) و مصرف زغال‌سنگ (در کوانتایل‌های ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) است. Fareed و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از آزمون علیت چندکی فوریه که اخیراً

بین LCF و متغیرهای توضیحی به استثنای شهرنشینی وجود دارد. Pal و Villanthenkodath (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر نااطمینانی، ریسک ژئوپلیتیک، رشد اقتصادی، مصرف انرژی تجدیدپذیر و رانت منابع طبیعی بر شاخص‌های کیفیت محیط‌زیست شامل ردپای اکولوژیکی (EF)، انتشار CO₂ و ضریب ظرفیت بار (LCF) طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۹۰ در کشور هند پرداخته‌اند. به این منظور از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی^{۱۰} (ARDL) و تحلیل‌های شبیه‌سازی ARDL پویا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نااطمینانی و ریسک ژئوپلیتیک کیفیت محیط‌زیست را با کاهش EF و انتشار CO₂ بهبود می‌بخشند؛ اما با کاهش LCF باعث تخریب محیط‌زیست می‌شوند. علاوه بر این، رشد اقتصادی و رانت منابع طبیعی کیفیت محیط‌زیست را با افزایش EF، کاهش می‌دهند؛ اما با افزایش ضریب ظرفیت بار باعث بهبود محیط‌زیست می‌شوند. مصرف انرژی تجدیدپذیر نیز با کاهش EF و انتشار CO₂ و افزایش LCF به افزایش کیفیت محیط‌زیست منجر می‌گردد. Pata و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از LCF به‌عنوان شاخص محیطی و با به‌کارگیری آزمون علیت فوریه با سری تجزیه‌شده موجک نشان می‌دهند که بین کل انرژی تجدیدپذیر، چوب، زیست‌توده و رشد اقتصادی و همچنین بین این انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و LCF یک علیت دو طرفه در ایالات متحده طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۱۶ وجود داشته است.

Pahlavani و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های سری زمانی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۹ و مدل‌های VAR و VECM آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت منتخبی از متغیرها را بر کیفیت محیط‌زیست در ایران بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق بیان‌گر آن است که در کوتاه‌مدت، متغیر جمعیت شهرنشینی و مصرف انرژی بالاترین تأثیرگذاری را بر میزان تولید SO₂ داشته و در بلندمدت نیز سرانه مصرف انرژی بالاترین تأثیر را بر آلودگی SO₂ داشته است. Roozitalab و Hoseinpour (۲۰۱۸) به بررسی رابطه علی بین انتشار سرانه دی‌اکسید کربن، سرانه مصرف انرژی، سرانه تولید ناخالص داخلی، آزادسازی تجاری، توسعه مالی و جمعیت شهری در ایران طی سال‌های ۱۳۵۵-۱۳۹۴ پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کشش انتشار

CO₂ نسبت به سرانه تولید خالص داخلی، آزادسازی تجاری، سرانه مصرف انرژی و جمعیت شهری مثبت و نسبت به شاخص توسعه مالی منفی است. به علاوه، نتایج آزمون علی با استفاده از الگوی تصحیح خطای برداری نشان می‌دهد که یک رابطه علی دوطرفه بین سرانه تولید ناخالص داخلی و توسعه مالی با انتشار CO₂ و یک رابطه علی یک‌طرفه از آزادسازی تجاری، سرانه مصرف انرژی، شهرنشینی به انتشار CO₂ وجود دارد. Molaei و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر متغیرهای تولید ناخالص داخلی، شاخص تجارت آزاد، شهرنشینی، شاخص توسعه انسانی، شاخص توسعه بازارهای مالی را بر ردپای اکولوژیک در ایران طی دوره ۲۰۱۱-۱۹۶۵ و با روش اقتصادسنجی ARDL بررسی کرده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده درآمد سرانه، آزادسازی تجارت، توسعه بازارهای مالی و شهرنشینی هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت تأثیر مثبت و معنی‌دار و شاخص توسعه انسانی تأثیر منفی و معنی‌دار بر ردپای اکولوژیک سرانه دارند. Golkhandan (۲۰۲۳) عوامل مؤثر بر شاخص ردپای اکولوژیک در ایران را با تأکید بر تأثیر نامتقارن و غیرخطی شاخص ریسک سیاسی طی دوره زمانی ۲۰۲۰-۱۹۹۰ بررسی کرده است. نتایج حاصل از برآوردگر MATNARDL حاکی از آنست که اثر ریسک سیاسی بر ردپای اکولوژیک در ایران، نامتقارن است و تنها با افزایش چشم‌گیر در ثبات سیاسی می‌توانیم شاهد کاهش ردپای اکولوژیک در کشور باشیم. بر اساس سایر نتایج، رشد اقتصادی تأثیر مثبت و معنادار و درجه بازبودن تجاری و مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر اثر منفی و معنادار بر ردپای اکولوژیک در ایران در بلندمدت و کوتاه‌مدت داشته‌اند. Hoseini و همکاران (۲۰۲۴) با به‌کارگیری اطلاعات استان‌های کشور در قالب داده‌های پانل و استفاده از یک مدل STIRPAT به بررسی عوامل مؤثر بر انتشار CO₂ پرداخته‌اند. نتایج مدل پانل برآوردی نشان می‌دهد که مصرف انرژی، درآمد سرانه، ضریب جینی و رشد جمعیت اثر مثبت و معنی‌دار بر انتشار CO₂ داشته است.

¹⁰ Autoregressive Distributed Lag (ARDL)

مواد و روش‌ها

فرم تبعی مدل این پژوهش برگرفته از مطالعات تجربی Zheng و همکاران (۲۰۲۳) و به صورت زیر است:

$$\ln \overline{EQ}_t = f(\ln GDP_t, \ln NR_t, \ln URB_t, \ln REC_t, \varepsilon_t) \quad (1)$$

در رابطه فوق \ln : لگاریتم طبیعی؛ \overline{EQ} : بردار شاخص‌های اندازه‌گیری کیفیت محیط‌زیست است که شامل شاخص

ضریب ظرفیت بار (LCF) به‌عنوان شاخص مستقیم (پایداری) محیط‌زیست و دو شاخص انتشار CO_2 و ردپای اکولوژیک (EF) به‌عنوان شاخص‌های معکوس (تخریب) محیط‌زیست می‌باشد؛ ε : جزء اخلاص (خطا) مدل و t : دوره‌ی زمانی تحقیق (۲۰۲۲-۱۹۷۰) است. در جدول ۱ تعریف دقیق کلیه متغیرها به همراه منبع جمع‌آوری داده‌های آن‌ها گزارش شده است.

جدول ۱- متغیرها، نماد، نحوه اندازه‌گیری و منابع داده‌ها

منبع	نحوه اندازه‌گیری	نماد	متغیر
محاسبات تحقیق با استفاده از داده‌های وبسایت شبکه ردپای جهانی ^{۱۱} (GFN) (۲۰۲۴)	نسبت ظرفیت زیستی (بر حسب سرانه هکتار جهانی) به ردپای اکولوژیکی (بر حسب سرانه هکتار جهانی)	LCF	ضریب ظرفیت بار
وبسایت GFN (۲۰۲۴)	سرانه هکتار جهانی	EF	ردپای اکولوژیک
وبسایت دنیای ما در داده ^{۱۲} (OWID) (۲۰۲۴)	میزان انتشار کربن دی‌اکسید از سوخت‌های فسیلی و صنعت (بر حسب میلیون تن)	CO ₂	انتشار CO ₂
وبسایت شاخص‌های توسعه جهانی ^{۱۳} (WDI) متعلق به بانک جهانی (۲۰۲۴)	تولید ناخالص داخلی حقیقی سرانه (بر حسب دلار و به قیمت‌های ثابت سال ۲۰۱۵)	GDP	رشد اقتصادی
وبسایت WDI (۲۰۲۴)	سهم رانت کل منابع طبیعی از GDP (بر حسب درصد)	NR	رانت منابع طبیعی
وبسایت WDI (۲۰۲۴)	سهم جمعیت شهری از کل جمعیت (بر حسب درصد)	URB	درجه شهرنشینی
وبسایت OWID (۲۰۲۴)	سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر از انرژی اولیه معادل (بر حسب درصد)	REC	مصرف انرژی تجدیدپذیر

نشانی وبسایت GFN: <https://www.footprintnetwork.org>

نشانی وبسایت OWDI: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

نشانی وبسایت WDI: <https://data.worldbank.org/indicator>

¹¹ Global Footprint Network (GFN)

¹² Our World in Data (OWID)

¹³ World Development Indicators (WDI)

(۳)

$$\alpha(t) \cong \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_{1k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{k=1}^n \alpha_{2k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)$$

در معادله (۳)، n تعداد فرکانس‌ها، k تعداد فرکانس‌های خاص انتخاب‌شده، t روند زمانی، T تعداد مشاهدات، α_{1k} و α_{2k} به ترتیب ارتفاع موج فرکانس (دامنه) و سرعت فرآیند ناپدید شدن موج (جابه‌جایی) فرکانس را محاسبه می‌کنند و π تقریباً برابر با عدد $3/145$ می‌باشد (Nazlioglu *et al.*, 2019). حال، $\alpha(t)$ با استفاده از تقریب فوریه مرتب می‌شود؛ بر این اساس معادله (۳) در معادله (۲) جای‌گزین و آزمون علیت TY با در نظر گرفتن شکست‌های ساختاری انجام می‌شود:

(۴)

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_{1k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{k=1}^n \alpha_{2k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_{p+d_{max}} y_{t-(p+d_{max})} + \epsilon_t$$

برای تعیین مقدار بهینه k (فرکانس بهینه) در محدوده $0/1$ تا 5 ، مقداری که SSR (مجموع مربعات باقیمانده‌ها) را به حداقل می‌رساند، انتخاب و سپس طول وقفه بهینه p با استفاده از معیارهای تعیین طول وقفه بهینه تعیین می‌شود. در معادله (۴)، اهمیت اصطلاحات مثلثاتی \sin و \cos را می‌توان با استفاده از آماره F ارائه‌شده توسط Becker و همکاران (۲۰۰۶) آزمون کرد. اگر پارامترهای مثلثاتی برابر با صفر نباشند، یعنی فرضیه صفر $\alpha_{1k} = \alpha_{2k} = 0$ رد شود، تقریب فوریه در تحلیل لحاظ می‌شود. در غیر این صورت می‌توان آزمون علیت استاندارد TY را اعمال کرد. در صورتی که پارامترهای فوریه برابر با صفر نباشند، فرضیه صفر عدم رابطه علیت را می‌توان به صورت $H_0: \beta_1 = \dots = \beta_{p+d_{max}} = 0$ آزمایش کرد (Fareed *et al.*, 2021).

در حالی که آزمون علیت F-TY معرفی شده توسط Nazlioglu و همکاران (۲۰۱۶) از مزیت‌های ویژه‌ای برخوردار است، رویکرد حداقل مربعات مرسوم زمانی که سری مورد بررسی به‌طور غیرنرمال توزیع می‌شود و شکل غیرخطی دارد، غیرکارا می‌باشد. در واقع، آزمون علیت فوریه تودا-یاماموتو اطلاعاتی در مورد علیت‌های غیرخطی و رابطه علیت-دنباله‌دار ارائه نمی‌دهد. با توجه به این موضوع، Cheng و همکاران (۲۰۲۱) آزمون علیت F-TY را با استفاده از رویکرد خودرگرسیون چندکی اصلاح کرد.

Granger (۱۹۶۹) آزمون علیت را برای تعیین قدرت پیش‌بینی یک متغیر توسط متغیر دیگر پیشنهاد کرد. با گذشت زمان، بسیاری از محققان آزمون علیت گرنجر (ی) را اصلاح کردند. Toda و Yamamoto (۱۹۹۵) (TY) با استفاده از داده‌های متغیرها در سطح و افزودن حداکثر (ماکزیمم) درجه انباشتگی (مانایی) متغیرها به وقفه بهینه یک مدل خودرگرسیون برداری^{۱۴} (VAR)، آزمون علیت گرنجر را برای جلوگیری از اتلاف و از بین رفتن اطلاعات در بلندمدت گسترش دادند. فرم آزمون علیت TY در قالب یک مدل VAR(p+d_max) به صورت معادله رابطه (۲) نشان داده می‌شود:

$$y_t = \alpha(t) + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_{p+d_{max}} y_{t-(p+d_{max})} + \epsilon_t \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\alpha(t)$ نشان‌دهنده عرض‌ازمبدهای وابسته به زمان (که در آزمون TY ثابت می‌باشند)، β_1 نشان‌دهنده ماتریس ضرایب، y_t بردار متغیرهای درون‌زا، p طول وقفه بهینه، d_{max} نشان‌دهنده حداکثر درجه انباشتگی متغیرها و ϵ_t عبارت‌های خطا را نشان می‌دهد (Fareed *et al.*, 2021). مسأله غیرخطی بودن و شکست‌های ساختاری توسط آزمون‌های علیت سنتی مانند آزمون TY، در نظر گرفته نمی‌شوند. Enders & Jones (۲۰۱۶) مدل VAR را با گنجاندن تقریب‌های فوریه بهبود دادند تا از تحلیل آزمون علیت با نادیده گرفتن شکست‌های ساختاری جلوگیری کنند. این موضوع امکان گنجاندن شکست‌های (های) ساختاری هموار در تحلیل علیت را فراهم کرد. با این وجود، روش Enders & Jones (۲۰۱۶) در بلندمدت نمی‌تواند مانع از بروز مشکل از دست‌دادن اطلاعات شود. در نتیجه، آزمون TY توسط Nazlioglu و همکاران (۲۰۱۶) با در نظر گرفتن تقریب فوریه برای محافظت در برابر از دست‌دادن اطلاعات بلندمدت و در نظر گرفتن تغییرات ساختاری هموار، به روزرسانی و ارائه شد. در این رویکرد، که فوریه تودا-یاماموتو (F-TY) نامیده می‌شود، از تکنیک Gallant (۱۹۸۱) همان‌طور که در معادله (۳) نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در واقع، این فرض را که عرض‌ازمبدها در طول زمان تغییر نمی‌کند، همان‌طور که در معادله (۳) نشان داده شده است، از بین می‌رود:

¹⁴ Vector AutoRegression (VAR)

Cheng و همکاران (۲۰۲۱)، این رویکرد را که با عنوان "علیت گرنجری فوریه بوت‌استرپ در چندک" (BFGC-Q) شناخته می‌شود، با هدف ارائه روشی انعطاف‌پذیر و دقیق برای ارزیابی روابط علیت بین متغیرها مطرح کردند. در این روش آزمون علیت درون هر چندک شرطی آزمایش می‌شود و این ویژگی به محققان اجازه می‌دهد تا تشخیص دهند که کدام قسمت از توزیع متغیرهای وابسته توسط متغیرهای کمکی پیش‌بینی می‌شود (Cheng et al., 2021). برای ساخت آزمون BFGC-Q، چندک‌ها به معادله (۴) اضافه می‌شوند و معادله زیر برآورد می‌شود:

(۵)

$$Q_{\tau}(t|Z) = \alpha_0(\tau) + \sum_{k=1}^n \alpha_{1k}(\tau) \sin\left(\frac{2\pi k^* t}{T}\right) + \sum_{k=1}^n \alpha_{2k}(\tau) \cos\left(\frac{2\pi k^* t}{T}\right) + \beta_1(\tau) y_{t-1} + \dots + \beta_{p^*+d_{\max}}(\tau) y_{t-(p^*+d_{\max})} + \epsilon_t$$

در معادله (۵)، Z و τ به ترتیب نشان‌دهنده کوانتایل خاص و ماتریس متغیرهای کمکی^{۱۵} (همگام) است، k^* و p^* نیز به ترتیب فرکانس‌ها و وقفه‌های بهینه هستند. با برآورد معادله (۵) با رویکرد رگرسیون چندکی، عدم وجود علیت گرنجر را می‌توان در چندک‌های مختلف به شرح زیر آزمایش کرد:

(۶)

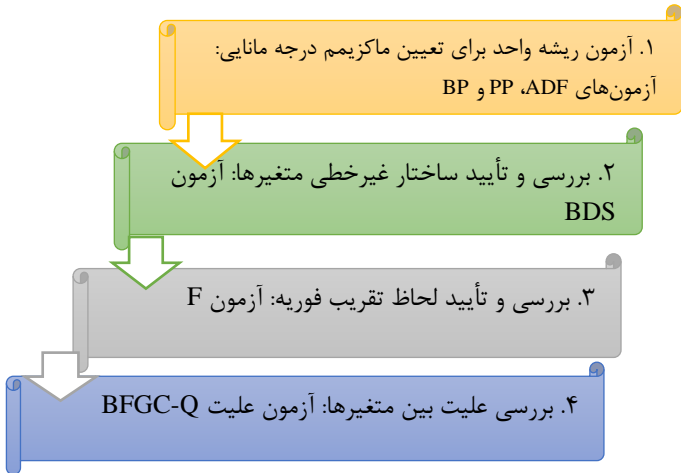
$$H_0: \bar{\beta}_1(\tau) = \bar{\beta}_2(\tau) = \dots = \bar{\beta}_{p^*}(\tau) = 0 \quad \forall \tau \in (0,1)$$

$$Wald = \left[T \left(\left(\hat{\beta}(\tau) \right)' \left(\hat{\Omega}(\tau) \right)^{-1} \left(\hat{\beta}(\tau) \right) \right) \right] / \tau(1-\tau)$$

در معادله (۶)، $\beta(\tau)$ شامل بردار ضرایب برای چندک τ است و Ω نشان‌دهنده یک برآوردگر قوی از ماتریس واریانس-کوواریانس برای $\beta(\tau)$ است. اگر آمار والد بزرگ‌تر از مقادیر بحرانی به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی بوت‌استرپ باشد^{۱۶}، فرضیه صفر در معادله (۵) رد می‌شود و علیت در کوانتایل مربوطه تأیید می‌شود.

^{۱۵} Covariate Matrix

^{۱۶} همان‌طور که Hatemi-J & Uddin (۲۰۱۲) بیان می‌کنند، اثرات خودرگرسیون واریانس ناهمسانی شرطی (ARCH: Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) در داده‌های مالی معمولاً از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند و از این‌رو این احتمال وجود دارد که توزیع آماره والد به‌طور قابل‌توجهی از توزیع مجانبی آن منحرف گردد. بنابراین مطابق مطالعه حاتمی-ج و یودین Hatemi-J & Uddin (۲۰۱۲)، از تکنیک شبیه‌سازی بوت‌استرپینگ برای ۱۰۰۰۰ بار تکرار به‌منظور ساخت مقادیر بحرانی در سطوح ۱۰، ۵، و ۱ درصد، استفاده شده است.



شکل ۱- چارچوب اقتصادسنجی تحقیق به‌منظور انجام آزمون علیت BFGC-Q

نتایج

در جدول ۲ خلاصه آماری داده‌های خام متغیرهای پژوهش نشان داده شده است. بر این اساس، طی دوره مورد بررسی، میانگین ضریب ظرفیت بار (LCF) حدود ۰/۵۷ است که نشان می‌دهد به‌طور متوسط به ازای یک واحد تقاضای اکوسیستم، ۰/۵۷ واحد تقاضا وجود دارد که حاکی از ناپایداری زیست‌محیطی و فشار بالا بر آن است. میانگین شاخص ردپای اکولوژیکی (EF) و انتشار CO₂ نیز به ترتیب حدود ۲/۲۲ سرانه هکتار جهانی و ۳۴۶ میلیون تن بوده است. بر اساس مقدار آماره جارک-برا و سطح احتمال محاسبه‌شده آن می‌توان گفت که هیچ‌یک از شاخص‌های کیفیت محیط‌زیستی مدل، در سطح ۱۰ درصد از توزیع نرمال برخوردار نیستند که استفاده از آزمون علیت F-TY در کوانتایل را توجیه می‌کند.

جدول ۲- خلاصه آماری داده‌های خام متغیرهای پژوهش

آماره	متغیر						
	REC	URB	NR	GDP	CO ₂	EF	LCF
میانگین	۲/۴۳۵	۶۰/۵۷۱	۲۳/۹۹۷	۴۷۴۱	۳۴۶	۲/۲۲۱	۰/۵۶۵
میانه	۲/۲۷۱	۶۱/۰۸۷	۲۳/۲۳۹	۴۹۰۹	۲۶۹	۲/۲۳۲	۰/۴۵۴
ماکزیمم	۵/۰۱۹	۷۶/۸۰۷	۴۷/۸۱۱	۷۶۲۲	۷۱۰	۳/۲۶۰	۱/۳۰۲
مینیمم	۰/۷۳۰	۴۱/۲۱۲	۱۳/۱۳۶	۲۹۸۷	۹۲	۱/۰۴۰	۰/۲۳۱
انحراف استاندارد	۱/۱۶۶	۱۰/۵۶۷	۵/۶۲۱	۱۱۰۹	۲۰۸	۰/۸۳۲	۰/۳۳۹
چولگی	۰/۳۴۹	-۰/۱۴۳	۰/۳۱۵	۰/۵۴۶	۰/۴۳۹	-۰/۰۰۴	۰/۱۸۶۵
کشیدگی	۲/۰۳۶	۱/۷۸۷	۲/۹۹۸	۲/۷۲۳	۱/۶۷۶	۱/۳۰۷	۲/۵۶۴
جارك-برا	۳/۱۲۷	۳/۴۳۳	۰/۸۷۹	۲/۷۹۹	۵/۵۷۴	۶/۳۳۰	۷/۰۲۹
احتمال	۰/۲۰۹	۰/۱۷۹	۰/۶۴۴	۰/۲۴۷	۰/۰۶۲	۰/۰۴۲	۰/۰۲۹
تعداد مشاهدات	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳

* آماره جارك-برا وضعیت نرمال بودن را بررسی می‌کند و سطح احتمال آن نشان‌دهنده فرضیه صفر نرمال بودن است.

درجه مانایی (I(2) می‌باشد (بالاترین درجه مانایی) و این متغیر در هر سه مدل مورد بررسی به‌عنوان یک متغیر مستقل وارد می‌شود، بنابراین، ماکزیمم درجه مانایی (d_{max}) متغیرها در هر سه مدل، عدد ۲ است.

آزمون BDS: در ادامه با استفاده از آزمون BDS فرض مستقل بودن متغیرها و ساختار غیرخطی بین آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴، آماره BDS که از توزیع نرمال برخوردار است، در درجه‌های ۲ تا ۶، سطح احتمال ۰/۰۰۰ را اختیار کرده و بنابراین در این ۵ درجه، فرض مستقل بودن متغیرها رد می‌شود که نشان‌دهنده احتمال وجود رابطه غیرخطی بین متغیرهاست.

آزمون F: در جدول ۵ نتایج آزمون F برای تعیین اینکه آیا تقریب فوریه برای بررسی علیت مورد نیاز است یا خیر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر آماره F در مدل با شاخص زیست‌محیطی $\ln LCF$ برابر با ۱۸/۱۱۸، در مدل با شاخص زیست‌محیطی $\ln EF$ برابر با ۱۲/۶۱۶ و در مدل با شاخص زیست‌محیطی $\ln CO_2$ برابر با ۱۰/۵۱۵ است. این مقادیر در تمام سطوح معنی‌داری ۱، ۵ و ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر بحرانی بوت‌استرپ آن‌ها است. در واقع فرضیه صفر عدم وجود مؤلفه‌های فوریه به‌طور معناداری در سطوح معنی‌داری ۱، ۵ و ۱۰ درصد رد می‌شود. بر این اساس بایستی از تقریب فوریه برای ارزیابی روابط متقابل علی بین هر سه شاخص محیطی و عوامل احتمالی مؤثر بر آن‌ها استفاده شود. همچنین، در جدول ۵ مقدار فرکانس و وقفه بهینه برای انجام آزمون علیت BFGC-Q در هر سه مدل نشان داده شده است.

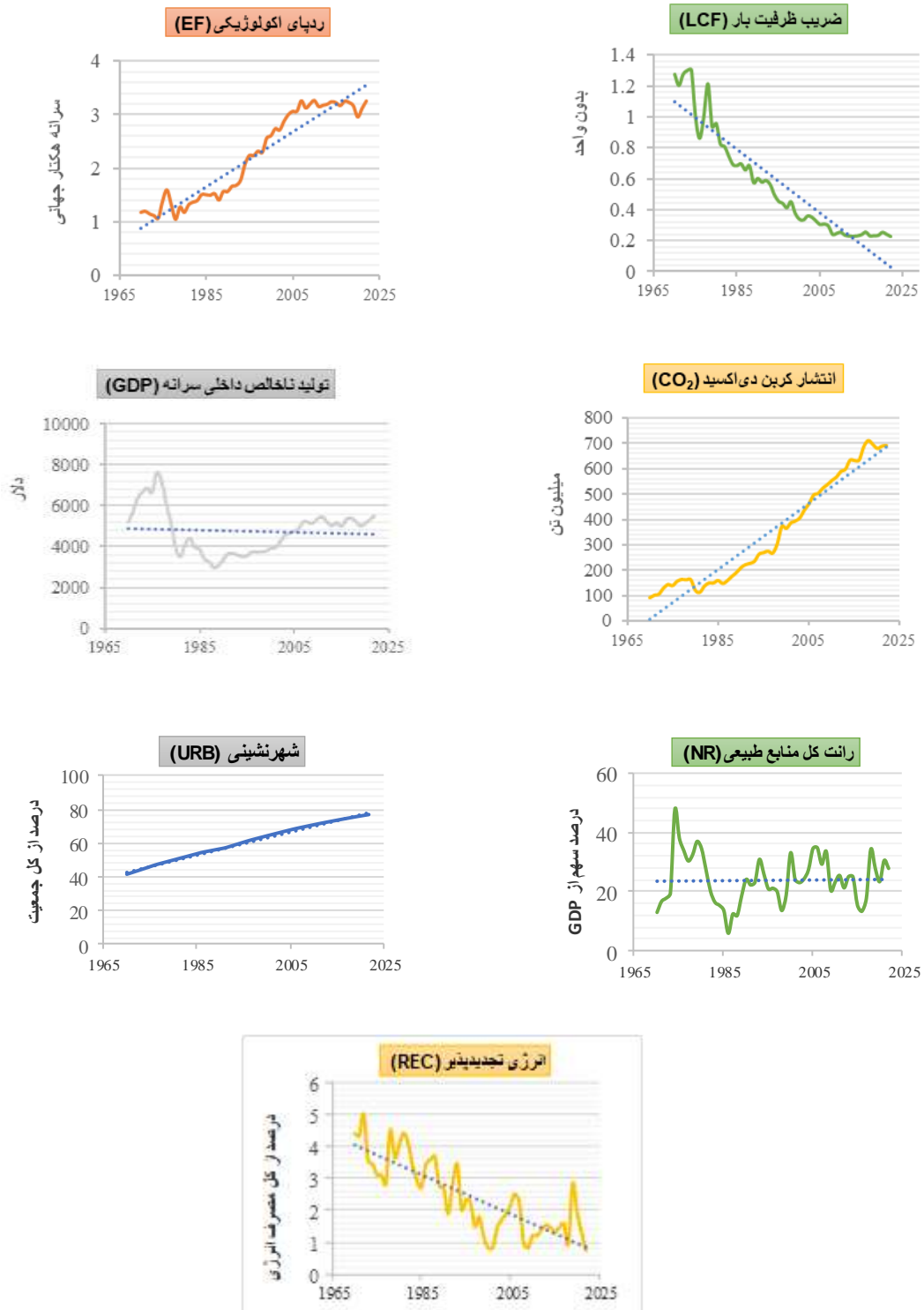
در شکل ۲ روند حرکتی متغیرهای پژوهش طی سال‌های ۱۹۷۰-۲۰۲۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است شاخص‌های تخریب محیط‌زیست ردپای اکولوژیک و انتشار CO_2 ، یک روند صعودی طی دوره مورد بررسی داشته‌اند. همچنین بررسی شاخص ضریب ظرفیت بار به‌عنوان شاخص پایداری محیط‌زیست نشان می‌دهد که روند این شاخص طی دوره مورد بررسی نزولی بوده و طی سال‌های اخیر مقدار آن از سطح پایداری (عدد یک) فاصله قابل‌توجهی پیدا کرده است. مقدار LCF که در سال ۱۹۷۰، حدود ۱/۲۷ بوده است، در سال ۲۰۲۲ به مقدار ۰/۲۳ کاهش یافته است که نشان می‌دهد عرضه موجود منابع طبیعی در ایران برای حفظ الگوهای تولید و مصرف فعلی جامعه کافی نیست.

آزمون ریشه واحد: گام نخست در انجام آزمون علیت BFGC-Q، آگاهی از درجه مانایی ماکزیمم (d_{max}) متغیرهاست. در جدول ۳، خلاصه نتایج آزمون‌های ریشه واحد دیکی‌فولر تعمیم‌یافته^{۱۷} (ADF)، فیلیپس‌پرون^{۱۸} (PP) و نقطه شکست^{۱۹} (BP) با وجود متغیرهای عرض از مبدأ و روند زمانی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سطح ۱ درصد، متغیرهای $\ln EF$ ، $\ln CO_2$ و $\ln NR$ بر اساس هر سه آزمون، در سطح نامانای می‌باشند و پس از یک‌بار تفاضل‌گیری به‌صورت مانا درآمده‌اند. سایر متغیرها نیز بر اساس برخی آزمون‌ها در سطح و بر اساس برخی دیگر در تفاضل مرتبه اول و یا دوم، مانا می‌باشند. با توجه به این‌که متغیر $\ln URB$ در دو آزمون ADF و PP دارای

¹⁷Augmented Dicky-Fuller (ADF)

¹⁸Philips & Peron (PP)

¹⁹Break Point (BP)



شکل ۲- روند حرکتی متغیرهای پژوهش طی سال های ۱۹۷۰-۲۰۲۲

بررسی علیت بین متغیرها: نتایج آزمون علیت کوانتایل فوریه در مورد تعیین کنندگان علی شاخص زیست محیطی ضریب ظرفیت بار (LCF) در جدول ۶ گزارش شده است. نتایج نشان می دهد که یک رابطه علی از تولید ناخالص داخلی (lnGDP) به lnLCF در چندک های پایین و متوسط (۱۰th، ۳۰th و ۵۰th) به ترتیب در سطوح احتمال ۵، ۱ و ۱۰ درصد وجود دارد. علاوه بر این، علامت منفی علیت در این زمینه نشان می دهد که تأثیر تولید ناخالص داخلی بر LCF در این چندک ها، منفی است. این موضوع تأثیر کاهش تولید ناخالص داخلی بر شاخص زیست محیطی LCF را در چندک های پایین و متوسط تأیید می کند. نتایج آزمون علی در مورد رانت منابع طبیعی (lnNR) نشان دهنده عدم وجود رابطه علی از این

متغیر به lnLCF در تمام کوانتایل ها می باشد که گویای این موضوع است که رانت منابع طبیعی نمی تواند شاخص زیست محیطی LCF را در ایران پیش بینی کند. علاوه بر این، در تمام چندک ها (۱۰th-۹۰th)، وجود رابطه علی قوی در سطح احتمال ۱ درصد از lnURB به lnLCF تأیید می شود. علامت این رابطه علیت، منفی است که نشان می دهد تأثیر شهرنشینی بر LCF به عنوان شاخص کیفیت محیطی، منفی می باشد. به طور مشابه، در تمام چندک ها (۱۰th-۹۰th)، وجود رابطه علی قوی از lnREC به lnLCF با علامت مثبت وجود دارد. این نتیجه نشان می دهد که مصرف انرژی تجدیدپذیر به پایداری اکوسیستم در ایران کمک می کند.

جدول ۳- نتایج آزمون های ریشه واحد ADF، PP و BP

درجه مانایی	آزمون BP			آزمون PP		آزمون ADF		متغیر
	Prob.	سال شکست	آماره	Prob.	آماره	Prob.	آماره	
I (1) یا I (0)	۰/۰۲۷	۲۰۱۵	***-۵/۰۸۶	۰/۲۹۰	-۲/۵۸۲	۰/۳۱۱	-۲/۵۳۴	lnLCF
	-	-	-	۰/۰۰۰	***-۱۰/۶۷۶	۰/۰۰۰	***-۸/۱۰۲	$\Delta(\lnLCF)$
I (1)	۰/۶۴۲	۱۹۹۴	-۳/۵۷۹	۰/۵۴۸	-۲/۰۷۳	۰/۴۷۳	-۲/۲۱۲	lnEF
	<۰/۰۱	۱۹۷۸	***-۹/۸۷۵	۰/۰۰۰	***-۹/۸۹۹	۰/۰۰۰	***-۷/۶۱۱	$\Delta(\lnEF)$
I (1)	۰/۲۰۷	۱۹۹۷	-۴/۳۰۱	۰/۵۰۷	-۲/۱۵۰	۰/۶۴۴	۱/۸۹۱	lnCO2
	<۰/۰۱	۱۹۸۰	***-۸/۲۰۸	۰/۰۰۰	***-۶/۰۰۵	۰/۰۰۰	***-۵/۵۸۸	$\Delta(\lnCO2)$
I (1) یا I (0)	۰/۰۱۵	۱۹۷۷	** -۵/۲۵۶	۰/۸۶۱	-۱/۳۶۲	۰/۶۳۶	-۱/۹۰۷	lnGDP
	-	-	-	۰/۰۰۶	***-۴/۳۶۳	۰/۰۰۲	***-۴/۷۳۳	$\Delta(\lnGDP)$
I (1)	۰/۲۳۹	۱۹۸۶	-۴/۲۳۵	۰/۰۶۷	*-۳/۳۷۱	۰/۰۷۲	*۳/۳۳۳	lnNR
	<۰/۰۱	۱۹۷۴	***-۸/۶۲۶	۰/۰۰۰	***-۷/۹۵۹	۰/۰۰۰	***-۷/۸۴۷	$\Delta(\lnNR)$
I (2) یا I (0)	<۰/۰۱	۱۹۹۱	***-۷/۰۰۴	۰/۴۵۲	-۲/۲۵۲	۰/۹۲۲	-۱/۰۸۴	lnURB
	-	-	-	۰/۳۶۹	-۲/۴۱۱	۰/۱۳۲	-۳/۰۴۲	$\Delta(\lnURB)$
I (1) یا I (0)	-	-	-	۰/۰۰۱	***-۵/۰۹۴	۰/۰۰۱	***-۵/۱۹۴	$\Delta(\Delta \lnURB)$
	۰/۱۲۹	۱۹۹۳	-۴/۵۰۷	۰/۰۱۶	** -۳/۹۷۷	۰/۰۱۸	** -۳/۹۱۷	lnREC
	<۰/۰۱	۲۰۲۱	***-۸/۶۴۷	-	-	-	-	$\Delta(\lnREC)$

* وقفه انتخابی برای آماره آزمون ADF و BP توسط معیار شوارتز با حداکثر طول ۸ وقفه، انتخاب نقطه شکست بر اساس حداقل سازی آماره t دیکی فولر (DF) و روش برآورد طیفی در آزمون PP، بارتلت کرنل و پهنای باند آن نوی-وست انتخاب شده است. علامت Δ ، به تفاضل و علائم **، *** و * نیز به ترتیب به معنای در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ اشاره دارد. منبع: یافته های تحقیق

منجر به کاهش کیفیت اکولوژیک می شود و در سایر چندک ها نمی تواند کیفیت اکولوژیک را پیش بینی کند. علاوه بر این، در تمام چندک ها ($th_{10} - th_{90}$)، وجود رابطه علی قوی در سطح احتمال ۱ درصد از $\ln URB$ به $\ln EF$ تأیید می شود. علامت این رابطه علیت، مثبت است که نشان می دهد شهرنشینی به افزایش EF در ایران کمک می کند و در نتیجه کیفیت اکولوژیک را کاهش می دهد. همچنین، یک رابطه علی منفی از $\ln REC$ به $\ln EF$ در تمام کوانتایل ها به جز کوانتایل انتهایی ($th_{10} - th_{70}$) مشاهده می شود که مؤید این موضوع است که مصرف انرژی تجدیدپذیر، EF را کاهش و در نتیجه کیفیت اکولوژیک را افزایش می دهد.

نتایج آزمون علیت کوانتایل فوریه در مورد تعیین کنندگان علی شاخص زیست محیطی رد پای اکولوژیک (EF) در جدول ۷ گزارش شده است. نتایج وجود رابطه علی از تولید ناخالص داخلی ($\ln GDP$) به $\ln EF$ را در سطوح احتمال ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب در چندک ابتدایی th_{10} و چندک بالایی th_{70} نشان می دهد. علاوه بر این، علامت این رابطه علیت مثبت است که نشان می دهد تولید ناخالص داخلی به تشدید EF در چندک های ذکر شده کمک می کند. نتایج آزمون علی در مورد رانت منابع طبیعی ($\ln NR$) نشان دهنده وجود رابطه علی مثبت از این متغیر به $\ln EF$ تنها در کوانتایل نخست (th_{10}) و در سطح احتمال ۱۰ درصد می باشد. این نتیجه گویای این موضوع است که رانت منابع طبیعی در چندک نخست

جدول ۴- نتایج آزمون BDS

درجه ۲۰	آماره BDS						
	$\ln REC$	$\ln URB$	$\ln NR$	$\ln GDP$	$\ln CO_2$	$\ln EF$	$\ln LCF$
۲	***۰/۰۹۱ (۰/۰۰۰)	***۰/۲۰۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۰۸۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۳۲ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۹۳ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۶۹ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۸۵ (۰/۰۰۰)
۳	***۰/۱۵۱ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۵۱ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۲۸ (۰/۰۰۰)	***۰/۲۱۹ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۲۵ (۰/۰۰۰)	***۰/۲۹۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۱۸ (۰/۰۰۰)
۴	***۰/۲۰۲ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۵۱ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۳۹ (۰/۰۰۰)	***۰/۲۷۳ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۱۳ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۸۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۱۱ (۰/۰۰۰)
۵	***۰/۲۳۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۵۲۴ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۳۴ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۰۵ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۷۲ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۴۷ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۷۵ (۰/۰۰۰)
۶	***۰/۲۳۸ (۰/۰۰۰)	***۰/۵۷۸ (۰/۰۰۰)	***۰/۱۲۳ (۰/۰۰۰)	***۰/۳۲۶ (۰/۰۰۰)	***۰/۵۱۴ (۰/۰۰۰)	***۰/۴۸۸ (۰/۰۰۰)	***۰/۵۲۱ (۰/۰۰۰)

منبع: یافته های تحقیق (علامت *** معناداری در سطح ۱ درصد است).

جدول ۵- نتایج آزمون F برای لحاظ تقریب فوریه

$\ln CO_2$	$\ln EF$	$\ln LCF$	مدل
۰/۹	۱/۴	۱/۸	فرکانس بهینه
۵	۳	۳	وقفه بهینه
***۱۰/۵۱۵	***۱۲/۶۱۶	***۱۸/۱۱۸	آماره F برای بسط فوریه
۶/۶۶۴	۸/۸۱۸	۱۱/۵۵۲	۱۰٪
۷/۸۲۶	۹/۹۹۱	۱۳/۲۱۸	۵٪
۸/۲۱۸	۱۱/۲۱۲	۱۶/۶۲۵	۱٪

منبع: یافته های تحقیق (علامت *** معناداری در سطح ۱ درصد است).

جدول ۶- نتایج آزمون علیت کوانتایل فوریه (شاخص کیفیت محیط زیست: LCF)

مقادیر بحرانی بوت استراپ در سطوح احتمال مختلف			آماره والد	کوانتایل	فرضیه صفر
۱۰ درصد	۵ درصد	۱ درصد			
۳۶/۸۱۹	۲۷/۴۱۲	۲۱/۵۱۵	(-)** ۲۷/۸۸۵	th۱۰	H₀:lnGDP ≠ lnLCF
۳۶/۱۰۹	۲۷/۶۶۹	۱۹/۸۱۸	(-)** ۳۷/۲۱۸	th۳۰	
۲۷/۹۱۲	۲۲/۱۱۳	۱۷/۴۹۲	(-)* ۲۱/۹۰۹	th۵۰	
۳۶/۰۰۹	۲۸/۲۰۸	۲۳/۵۱۷	۷/۵۵۱	th۷۰	
۵۸/۶۹۱	۴۱/۲۹۹	۳۶/۷۲۹	۲۲/۳۶۲	th۹۰	
۲۰/۴۹۴	۱۶/۴۴۵	۱۴/۱۱۵	۱۰/۱۱۸	th۱۰	H₀:lnNR ≠ lnLCF
۱۶/۷۱۸	۱۳/۱۰۸	۱۱/۹۴۵	۲/۵۲۳	th۳۰	
۱۷/۸۱۵	۱۳/۹۸۱	۱۲/۲۵۵	۲/۸۱۹	th۵۰	
۲۰/۰۷۷	۱۴/۸۱۲	۱۲/۸۱۶	۳/۴۱۸	th۷۰	
۲۵/۱۵۵	۱۹/۹۰۶	۱۷/۲۱۹	۶/۷۱۸	th۹۰	
۳۴/۹۷۵	۲۵/۶۱۸	۲۰/۴۱۶	(-)** ۴۱/۲۴۷	th۱۰	H₀:lnURB ≠ lnLCF
۲۹/۲۶۷	۲۰/۵۰۶	۱۷/۵۷۶	(-)** ۳۴/۱۰۳	th۳۰	
۲۹/۹۹۱	۲۱/۸۱۲	۱۷/۲۱۹	(-)** ۳۴/۰۷۹	th۵۰	
۳۴/۰۸۸	۲۳/۲۰۸	۱۹/۹۰۵	(-)** ۳۹/۶۵۸	th۷۰	
۲۱/۱۷۸	۱۵/۳۱۸	۱۲/۱۳۸	(-)** ۲۴/۷۹۸	th۹۰	
۱۰۵/۱۴۱	۸۲/۷۱۱	۶۴/۴۹۹	(+)** ۹۵/۳۹۲	th۱۰	H₀:lnREC ≠ lnLCF
۸۴/۴۱۴	۵۹/۳۹۷	۵۴/۶۰۵	(+)** ۸۷/۴۸۹	th۳۰	
۶۵/۷۸۹	۴۹/۸۱۸	۴۴/۰۳۱	(+)** ۶۸/۸۷۳	th۵۰	
۶۸/۶۱۴	۶۲/۰۸۸	۵۲/۸۹۱	(+)** ۶۹/۱۱۲	th۷۰	
۷۹/۷۴۸	۵۹/۷۵۴	۵۰/۲۱۹	(+)** ۸۰/۱۹۵	th۹۰	

منبع: یافته‌های تحقیق (علائم **، *، ***) و * به ترتیب به معنای در سطوح ۰.۱ و ۰.۵ و ۱۰ اشاره دارد و علائم (+) و (-) نیز به ترتیب نشان‌دهنده اثرگذاری مثبت و منفی متغیر است.

چندک‌ها نمی‌تواند انتشار CO₂ را پیش‌بینی کند. علاوه بر این، در تمام چندک‌ها (th_{۱۰}-th_{۹۰})، وجود رابطه علی قوی در سطح احتمال ۱ درصد از lnURB به lnCO₂ (همانند دو شاخص زیست‌محیطی LCF و EF) تأیید می‌شود. علامت این رابطه علیت، مثبت است که نشان می‌دهد شهرنشینی به افزایش CO₂ در ایران می‌انجامد و در نتیجه کیفیت محیطی را کاهش می‌دهد. همچنین، هیچ‌گونه رابطه علی معناداری از lnREC به lnCO₂ در تمام کوانتایل‌ها مشاهده نمی‌شود (برخلاف دو شاخص زیست‌محیطی LCF و EF) که مؤید این موضوع است که مصرف انرژی تجدیدپذیر نمی‌تواند میزان انتشار CO₂ را در کشور پیش‌بینی کند.

نتایج آزمون علیت کوانتایل فوریه در مورد تعیین‌کنندگان علی شاخص زیست‌محیطی انتشار کربن (CO₂) در جدول ۸ گزارش شده است. نتایج وجود رابطه علی قوی از تولید ناخالص داخلی (lnGDP) به lnCO₂ را در سطح احتمال ۱ درصد در تمام چندک‌ها (th_{۱۰}-th_{۹۰}) نشان می‌دهد. علاوه بر این، علامت این رابطه علیت مثبت است که نشان می‌دهد تولید ناخالص داخلی منجر به افزایش انتشار CO₂ در تمام چندک‌ها شده است. نتایج آزمون علی در مورد رانت منابع طبیعی (lnNR) نشان‌دهنده وجود رابطه علی مثبت از این متغیر به lnCO₂ تنها در کوانتایل پائینی دوم (th_{۳۰}) و در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد. این نتیجه گویای این موضوع است که رانت منابع طبیعی در چندک دوم منجر به افزایش انتشار CO₂ می‌شود و در سایر

جدول ۷- نتایج آزمون علیت کوانتایل فوری به (شاخص کیفیت محیط زیست: EF)

مقادیر بحرانی بوت استراپ در سطوح احتمال مختلف			آماره والد	کوانتایل	فرضیه صفر
۱۰ درصد	۵ درصد	۱ درصد			
۳۸/۱۱۵	۲۸/۹۰۱	۲۶/۲۵۴	(+)** ۳۷/۹۱۸	th۱۰	H₀:lnGDP ≠ lnEF
۲۴/۱۸۵	۱۷/۳۹۵	۱۴/۶۹۸	۱۱/۸۱۵	th۳۰	
۱۹/۲۸۶	۱۶/۵۲۵	۱۲/۱۹۵	۱۰/۴۱۸	th۵۰	
۲۶/۷۸۸	۲۱/۶۶۴	۱۶/۸۱۶	(+)* ۲۱/۰۱۱	th۷۰	
۳۴/۳۱۳	۲۵/۸۹۲	۱۸/۲۰۶	۱۵/۸۲۶	th۹۰	
۱۸/۵۱۵	۱۲/۹۱۹	۱۰/۷۱۷	(+)* ۱۰/۸۸۲	th۱۰	H₀:lnNR ≠ lnEF
۱۴/۴۲۷	۹/۲۱۵	۸/۸۶۸	۴/۷۱۷	th۳۰	
۱۴/۰۸۵	۸/۲۱۸	۷/۷۴۸	۱/۷۴۵	th۵۰	
۱۹/۱۸۸	۱۳/۰۸۸	۹/۲۱۸	۶/۸۱۸	th۷۰	
۲۲/۷۱۸	۱۵/۲۶۲	۱۲/۵۲۶	۱/۹۰۶	th۹۰	
۳۵/۸۱۸	۲۲/۳۱۷	۱۶/۱۴۸	(+)** ۴۵/۶۸۱	th۱۰	H₀:lnURB ≠ lnEF
۲۳/۴۴۸	۱۸/۷۱۲	۱۴/۱۹۷	(+)** ۲۸/۱۷۵	th۳۰	
۲۲/۲۸۹	۱۶/۶۸۹	۱۴/۰۶۶	(+)** ۲۶/۹۵۸	th۵۰	
۳۰/۲۸۸	۲۴/۹۰۲	۱۸/۶۵۱	(+)** ۳۵/۲۴۱	th۷۰	
۴۰/۶۲۱	۲۸/۸۴۸	۲۰/۱۲۵	(+)** ۴۴/۵۴۲	th۹۰	
۹۵/۲۸۸	۷۰/۲۱۲	۵۵/۲۱۸	(-)** ۹۲/۸۱۴	th۱۰	H₀:lnREC ≠ lnEF
۷۲/۲۱۹	۵۵/۴۱۴	۵۰/۳۸۱	(-)** ۷۲/۹۶۸	th۳۰	
۵۰/۳۲۸	۴۰/۲۹۸	۳۵/۴۱۴	(-)** ۴۸/۲۱۴	th۵۰	
۶۱/۱۹۸	۴۸/۷۷۵	۴۰/۴۱۴	(-)** ۴۸/۷۷۹	th۷۰	
۸۰/۰۸۸	۵۸/۴۱۴	۵۲/۵۱۵	۲۲/۲۱۸	th۹۰	

منبع: یافته های پژوهش (علائم **، * و * به ترتیب به معنای در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ اشاره دارد و علائم (+) و (-) نیز به ترتیب نشان دهنده اثرگذاری مثبت و منفی متغیر است).

جدول ۸- نتایج آزمون علیت کوانتایل فوریه (شاخص کیفیت محیط زیست: CO₂)

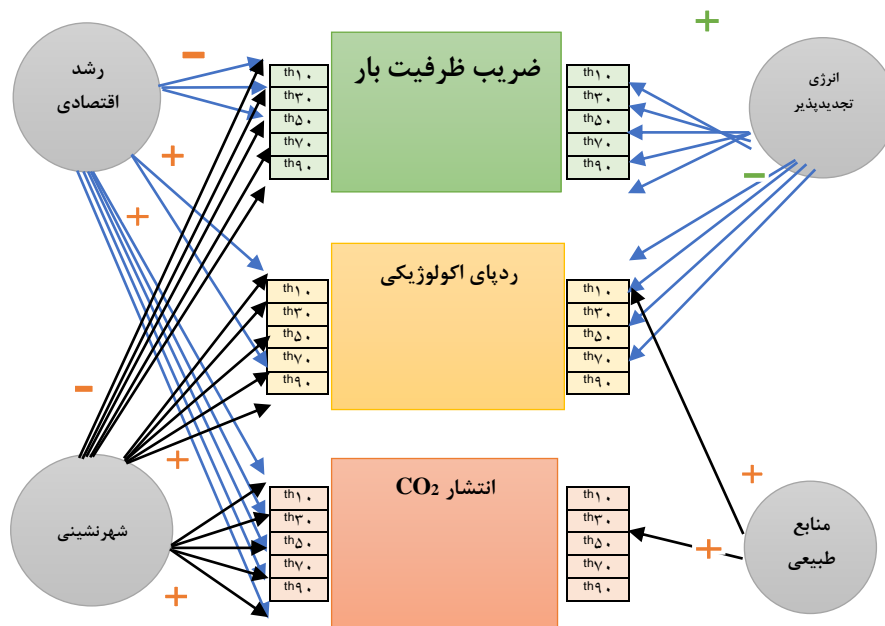
مقادیر بحرانی بوت استرپ در سطوح احتمال مختلف			آماره والد	کوانتایل	فرضیه صفر
۱ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد			
۲۲/۲۲۹	۱۸/۱۶۵	۱۲/۷۵۵	(+)** ۲۵/۶۸۱	th _{۱۰}	H₀:lnGDP ⇏ lnCO₂
۲۸/۱۷۶	۱۵/۸۱۹	۱۱/۷۱۲	(+)** ۳۶/۲۱۸	th _{۳۰}	
۱۷/۱۱۹	۱۵/۴۱۲	۱۴/۳۹۲	(+)** ۲۰/۳۴۵	th _{۵۰}	
۳۵/۹۱۱	۲۶/۱۴۹	۱۷/۲۴۸	(+)** ۴۲/۷۸۸	th _{۷۰}	
۲۲/۶۸۶	۲۱/۱۱۴	۱۵/۷۴۲	(+)** ۲۷/۱۰۷	th _{۹۰}	
۸/۰۸۳	۶/۸۸۲	۶/۵۹۶	۱/۱۹۵	th _{۱۰}	H₀:lnNR ⇏ lnCO₂
۷/۸۱۸	۷/۱۱۷	۶/۶۶۴	(+)** ۷/۷۹۵	th _{۳۰}	
۱۱/۲۷۹	۹/۳۱۷	۸/۵۳۵	۴/۸۶۲	th _{۵۰}	
۲۰/۲۸۸	۱۲/۲۴۶	۱۰/۹۱۲	۴/۶۱۶	th _{۷۰}	
۱۹/۹۱۲	۱۶/۶۸۶	۱۱/۴۰۸	۴/۵۸۲	th _{۹۰}	
۳۲/۳۱۳	۲۰/۵۱۷	۱۴/۲۵۵	(+)** ۳۹/۲۱۸	th _{۱۰}	H₀:lnURB ⇏ lnCO₂
۳۸/۹۱۹	۳۲/۸۱۶	۲۶/۷۲۵	(+)** ۴۵/۶۱۲	th _{۳۰}	
۳۷/۹۲۸	۳۰/۴۲۷	۲۰/۲۱۲	(+)** ۴۳/۷۱۷	th _{۵۰}	
۴۵/۳۱۸	۲۷/۳۶۹	۲۲/۸۲۵	(+)** ۵۶/۳۲۵	th _{۷۰}	
۷۱/۱۰۷	۴۳/۵۱۷	۳۸/۴۴۳	(+)** ۷۸/۳۱۳	th _{۹۰}	
۵۸/۹۱۹	۴۵/۸۲۸	۴۰/۲۱۲	۳۴/۱۵۵	th _{۱۰}	H₀:lnREC ⇏ lnCO₂
۶۸/۱۰۸	۵۰/۶۹۲	۳۵/۶۱۸	۳۰/۴۶۸	th _{۳۰}	
۷۵/۲۰۱	۵۵/۳۴۸	۴۲/۷۲۷	۳۵/۴۱۴	th _{۵۰}	
۶۲/۳۱۸	۵۸/۲۵۵	۴۴/۸۱۲	۴۱/۴۹۱	th _{۷۰}	
۵۵/۰۵۸	۴۶/۱۰۸	۴۰/۸۱۸	۳۸/۱۱۸	th _{۹۰}	

منبع: یافته‌های تحقیق (علائم ***)، ** و * به ترتیب به معنای در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ اشاره دارد و علائم (+) و (-) نیز به ترتیب نشان‌دهنده اثرگذاری مثبت و منفی متغیر است.

در کوانتایل (BFGC-Q) طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۷۰ بررسی شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به‌طور فشرده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بسته به شاخص زیست‌محیطی مورد بررسی، اثرات رشد اقتصادی، وابستگی به منابع طبیعی، شهرنشینی و مصرف انرژی تجدیدپذیر بر کیفیت محیطی تا حدودی متفاوت است. در قیاس شاخص‌های زیست‌محیطی، LCF نتیجه‌گیری‌های قدرتمندتری ارائه می‌دهد؛ زیرا جنبه‌های عرضه و تقاضای محیط را در نظر می‌گیرد.

بحث

هدف اصلی این مطالعه بررسی تعیین‌کنندگان علی شاخص‌های زیست‌محیطی در ایران با استفاده از دو شاخص سنتی انتشار CO₂ و ردپای اکولوژیک (EF) و همچنین شاخص جدید پایداری محیط‌زیست به نام ضریب ظرفیت بار (LCF) است که به‌طور هم‌زمان عرضه و تقاضای طبیعت را در نظر می‌گیرد. بر این اساس تأثیر رشد اقتصادی، منابع طبیعی، شهرنشینی و انرژی تجدیدپذیر بر شاخص‌های تخریب محیط‌زیست در ایران با به‌کارگیری رویکرد نوین علیت گرنجری فوریه بوت‌استرپ



شکل ۳- خلاصه نتایج تعیین کنندگان علی شاخص های زیست محیطی در ایران

منبع: یافته های تحقیق (علامت \rightarrow نشان دهنده وجود رابطه علی از متغیر مستقل به شاخص زیست محیطی در کوانتایل مورد بررسی است).

این نتیجه همسو با نتایج مطالعات Pata و Samour (۲۰۲۲)، Jin و Huang (۲۰۲۳)، و همکاران (۲۰۲۳) و Villanthenkodath و Pal (۲۰۲۴) می باشد. نتایج آزمون علی در مورد رانت منابع طبیعی نشان دهنده وجود رابطه علی مثبت از این متغیر به EF تنها در کوانتایل نخست (th_{10}) و CO_2 تنها در کوانتایل پائینی دوم (th_{30}) می باشد. این در حالیست که عدم وجود رابطه علی از این متغیر به LCF در تمام کوانتایل ها نتیجه گیری می شود. در این راستا نتایج برخی از مطالعات تجربی نشان می دهد که رابطه بین وفور منابع طبیعی و کیفیت محیط زیست به شاخص زیست محیطی استفاده شده در مطالعه بستگی دارد (Ulucak et al., 2020; Aladejare, 2022; Amer et al., 2024b; Erdogan, 2024). به طور کلی نتایج این پژوهش از فرضیه خنثی و عدم وجود رابطه علی از رانت منابع طبیعی به شاخص های زیست محیطی در ایران حمایت می کند. نتایج نشان می دهد که مصرف انرژی تجدیدپذیر در تمام کوانتایل ها (th_{10} - th_{90}) به افزایش LCF و در کوانتایل های th_{10} - th_{70} به کاهش EF می انجامد. این در حالیست که این متغیر در هیچ یک از کوانتایل ها رابطه علی معناداری با انتشار CO_2 نداشته است. بنابراین می توان گفت که افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش ردپای اکولوژیک و پیشی گرفتن ظرفیت زیستی از آن در ایران شده است؛ اما اثر خنثی بر

نتایج حاصل از برآورد سه مدل نشان می دهد که شهرنشینی در تمام کوانتایل ها (th_{10} - th_{90}) و در سطح معناداری بالایی به افزایش انتشار CO_2 و کاهش LCF می انجامد. بر این اساس می توان گفت که شهرنشینی از مهم ترین عللی است که وخامت اکولوژیک را در ایران تشدید می کند؛ چرا که ساختار زندگی شهرنشینی نیازمند استفاده بیشتر از منابع انرژی و سوخت، بالاخص در زمینه حمل و نقل و جابه جایی است. مطالعات Fang و همکاران (۲۰۲۴)، Fotros و همکاران (۲۰۱۲) و Sayehmiri و Nazari (۲۰۲۰) در رابطه بین شهرنشینی و شاخص های زوال زیست محیطی نتایج مشابهی را گزارش کرده اند. در مقابل، در این زمینه نتایج مطالعه Zheng و همکاران (۲۰۲۳) مغایر است. بر اساس نتایج، تولید ناخالص داخلی در چندک های پایین و متوسط (th_{10} ، th_{30} و th_{50}) یک رابطه علی منفی با LCF و در چندک ابتدایی th_{10} و چندک بالایی th_{70} یک رابطه علی مثبت با EF نشان می دهد. علاوه بر این، تولید ناخالص داخلی در تمام کوانتایل ها (th_{10} - th_{90}) منجر به افزایش انتشار CO_2 شده است که نشان می دهد مسیرهای رشد و توسعه در ایران با کربن فشرده تر دنبال می شود. در واقع، وابستگی رشد اقتصادی به منابع انرژی (نفت و گاز) و مصرف سوخت های فسیلی منجر به تخریب محیط زیست و بالاخص انتشار CO_2 در کشور شده است.

با محیط‌زیست اختصاص دهند. تحت چنین وضعیتی می‌توان انتظار داشت که منابع طبیعی اثر مثبتی بر کیفیت محیط‌زیست در کشور بر جای گذارد.

- بایستی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را با استفاده از فرآیندهای نوآوری در بخش انرژی به‌طور قابل توجهی افزایش داد تا موجبات کاهش انتشار CO₂ در کشور فراهم شود.

منابع

1. **Aladejare, S.A., 2022.** Natural resource rents, globalization and environmental degradation: New insight from 5 richest African economies. *Resources Policy*, 78(C). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102909>
2. **Amer, E., Meyad, E.M., Meyad, A.M. and Mohsin, A.K.M., 2024a.** Impacts of renewable and disaggregated non-renewable energy consumption on CO₂ emissions in GCC countries: A STIRPAT model analysis. *Heliyon*, 10(14). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30154
3. **Amer, E., Meyad, E.M.A., Meyad, A.M. and Mohsin, A.K.M., 2024b.** The impact of natural resources on environmental degradation: a review of ecological footprint and CO₂ emissions as indicators. *Frontiers in Environmental Science*, 12. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1368125
4. **Becker, R., Enders, W. and Lee, J., 2006.** A Stationarity Test in the Presence of an Unknown Number of Smooth Breaks. *Journal of Time Series Analysis*. 27(3), 381-409. doi:10.1111/j.1467-9892.2006.00478.x
5. **Cheng, K., Hsueh, H-P., Ranjbar, O., Wang, M-C. and Chang, T., 2021.** Urbanization, coal consumption, and CO₂ emissions nexus in China using bootstrap Fourier Granger causality test in quantiles. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 14(1), 31-49. doi:10.1007/s12076-020-00263-0
6. **Daliri, H., 2020.** Relationship between ecological footprint and economic growth in D8 countries: Testing the Kuznets Environmental Hypothesis using PSTR model. *The Journal of Economic Modeling Research*, 11(39), 81-112. (In Persian with English Abstract).
7. **Danish, B.M.A., Mahmood, N. and Zhang, J.W., 2019.** Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO₂ emissions in BRICS countries. *Science of the Total Environment*, 678, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.02>
8. **Dogan, A. and Pata, U.K., 2022.** The role of ICT, R&D spending and renewable energy consumption on environmental quality: testing the LCC hypothesis for G7 countries. *Journal of Cleaner Production*. 380, 135038

انتشار CO₂ دارد. استفاده و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر مزایایی مانند نامحدود بودن، پاک و تمیز بودن، تجدیدپذیر بودن، مقرون به صرفه بودن و در نهایت کاهش تخریب محیط زیست را به‌همراه دارد. به نظر می‌رسد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌دلیل عدم استفاده بهینه و کارآ در بخش‌های تولیدکننده کربن نتوانسته به کاهش انتشار CO₂ در کشور کمک کند. نتیجه‌ای که هم‌سو با نتایج مطالعه Pata و Pata (۲۰۲۴) می‌باشد. در واقع به‌دلیل عدم توسعه‌یافتگی نهادهای مالی و ضعف آن‌ها در تأمین مالی پروژه‌های انرژی پاک، استقبال چندانی برای سرمایه‌گذاری‌ها در این پروژه‌ها صورت نگرفته تا بتواند موجبات کاهش آلودگی هوا را فراهم کند. نتایج مطالعات متعددی نظیر Zheng و همکاران (۲۰۲۳)، Villanthenkodath و Pal (۲۰۲۴)، Fang و همکاران (۲۰۲۴) و Pata و همکاران (۲۰۲۴) حاکی از اثر مثبت انرژی‌های تجدیدپذیر بر شاخص‌های کیفیت زیست‌محیطی است. بر اساس نتایج اصلی این تحقیق پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود:

- سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری در فرایند گسترش شهرنشینی لازم است جلوگیری از تخریب محیط‌زیست را مورد توجه قرار داده و مصرف صحیح انرژی را در اولویت قرار دهند. همچنین می‌توانند با فراهم کردن بسترهای مناسب و توسعه روستاها ضمن برقراری یک توازن جمعیتی مناسب، از تخریب زیست‌محیطی نیز بکاهند.
- از آن‌جا که دستیابی به رشد اقتصادی، از اهداف اصلی کشورها بالاخص کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران است، باید تلاش شود تا رشد اقتصادی بالاتر که مستلزم استفاده از انرژی بیشتر به‌عنوان یکی از عوامل تولید است، با ایجاد و تقویت انرژی‌های پاک و همچنین به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته کارا و سازگار با محیط‌زیست در فرایند تولید صورت بگیرد.
- سیاست‌گذاران کشور بایستی بخشی از درآمدهای حاصل از فروش منابع طبیعی بالاخص درآمدهای نفت و گاز را با ایجاد صندوق‌های سبز به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های مناسب و سازگار

- Asymmetric Thresholds NARDL (MATNARDL) Approach. *Economic Policies and Research*, 2(3), 114-148. (In Persian with English Abstract). doi: [10.22034/jep.2024.140960.1104](https://doi.org/10.22034/jep.2024.140960.1104)
20. **Granger, C.W.J., 1969.** Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424-438. doi: [10.2307/1912791](https://doi.org/10.2307/1912791)
 21. **Grossman, G.M. and Krueger, A.B., 1991.** Environmental impacts of a North American free trade agreement NBER.
 22. **Hatemi-J, A. and Uddin, G.S., 2012.** Is the casual nexus of energy utilization and economic growth asymmetric in the US? *Economic Systems*, 36, 461-469. <https://doi.org/10.1016/j.ecosys.2011.10.005>
 23. **Hosseini, A., Mohammadi, H., Ahmadpour, M. and Dehbashi, V., 2024.** Investigating the short-term and long-term effects of factors affecting the quality of the environment in Iran. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(3), 9138-9127. (In Persian with English Abstract). doi: [10.22034/jess.2023.381282.1955](https://doi.org/10.22034/jess.2023.381282.1955)
 24. **Jin, G. and Huang, Z., 2023.** Asymmetric impact of renewable electricity consumption and industrialization on environmental sustainability: Evidence through the lens of load capacity factor. *Renewable Energy*, 212, 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.045>
 25. **Kazerouni, A., Asgharpour, H., Aghamohamadi, A. and Zokaei alamdari, E., 2019.** Corruption and the environmental Kuznets Curve in developed and developing countries. *The Journal of Economic Modeling Research*, 10(37), 7-38. (In Persian with English Abstract).
 26. **Khan, K., Zhang, J., Gul, F. and Li, T., 2022.** The “carbon curse”: Understanding the relationship between resource abundance and emissions. *The Extractive Industries and Society*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101119>
 27. **Molaei, M., Besharat, E. and Mohammadi, M., 2020.** Factors affecting the consumption of ecological resources in Iran using economic approach. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 377-388. (In Persian with English Abstract). DOI: [10.22034/jest.2021.23758.3286](https://doi.org/10.22034/jest.2021.23758.3286)
 28. **Nazlioglu, S., Gormus, A. and Soytaş, U., 2019.** Oil Prices and Monetary Policy in Emerging Markets: Structural Shifts in Causal Linkages. *Emerging Markets Finance and Trade*, 55(1), 105–117. doi: [10.1080/1540496x.2018.1434072](https://doi.org/10.1080/1540496x.2018.1434072)
 29. **Nazlioglu, S., Gormus, N.A. and Soytaş, U., 2016.** Oil prices and real estate investment trusts (REITs): Gradual-shift causality and volatility transmission analysis. *Energy Economics*, 60, 168-175. doi: [10.1016/j.eneco.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.09.009)
 30. **Pahlavani, M., Dahbashi, M. and Moradi, E., 2014.** The Effect of Trade Expansion and Economic Growth on Environmental Quality in Iran. *Journal of Economic Research (Tahghighat-E- Eghtesadi)*, 49(3), 463-482. (In Persian with English Abstract). doi: [10.22059/jte.2014.52438](https://doi.org/10.22059/jte.2014.52438)
 9. **Du, J., Yang, X., Long, D. and Xin, Y., 2024.** Modelling the influence of natural resources and social globalization on load capacity factor: New insights from the ASEAN countries, *Resources Policy*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104816>
 10. **Enders, W. and Jones, P., 2016.** Grain Prices, Oil Prices, and Multiple Smooth Breaks in a VAR. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 20(4), 399-419. doi: [10.1515/snde-2014-0101](https://doi.org/10.1515/snde-2014-0101)
 11. **Erdogan, S., 2022.** Linking natural resources and environmental sustainability: A panel data approach based on the load capacity curve hypothesis. *Sustainable Development*, 1-13. <https://doi.org/10.1002/sd.2836>
 12. **Erdogan, S., 2024.** On the impact of natural resources on environmental sustainability in African countries: A comparative approach based on the EKC and LCC hypotheses. *Resources Policy*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104492>
 13. **Fang, Z., Wang, T. and Yang, C., 2024.** Nexus among natural resources, environmental sustainability, and political risk: Testing the load capacity factor curve hypothesis, *Resources Policy*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104791>
 14. **Faisal, F., Pervaiz, R., Ozatac, N. and Tursoy, T., 2021.** Exploring the relationship between carbon dioxide emissions, urbanization, and financial deepening for Turkey using the symmetric and asymmetric causality approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 17374-17402. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01385-1>
 15. **Fareed, Z., Salem, S., Adebayo, T.S., Pata, U.K. and Shahzad, F., 2021.** Role of Export Diversification and Renewable Energy on the Load Capacity Factor in Indonesia: A Fourier Quantile Causality Approach. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.770152>
 16. **Feng, Q., Usman, M., Saqib, N. and Mentel, U., 2024.** Modelling the contribution of green technologies, renewable energy, economic complexity, and human capital in environmental sustainability: Evidence from BRICS countries. *Gondwana Research*, 132, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.04.010>
 17. **Fotros, M.H., Ferdousi, M. and Mehrpeyma, H., 2012.** An Examination of Energy Intensity and Urbanization Effect on Environmental Degradation in Iran (A Cointegration Analysis). *Journal of Environmental Studies*, 37(60), 13-22. (In Persian with English Abstract).
 18. **Gallant, A.R., 1981.** On the bias in flexible functional forms and an essentially unbiased form: the Fourier flexible form. *Journal of Econometrics*, 15, 211-245. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(81\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0304-4076(81)90115-9)
 19. **Golkhandan, A., 2023.** Impact of Political Risk on Ecological Footprint in Iran: Multiple

- Numerical Simulation, 15(10), 3182-3192.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.10.027>
41. Sun, A., Bao, K., Aslam, M., Gu, X., Khan, Z. and Uktamofv, K.F., 2023. Testing load capacity and environmental Kuznets curve hypothesis for China: Evidence from novel dynamic autoregressive distributed lags model. *Gondwana Research*. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.07.018>
 42. Tarazkar, M.H., Kargar Dehbidi, N. and Bakhshoodeh, M., 2018. The Effects of Economic Development and Urbanization on Pollution Emissions in Iran. *Agricultural Economics Research*, 10(38), 155-174. (In Persian with English Abstract).
 43. Toda, H.Y. and Yamamoto, T., 1995. Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes. *Journal of Econometrics*, 66(1-2), 225-250.
[doi:10.1016/0304-4076\(94\)01616-8](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01616-8)
 44. Uche, E. and Ngepah, N., 2024. How green-technology, energy-transition, and resource rents influence load capacity factor in South Africa. *International Journal of Sustainable Energy*, 43. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2281038>
 45. Ulucak, R., Danish, and Ozcan, B., 2020. Relationship between energy consumption and environmental sustainability in OECD countries: The role of natural resources rents. *Resources Policy*, 69, 101803.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101803>
 46. Uzar, U., 2024. The dynamic effect of income distribution, natural resources, and freedom of press on ecological footprint: Theory and empirical evidence for emerging economies. *Resources Policy*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104682>
 47. Villanthenkodath, M.A. and Pal, S., 2024. Environmental degradation in geopolitical risk and uncertainty contexts for India: A comparison of ecological footprint, CO₂ emissions, and load capacity factor, *Energy and Climate Change*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100122>
 48. Wang, W., Niu, Y., Gapich, A. and Strielkowski, W., 2023. Natural resources extractions and carbon neutrality: The role of geopolitical risk. *Resources Policy*, 83.
 49. Zheng, S., Irfan, M., Ai, F. and Al-Faryan, M.A.S., 2023. Do renewable energy, urbanization, and natural resources enhance environmental quality in China? Evidence from novel bootstrap Fourier Granger causality in quantiles, *Resources Policy*, 81.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103354>
 31. Pata, U.K. and Ertugrul, H.M., 2023. Do the Kyoto Protocol, geopolitical risks, human capital and natural resources affect the sustainability limit? A new environmental approach based on the LCC hypothesis. *Resources Policy*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103352>
 32. Pata, U.K. and Isik, C., 2021. Determinants of the load capacity factor in China: A novel dynamic ARDL approach for ecological footprint accounting. *Resources Policy*, 74(C). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102313>
 33. Pata, U.K. and Pata, S.K., 2024. Determining the effectiveness of the forest load capacity factor in assisting decarbonization in India. *Forest Policy and Economics*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103281>
 34. Pata, U.K. and Samour, A., 2022. Do renewable and nuclear energy enhance environmental quality in France? A new EKC approach with the load capacity factor. *Progress in Nuclear Energy*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104249>
 35. Pata, U.K. and Tanriover, B., 2023. Is the load capacity curve hypothesis Valid for the top ten tourism destinations? *Sustainability*, 15(2), 960. <https://doi.org/10.3390/su15020960>
 36. Pata, U.K., Wang, Q., Kartal, M.T. and Sharif, A., 2024. The role of disaggregated renewable energy consumption on income and load capacity factor: A novel inclusive sustainable growth approach. *Geoscience Frontiers*, 15(1). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101693>
 37. Roozitalab, A. and Hoseinpour, A., 2018. Exploring the causal relationship between effective environmental pollution factors in Iran from 1977 to 2015. *Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies*, 5(20), 20-40. (In Persian with English Abstract).
 38. Sarkodie, S.A., Adams, S. and Leirvik, T., 2020. Foreign direct investment and renewable energy in climate change mitigation: Does governance matter? *Journal of Cleaner Production*, 263(1).
[DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121262](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121262)
 39. Sayehmiri, A. and Nazari, R., 2020. The impact of urbanization on environmental degradation in developing and developed countries, *Journal of Environmental Science Studies*, 5(1), 2244-2250. (In Persian with English Abstract).
 40. Siche, R., Pereira, L., Agostinho, F. and Ortega, E., 2010. Convergence of ecological footprint and energy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as a case study. *Communications in Nonlinear Science and*





Investigating the Causal Factors Determining Environmental Quality Indicators in Iran Using the New Approach of Bootstrap Fourier Granger Causality in Quantile (BFGC-Q)

Sahebe Mohamadian Mansour^{*1}, Abolghasem Golkhandan²

1* - Department of Economic, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Department of Economic, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Lorestan University, Khoram Abad, Iran

Original Article

Received:
2024.07.13

Accepted:
2025.03.12

Keywords:

Environmental Quality Indicators, Load Capacity Factor, Granger Causality, Fourier Expansion, Quantile Regression

Abstract

Introduction: According to the statistics published by the Global Footprint Network, Iran's ecological deficit, which was 0.55 per capita global hectare in 1961, has increased by 554% to 2.50 per capita global hectare in 2022; which shows that the existing supply of natural resources in Iran is not enough to maintain the current production and consumption patterns. Based on this, the analysis of the determining factors of environmental quality indicators in Iran can provide valuable suggestions in the field of designing appropriate environmental policies. In this regard, the main goal of this study is to examine the causal determinants of environmental indicators in Iran.

Materials and Methods: The present descriptive-analytical and applied study uses time series data from 1970-2022 to examine the causal determinants of environmental indicators in Iran using two traditional indicators of CO₂ emission and ecological footprint (EF) and also the new index of load capacity factor (LCF) which simultaneously considers the supply and demand of nature. Based on this, the causal effect of economic growth, natural resources dependency, urbanization, and renewable energy consumption on environmental quality indicators has been investigated by applying the new approach of Bootstrap Fourier Granger Causality in Quantile (BFGC-Q) during the years 1970-2022. Unlike previous Grangerian causality tests, this approach considers the issue of non-linearity and structural breaks and can provide useful information about a causal-tail relationship.

Results: The results show that urbanization in all quantiles (10th-90th) leads to an increase in CO₂ emissions and EF and a decrease in LCF. GDP per capita in the low and middle quantiles (10th-50th) shows a negative causal relationship with LCF and a positive causal relationship with EF in the initial 10th and upper 70th quantiles. Furthermore, GDP per capita in all quantiles (10th-90th) has increased CO₂ emissions. Regarding the rent of natural resources, in general, the results of this research support the neutral hypothesis and the absence of a causal relationship. Renewable energy consumption also leads to an increase in LCF in all quantiles (10th-90th) and a decrease in EF in 10th-70th quantiles. While this variable did not have a significant causal relationship with CO₂ emissions in any of the quantiles.

Discussion: The results show that depending on the investigated environmental index, the effects of economic growth, dependence on natural resources, urbanization, and renewable energy consumption on ecological quality are

somewhat different. Based on the results, urbanization has led to the destruction of the country's environment. Therefore, policymakers and urban planners in the process of expanding urbanization must pay attention to the prevention of environmental destruction and prioritize the correct energy consumption. The positive causal effect of GDP per capita in all quantiles on CO₂ emissions shows that growth and development paths in Iran are more carbon-intensive. Therefore, efforts should be made to achieve higher economic growth, which requires the use of more energy as one of the most important production factors, by creating and strengthening clean energy and also using technologies to be advanced, efficient, and environmentally friendly in the production process. Considering the positive effect of renewable energy consumption on the LCF index and its negative effect on EF, it can be said that the increase in renewable energy consumption has reduced the ecological footprint and surpassed its biological capacity in Iran; Based on this, increasing the share of renewable energy can help improve the quality of the environment in the country.