

بررسی ابعاد اقتصادی انرژی هسته‌ای در انتقال انرژی کشورهای در حال توسعه منتخب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

کد مقاله: ۸۸۵۲۲

اعظم شیری^{۱*}، اسما شیری^۲

چکیده

انرژی هسته‌ای در طول انتقال انرژی در سال‌های اخیر مورد توجه مجدد قرار گرفته است. این مطالعه با هدف بررسی اینکه آیا انرژی هسته‌ای می‌تواند انتشار کربن افزایش دهد یا خیر، انجام شده است. به منظور درک جامع‌تری از رابطه بین انرژی هسته‌ای و انتشار دی‌اکسید کربن، این مطالعه همچنین تأثیر زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و انرژی‌های تجدیدپذیر بر انتشار دی‌اکسید کربن کشورهای در حال توسعه منتخب برای دوره زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۱ مورد بحث قرار می‌دهد. در این تحقیق برای ارزیابی تأثیر انرژی هسته‌ای بر انتشار دی‌اکسید کربن از روش خودرگرسیون برداری پانل در نرم افزار Eviews استفاده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد هم انرژی هسته‌ای و هم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهند، همچنین افزایش مصرف زغال سنگ باعث افزایش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. علاوه بر این، انرژی هسته‌ای تأثیر بهتری در مهار انتشار دی‌اکسید کربن در برخی کشورها نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. بنابراین، با فرض ایمنی، انرژی هسته‌ای باید به طور جدی مورد توجه قرار گیرد و دوباره توسعه یابد.

واژگان کلیدی: انتشار دی‌اکسید کربن، انرژی هسته‌ای، انرژی تجدیدپذیر.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه امام جواد(ع) یزد، دانشکده فنی مهندسی، یزد، ایران، (نویسنده مسئول)
Azamshiri40@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده اقتصاد و علوم اجتماعی، همدان، ایران

۱- مقدمه

کاربرد روزافزون انرژی و تأمین آن برای ادامه حیات یکی از مظاهر مهم زندگی جدید است. پایان پذیری انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی به ویژه نفت خام، جهان امروز را نیازمند استفاده از منابع دیگر برای جایگزینی آن می‌نماید. اگر در گذشته بحران غذا و یا بحران آب آشامیدنی حیات بشر را به خطر می‌انداخت، امروزه کارشناسان بر این اعتقادند که بحران آینده که حیات بشریت را تهدید می‌کند، بحران انرژی است. حیات بشر امروزی به طور مستقیم و غیرمستقیم به منابع مختلف انرژی مانند نفت، گاز، زغال سنگ و... وابسته است و تصور زندگی بدون دسترسی به این منابع، دشوار و حتی غیرممکن است. از طرفی، گذشت سریع زمان، این زنگ خطر را بلندتر و واضح‌تر به گوش می‌رساند که منابع انرژی تجدیدناپذیر در حال پایان است، بنابراین ضرورت کشف و استفاده از منابع انرژی جدید بیش از پیش اهمیت می‌یابد. انرژی هسته‌ای از جمله مطمئن‌ترین و پاک‌ترین انرژی‌هایی است که می‌تواند کمبود و حتی خلاء انرژی‌های فسیلی را جبران کند (واگنر^۱، ۲۰۱۸). امروزه کشورهای بسیاری سهم قابل توجهی از برق مورد نیاز خود را از انرژی هسته‌ای تأمین می‌نمایند. بدون شک در توجیه ضرورت ایجاد تنوع در سیستم عرضه انرژی کشورهای مذکور، انرژی هسته‌ای به عنوان یک گزینه مطمئن اقتصادی مطرح است. بنابراین ابعاد اقتصادی جایگزینی نیروگاه‌های هسته‌ای با توجه به تحلیل هزینه تولید برق در سیستم‌های مختلف نیرو قابل تأمل و بررسی است. از اینرو در اغلب کشورها، نیروگاه‌های هسته‌ای با عملکرد مناسب اقتصادی خود با نیروگاه‌های سوخت فسیلی قابل رقابت می‌باشند. بدون تردید انرژی هسته‌ای یکی از حامل‌های قابل دسترس و مطمئن انرژی جهان در هزاره سوم میلادی بشمار می‌رود (وانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

از طرف دیگر افزایش روند روزافزون مصرف سوخت‌های فسیلی طی دو دهه اخیر و ایجاد انواع آلاینده‌های خطرناک و سمی و انتشار آن در محیط زیست انسان، نگرانی‌های جدی و مهمی برای بشر در حال و آینده به دنبال دارد. بدیهی است که این روند به دلیل اثرات مخرب و مرگبار آن در آینده تداوم چندانی نخواهد داشت. از اینرو به جهت افزایش خطرات و نگرانی‌های تدریجی در مورد اثرات مخرب انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کاربرد فرآیند انرژی‌های فسیلی، واضح است که از کاربرد انرژی هسته‌ای به عنوان یکی از رهیافت‌های زیست محیطی برای مقابله با افزایش دمای کره زمین و کاهش آلودگی محیط زیست یاد می‌شود (سواکول و همکاران^۳، ۲۰۲۰). در صورت رفع موانع و مسائل سیاسی مربوط به گسترش انرژی هسته‌ای در جهان بویژه در کشورهای در حال توسعه و جهان سوم، انرژی در دهه‌های آینده نقش مهمی در کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا خواهد نمود. در حالیکه آلودگی‌های ناشی از نیروگاه‌های فسیلی سبب وقوع حوادث و مشکلات بسیار زیاد بر محیط زیست و انسان‌ها می‌شود (فل و همکاران^۴، ۲۰۲۱). سوخت هسته‌ای گازهای سمی و مضر تولید نمی‌کند و مشکل زباله‌های اتمی نیز تا حد قابل قبولی رفع شده است، چرا که در مورد مسائل پسمانداری با توجه به کم بودن حجم زباله‌های هسته‌ای و پیشرفت‌های علوم هسته‌ای بدست آمده در این زمینه در دفن نهایی این زباله‌ها در صخره‌های عمیق زیرزمینی با توجه به حفاظت زباله‌های هسته‌ای و پیشرفت‌های علوم هسته‌ای بدست آمده در این زمینه در دفن نهایی این زباله‌ها در صخره‌های عمیق زیرزمینی با توجه به حفاظت و استتار ایمنی کامل، مشکلات موجود تا حدود زیادی از نظر فنی حل شده است و طبیعتاً در مورد کشورهای در حال توسعه نیز تا زمان لازم برای دفع نهایی پسمان‌های هسته‌ای، مسائل احتمالی باقیمانده از نظر تکنولوژیکی کاملاً مرتفع خواهد شد (بوی و همکاران^۵، ۲۰۱۸).

به هر حال باید اذعان نمود که نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند و ایجاد هر یک متناسب با مقتضیات زمانی و مکانی هر کشور خواهد بود و انتخاب نهایی و تصمیم‌گیری در این زمینه می‌بایست با توجه به فاکتورهایی از قبیل عوامل تکنولوژیکی، ارزشی، اقتصادی و زیست محیطی توأمأ اتخاذ گردد. قدر مسلم ایجاد تنوع در سیستم عرضه و تأمین انرژی از استراتژی‌های بسیار مهم در زمینه توسعه سیستم پایدار انرژی در هر کشور محسوب می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- مطالعات خارجی

وانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۳) به بررسی اینکه آیا انرژی هسته‌ای می‌تواند رشد اقتصادی را بدون افزایش انتشار کربن افزایش دهد یا خیر، پرداختند. به منظور درک جامع تری از رابطه بین انرژی هسته‌ای، رشد اقتصادی و انتشار کربن، این مطالعه همچنین تاثیر

1 Wagner
2 Wang et al
3 Sovacool et al
4 Fell et al
5 Bui et al
6 Wang et al

زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و انرژی های تجدید پذیر بر رشد اقتصادی و انتشار کربن را مورد بررسی قرار دادند. آزمون ریشه واحد پانل، آزمون هم انباشتگی پانل، حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده با پانل و آزمون علیت ناهمگن دومیترسکو و هورلین برای تخمین کشش و علیت بلندمدت بین متغیرها استفاده شد. نتایج بر اساس داده های تابلویی از ۲۴ کشور دارای انرژی هسته‌ای از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان داد که هم انرژی هسته‌ای و هم انرژی های تجدید پذیر می توانند انتشار کربن را کاهش دهند. به ویژه در کانادا، فنلاند، روسیه، اسلوانی، کره جنوبی و بریتانیا، انرژی هسته‌ای انتشار کربن را به میزان قابل توجهی نسبت به انرژی های تجدیدپذیر کاهش می دهد.

اولوچاک و اردوغان^۱ (۲۰۲۲) با استفاده از آخرین مجموعه داده‌های موجود، اثرات انرژی هسته‌ای را بر انتشار دی‌اکسید کربن مبتنی بر تولید و مصرف در عصر جهانی شدن برای کشورهای سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD) را بررسی کردند. روش رگرسیون Driscoll-Kraay نشان می‌دهد که انرژی هسته‌ای برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن مبتنی بر تولید مفید است. با این حال، مشخص شده است که انرژی هسته‌ای انتشار دی‌اکسید کربن مبتنی بر مصرف را که در سطح بین‌المللی معامله می‌شود کاهش نمی‌دهد و از این رو در موجودی‌های تولید گازهای گلخانه‌ای متعارف (قلمرو) شامل نمی‌شود. جهانی شدن تمایل به کاهش انتشار کربن بر اساس تولید و تقاضا دارد. در نهایت، منحنی کوزنتس زیست محیطی (EKC) برای هر دو نوع انتشار دی‌اکسید کربن تایید شده است.

مجید و همکاران^۲ (۲۰۲۲) اثرات نامتقارن انرژی هسته‌ای بر انتشار کربن را برای پاکستان از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۹ بررسی کردند. آزمایش‌های ریشه واحد دیکی-فولر نشان داد که متغیرها از آزمون مرتبه یک و کران وقفه توزیع شده خودرگرسیون ادغام شده‌اند. نتایج الگو خود توضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL)، حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده و حداقل مربعات معمولی پویا نشان می‌دهد که ضریب انرژی هسته‌ای تأثیر منفی و قابل توجهی بر انتشار در کوتاه مدت و بلند مدت دارد. علاوه بر این، یافته‌های الگو خودتوضیح با وقفه‌های گسترده غیرخطی (NARDL) نشان می‌دهد که یک ارتباط بلندمدت نامتقارن بین انرژی هسته‌ای و انتشار دی اکسید کربن وجود دارد. نتایج روش تصحیح خطای برداری نشان می‌دهد که یک رابطه علی دو طرفه بین انرژی هسته‌ای و انتشار کربن در کوتاه‌مدت و بلندمدت وجود دارد. علاوه بر این، تأثیر انرژی هسته‌ای بر ردپای اکولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

اعظم و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به تعیین اثر مصرف گاز طبیعی، انرژی تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای بر رشد اقتصادی و انتشار دی اکسید کربن در ده کشور دارای بالاترین انتشار دی اکسید کربن در یک زمینه چند متغیره برای مدت زمان ۱۹۹۰-۲۰۱۴ پرداختند. در این پژوهش آزمون ادغام پانل، حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده با پانل و ارزیابی علیت دومیترسکو و هورلین ناهمگون پانل برای تجزیه و تحلیل تخمین کشش بلندمدت همراه با سیر علیت در بین متغیرها مورد استفاده قرار گرفته است. یافته‌های آزمون کشش و علیت بلندمدت نشان می‌دهد که گاز طبیعی مانند انرژی هسته‌ای و انرژی تجدیدپذیر به رشد اقتصادی و کاهش دی اکسید کربن کمک نمی‌کند. با این حال، به جز گاز طبیعی، گسترش و بهبود انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای برای جلوگیری از گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی و همچنین ارتقای رشد اقتصادی حیاتی است.

واگنر^۴ (۲۰۲۱) اثرات انتشار دی اکسید کربن ناشی از تولید انرژی هسته‌ای و انرژی تجدیدپذیر را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که انرژی هسته‌ای انتشار دی اکسید کربن را کاهش نمی‌دهد، اما انرژی تجدیدپذیر به طور کارآمد این کار را انجام می‌دهد. علاوه بر این، وی استدلال کرد که این دو فناوری یکدیگر را از بین می برند.

۲-۲- مطالعات داخلی

سلاطین و غفاری صومعه (۱۳۹۹) به بررسی میزان تاثیرگذاری مصرف انرژی هسته‌ای بر کیفیت محیط‌زیست در گروه کشورهای منتخب پرداختند. تحقیق حاضر از نظر هدف یک تحقیق کاربردی، از نظر روش مطالعه علی و از نظر روش تحقیق و ماهیت و شیوه نگرش پرداختن به مسأله استنباطی است. نتایج حاصل از برآورد مدل به روش اثرات ثابت در گروه کشورهای منتخب در دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۴ نشان داد، مصرف انرژی هسته‌ای تأثیر منفی و معناداری بر انتشار دی اکسید کربن به عنوان شاخص نشان دهنده کیفیت محیط زیست دارد.

خانعلی زاده و همکاران (۱۳۹۸) بایکارگیری از الگو خود توضیح با وقفه های گسترده (ARDL) به بررسی اثرات کوتاه مدت و بلندمدت بین متغیرهای میزان تولید انرژی برق از نیروگاه های آبی، نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی، نیروگاه های دیزلی، نیروگاه های بادی، نیروگاه های آبی و نیروگاه های اتمی بر انتشار دی اکسید کربن در سال های ۱۳۹۶-۱۳۹۰ در کشور ایران و با

1 Ulucak & Erdogan

2 Majeed et al

3 Azam et al

4 Wagner

استفاده از داده های فصلی پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده در کوتاه مدت و هم در بلندمدت اثر این متغیرها بر انتشار گاز دی اکسید کربن معنادار بدست آمد. همچنین نتایج این تحقیق به خوبی حاکی از آن است که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید برقدر نیروگاه های کشور از انتشار دی اکسید کربن خواهد کاست که بیشترین اثرگذاری به ترتیب مربوط به نیروگاه های تولید برق بادی، آبی و هسته ای است. ضمن اینکه استفاده از انرژی هسته ای برای تولید برق، شاید بعلاوه قدیمی بودن تکنولوژی بکارگیری در این نیروگاه نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند آبی و بادی از آلاینده گی بیشتری در ایران دارا می باشد. همچنین بیشترین تاثیرگذاری بر افزایش انتشار دی اکسید کربن در جهت تولید برق در ایران با استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر در کوتاه مدت مربوط به نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی و در بلندمدت مربوط به نیروگاه های دیزلی می باشد.

فرازمند و اسکندری (۱۳۹۶) به بررسی و تبیین رابطه بلندمدت بین مصرف انرژی های هسته ای و تجدیدپذیر و شاخص کیفیت زیست محیطی با استفاده از داده های پنل در گروهی از کشورها براساس متغیر انتشار گاز دی اکسید کربن طی سال های ۲۰۱۳-۱۹۸۰ پرداختند. به منظور بررسی رابطه بلندمدت متغیرها در از آزمون علیت پنلی استفاده شده است. نتایج نشان دهنده اثر مثبت رشد اقتصادی و مصرف انرژی بر انتشار دی اکسید کربن می باشد. استفاده از انرژی هسته ای و انرژی تجدیدپذیر اثری منفی بر انتشار گاز دی اکسید کربن دارند. تجزیه و تحلیل علیت در کوتاه مدت حاکی از وجود رابطه علی دو طرفه بین انتشار دی اکسید کربن و رشد اقتصادی، انتشار گاز دی اکسید کربن و مصرف انرژی هسته ای و انتشار گاز دی اکسید کربن و مصرف انرژی می باشد. همچنین نتایج حاکی از وجود رابطه علی یک طرفه بین انتشار گاز دی اکسید کربن و مصرف انرژی تجدیدپذیر می باشد. همچنین در بلندمدت رابطه علی دو طرفه از رشد اقتصادی، مصرف انرژی، مصرف انرژی تجدیدپذیر و مصرف انرژی هسته ای به انتشار گاز دی اکسید کربن برقرار است.

۳- روش شناسی

۳-۱- انتخاب مدل و منابع داده ها

در این مطالعه برای آزمون رابطه اثرات زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی، انرژی های تجدیدپذیر و انرژی هسته ای بر انتشار کربن از مدل خود رگرسیون بردار (VAR)، استفاده شده است. یکی از علت های انتخاب این مدل این است که در اغلب اوقات، متغیرهای اقتصادی علاوه بر متغیرهای برونزا، از مقادیر با وقفه خود نیز تأثیر می پذیرند. مدل چند متغیره خودرگرسیون برداری (VAR)، انتخاب شده برای تخمین رابطه علی بین اثرات زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی، انرژی های تجدیدپذیر و انرژی هسته ای بر انتشار کربن کشورهای در حال توسعه (مکزیک، هند، پاکستان، برزیل و آفریقای جنوبی) را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$LCo2_t = \alpha_0 + \alpha_1 LCoal_t + \alpha_2 LGas_t + \alpha_3 LNuclear_t + \alpha_4 LOil_t + \alpha_5 LRenew_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

که در آن $coal_t$ لگاریتم مصرف زغال سنگ، gas_t لگاریتم مصرف گاز طبیعی و $renew_t$ و oil_t و $nuclear_t$ به ترتیب لگاریتم مصرف انرژی تجدیدپذیر، لگاریتم مصرف نفت و لگاریتم مصرف انرژی هسته ای می باشد، داده های مربوط به تمام متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق برای کشورهای منتخب در حال توسعه (مکزیک، هند، پاکستان، آفریقای جنوبی، برزیل) به صورت سالانه برای دوره زمانی ۲۰۲۱-۱۹۸۹ از سایت (Our World in Data) جمع آوری شده است.

۳-۲- آزمون ریشه واحد

در اقتصاد سنجی مدرن اکثر متغیرهای اقتصادی دارای میانگین و واریانس غیرمانا می باشند که این امر باعث رگرسیون کاذب با R^2 و آماره t معنی دار می شود، اما ممکن است این رگرسیون از نظر اقتصادی بی معنی باشد (گرنجر^۱، ۱۹۷۴). با این حال اگر مجموعه متغیرها هم انباشته باشند و ارتباط بلند مدت بین متغیرها وجود داشته باشد، می توان به تخمین های معتبر و قابل استنباطی دست یافت. در این مطالعه برای تشخیص مانا بودن متغیرها از آزمون دیکی فولر تعمیم یافته استفاده شده است.

۳-۳- تحلیل هم انباشتگی

در ادبیات اقتصادی، برای آزمون وجود رابطه بلند مدت بین متغیرها روش های متفاوتی پیشنهاد می شود. یکی از معروف ترین آن ها، روش انگل و گرنجر^۲ که توسط ایشان در سال (۱۹۹۱) معرفی می شود. همچنین حداکثر راستنمایی که توسط جوهانسون و

¹ Granger

² Engle and Granger

جوسیلیوس^۱ در سال (۱۹۹۰) بیان شد نیز بسیار پرکاربرد می‌باشد، که در مطالعه حاضر از این روش استفاده شده است. مدل خود رگرسیون برداری VAR، برای نشان دادن آزمون هم‌انباشتگی به صورت زیر قابل تعریف است:

$$X_t = A_1 X_{t-1} + \dots + A_k X_{t-k} + \mu + \varepsilon_t \quad (2)$$

در اینجا X یک بردار $n \times 1$ از متغیرهای $I(1)$ است و μ بردار مقادیر ثابت و ε_t نیز جزء اختلال مدل است. با استفاده از عبارت $\Delta = 1 - L$ معادله (۲) را می‌توان به صورت فرم تصحیح خطا بیان کرد.

$$\Pi \Delta X_t = \Pi X_{t-k} + \Gamma_1 X_{t-k+1} + \dots + \Gamma_{k-1} X_{t-k+1} + \mu + \varepsilon_t \quad (3)$$

در معادله بالا، $\Gamma_i = -(I - A_1 \dots A_i)$ ، $\Gamma_i = -(I - A_1 - \dots - A_k)$ و $\Pi = -(I - A_1 - \dots - A_k)$ ماتریس واحد، $A_i = - (i = 1, \dots, k)$ بردار ضرایب و k نیز تعداد وقفه‌های مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد.

معادله (۳)، فرم تفاضل اول مدل VAR است که جمله ΠX_{t-k} به آن اضافه شده است. Π ماتریسی است که شامل اطلاعات مربوط به ارتباط بلندمدت بین متغیرها می‌باشد. رتبه ماتریس Π تعداد روابط خطی بلندمدت بین متغیرها را نشان می‌دهد. این ماتریس را می‌توان به صورت $\Pi = \alpha\beta$ تجزیه کرد، که در اینجا α نشان دهنده ماتریس ضرایب عبارت تصحیح خطا است. این ضرایب سرعت تعدیل به سمت رابطه بلندمدت را نشان می‌دهد. B نیز ماتریس ضرایب بلندمدت است. بنابراین آزمون هم‌انباشتگی یوهانسون بر مبنای ماتریس Π که شامل یک بخش تصحیح خطا است و نشان دهنده روابط بلندمدت بین متغیرها می‌باشد، پایه گذاری شده است. اگر رتبه ماتریس Π کامل باشد می‌توان گفت که بردار X_t پایا است. اما اگر رتبه ماتریس برابر صفر باشد، در آن صورت متغیرها هم‌انباشته نبوده و هیچ ارتباط بلندمدتی بین متغیرها وجود ندارد و مدل تصحیح خطا به صورت یک مدل اولیه VAR در می‌آید. جوهانسون و جوسیلیوس (۱۹۹۰)، برای آزمون تعداد بردارهای هم‌انباشتگی، دو آماره زیر را معرفی نمودند:

$$\lambda_{trace}(r) = -T \sum_{i=r+1}^n \ln(1 - \hat{\lambda}_i) \quad (4)$$

$$\lambda_{max}(r, r+1) = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1}) \quad (5)$$

به طوری که $\hat{\lambda}_i$ عبارت است از مقادیر برآورد شده ریشه‌های مشخصه حاصل از برآورد ماتریس Π که اصطلاحاً این ریشه‌ها را مقادیر وی^۲ نیز می‌نامند و T تعداد مشاهدات قابل استفاده در تخمین می‌باشد.

آماره اول مربوط به این فرض صفر است که تعداد بردارهای هم‌انباشتگی کمتر و یا مساوی r است. فرض رقیب در این حالت آن است که تعداد بردارهای هم‌انباشتگی بزرگتر از r است. بر اساس مطالب قبل به راحتی می‌توان دریافت که اگر $\hat{\lambda}_i = 0$ باشد، در این صورت λ_{trace} مساوی صفر خواهد بود. هرچه تعداد بیشتری از ریشه‌های مشخصه با صفر فاصله داشته باشد، مقدار $\ln(1 - \hat{\lambda}_i)$ نیز بیشتر منفی خواهد بود و لذا آماره λ_{trace} بزرگتر خواهد بود. آماره دوم λ_{max} مربوط به آزمون این فرض صفر است که تعداد بردارهای هم‌انباشتگی برابر r می‌باشد. فرض رقیب در اینجا آن است که تعداد این بردارها مساوی $r+1$ است. در اینجا نیز اگر مقادیر برآورد شده ریشه‌های مشخصه نزدیک صفر باشد، در این صورت λ_{max} کوچک خواهد بود.

۳-۴- علیت گرنجری

هم‌انباشتگی بین متغیرها نشان می‌دهد که حداقل یک رابطه بلند مدت بین متغیرها وجود دارد، اما جهت علیت بین متغیرها را مشخص نمی‌کند. انگل و گرنجر (۱۹۹۱)، اثبات کردند که اگر متغیرها انباشته از درجه یک یعنی $T=I(1)$ و هم‌انباشته باشند، آزمون علیت گرنجری در مدل VAR مناسب نمی‌باشد، زیرا عبارت تصحیح خطا که عدم تعادل کوتاه‌مدت را اصلاح می‌کند، نادیده گرفته می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌کنند برای بررسی رابطه علیت بین متغیرها از مدل تصحیح خطای برداری استفاده شود. در این صورت با وارد شدن عبارت تصحیح خطا، آماره‌های مناسب و قابل استنباطی به دست می‌آید. روش برداری تصحیح خطا علاوه بر اینکه جهت علیت بین متغیرها را تعیین می‌کند، این امکان را فراهم می‌سازد که علیت، کوتاه مدت و بلندمدت از هم تفکیک شوند. بدین صورت که با معنی دار بودن مجموع هریک از ضرایب متغیرهای توضیحی در معادله تصحیح خطا از طریق آماره F یا والد (W) علیت گرنجری متغیر توضیحی مورد نظر نسبت به متغیر وابسته مورد آزمون قرار گیرد. از سوی دیگر با توجه به اینکه عبارت تصحیح خطا دارای اطلاعات بلند مدت است، از طریق معنی دار بودن ضرایب عبارت تصحیح خطا یا آماره t می‌توان به رابطه علی بلند مدت بین متغیرهای توضیحی نسبت به متغیر وابسته پی‌برد.

¹ Johansen and Juselius

2 Eigenvalues

۴- نتایج تخمین

۴-۱- نتایج آزمون ریشه واحد

به منظور مانا کردن متغیرها از تمامی آن‌ها یک بار تفاضل گرفته شد و مشخص گردید که تمامی متغیرها بعد از یک بار تفاضل‌گیری مانا می‌شوند. نتایج آزمون مانایی تفاضل مرتبه اول متغیرها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- نتایج آزمون مانایی تفاضل مرتبه اول متغیرها (مأخذ: محاسبات محقق)

متغیر	سطح		تفاضل مرتبه اول متغیر	
	مقادیر بحرانی	Prob	مقادیر بحرانی	Prob
Co2	۷/۳۱۶۹۱	۰/۶۹۵۲	۴۱/۲۴۷۲	۰/۰۰۰
Coal	۵/۰۴۵۷۴	۰/۸۸۸۱	۵۸/۶۱۰۳	۰/۰۰۰
Gas	۵/۵۸۱۴۱	۰/۸۴۹۱	۳۹/۷۹۶۶	۰/۰۰۰
Nuclear	۲/۰۱۴۱۶	۰/۰۲۷۹	۹۸/۴۶۷۴	۰/۰۰۰
Oil	۱۳/۲۹۷۶	۰/۲۰۷۵	۵۹/۲۹۵۲	۰/۰۰۰
Renew	۱۰/۰۲۵۳	۰/۴۳۸۳	۲۹/۹۷۰۲	۰/۰۰۰

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان ملاحظه کرد که تمامی متغیرها با یک مرتبه تفاضل‌گیری مانا شده‌اند. می‌توان گفت که با تفاضل‌گیری اطلاعات ارزشمندی به دست می‌آید. اینجاست که هم انباشتگی به کمک می‌آید تا بتوان رگرسیون را بدون هراس از کاذب بودن بر اساس سطح متغیرهای سری زمانی برآورد کرد. به طور کلی اگر متغیرها (سری) انباشته از مرتبه یکسانی باشند، رگرسیون بر روی سطح متغیرها معنی‌دار می‌باشد یعنی رگرسیون دیگر ساختگی نیست و هیچ گونه اطلاعات بلندمدتی از دست نمی‌رود. بنابراین برای بررسی وجود یک رابطه تعادلی بلندمدت بین متغیرها باید وجود همگرایی را بین آن‌ها آزمون کرد بنابراین، برای تعیین تعداد بردارهای همگرایی از آزمون همگرایی جوهانسون-جوسیلیوس استفاده می‌شود.

۴-۲- تعیین طول وقفه بهینه و ساختار مدل

تخمین مدل هم‌انباشتگی جوهانسون-جوسیلیوس مستلزم تخمین یک سیستم معادلات VAR است که در این بین بدست آوردن طول وقفه بهینه از مقدمات تخمین مدل می‌باشد چرا که تعیین تعداد وقفه‌های مناسب در این الگو تضمین می‌کند که جملات خطای مربوط به معادلات نطفه سفید باشد. برای تعیین طول وقفه بهینه، معیارهای متفاوتی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به معیار آکائیک (AIC)، شوارتز-بیزین (SC)، خان-کوئین (HQ)، FPE و LR یا نسبت درست‌نمایی، اشاره کرد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود تمامی معیارها به جز معیار LogL طول وقفه $p=1$ را به عنوان وقفه بهینه نشان دادند و در نتیجه $p=1$ ، به عنوان طول وقفه بهینه انتخاب گردید.

جدول ۲- تعیین وقفه‌های بهینه مدل (مأخذ: محاسبات محقق)

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
۰	-۷۰۲/۳۵۷۵	NA	۰/۰۰۱	۱۰/۱۱۹۳۹	۱۰/۳۴۵۴۶	۱۰/۱۷۰۶۲
۱	۷۹۳/۱۴۴۰	۲۸۴۱/۴۵۳*	-۱۳#e/۸۱	-۱۰/۷۳۰۶۳*	-۹/۸۴۸۱۳۵*	-۱۰/۳۷۲۰۱*
۲	۸۱۵/۶۶۴۵	۴۰/۸۵۸۷۶	-۱۲e۱/۰۷	-۱۰/۵۳۸۰۶	-۸/۸۹۹۱۵۰	-۹/۸۷۲۰۵۹
۳	۸۳۰/۶۹۳۴	۲۵/۹۷۸۴۹	-۱۲e۱/۴۶	-۱۰/۲۳۸۴۸	-۷/۸۴۳۱۴۰	-۹/۲۶۵۰۸۴

۴-۳- نتایج آزمون هم‌انباشتگی

بعد از تعیین طول وقفه بهینه و برآورد اولیه مدل VAR، بردارهای هم‌انباشتگی بررسی می‌گردد. برای این منظور، از آزمون جوهانسون (۱۹۸۸) و جوهانسون و جوسیلیوس (۱۹۹۰) استفاده می‌شود. آزمون جوهانسون برای مشخص کردن رابطه هم‌انباشتگی از روش حداکثر درست‌نمایی استفاده می‌کند. درجه هم‌انباشتگی بین متغیرهای الگو را می‌توان با استفاده از روش جوهانسون آزمون‌های آماره اثر $trace$ و آزمون حداکثر درست‌نمایی λ_{max} تعیین کرد. نتایج این دو آزمون نشان داد که فرضیه صفر (نبود

بردار هم‌انباشتگی)، در سطح معنی‌داری ۵٪ درصد رد می‌شود. این بدان معنی است که حداقل یک رابطه بلندمدت بین متغیرها وجود دارد. نتایج آزمون‌های هم‌انباشتگی در جدول آمده است.

جدول ۳- آزمون‌های هم‌انباشتگی (مأخذ: محاسبات محقق)

آزمون بیشینه مقدار ویژه				آزمون اثر				
فرضیه صفر	فرضیه مخالف	آماره آزمون	سطح بحرانی %۵	Prob	فرضیه مخالف	آماره آزمون	سطح بحرانی %۵	Prob
$r = 0$	$r = 1$	۲۷/۸۶۹۹۲	۴۰/۰۷۷۵۷	۰/۵۷۱۱	$r = 0$	۶۵/۳۹۷۴۳	۹۵/۷۵۳۶۶	۰/۸۵۵۵
$r \geq 1$	$r = 2$	۱۱/۸۶۴۸۴	۳۳/۸۷۶۸۷	۰/۹۹۸۸	$r \geq 1$	۳۷/۵۲۷۵۱	۶۹/۸۱۸۸۹	۰/۹۷۶۰
$r \geq 2$	$r = 3$	۹/۳۳۳۱۱	۲۷/۵۸۴۳۴	۰/۹۸۸۴	$r \geq 2$	۲۵/۶۶۲۶۸	۴۷/۸۵۶۱۳	۰/۸۹۹۸
$r \geq 3$	$r = 4$	۸/۱۸۷۵۹۴	۲۱/۱۳۱۶۲	۰/۸۹۱۸	$r \geq 3$	۱۵/۹۳۰۳۷	۲۹/۷۹۷۰۷	۰/۷۱۷۲
$r \geq 4$	$r = 5$	۷/۶۶۴۵۳۳	۱۴/۲۶۴۶۰	۰/۴۱۳۸	$r \geq 4$	۷/۷۴۳۷۷۱	۱۵/۴۹۴۷۱	۰/۴۹۳۳
$r \geq 5$	$r = 6$	۰/۰۷۸۲۳۸	۲/۸۴۱۴۶۶	۰/۷۷۹۷	$r \geq 5$	۰/۰۷۸۲۳۸	۲/۸۴۱۴۶۶	۰/۷۷۹۷

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جدول (۳) قابل مشاهده است، براساس هر دو معیار حداکثر مقدار ویژه و اثر، دو بردار هم‌جمعی (رابطه بلندمدت) میان متغیرهای موردنظر وجود دارد. لذا، در این پژوهش جهت برآورد روابط میان متغیرهای مذکور و نیز به منظور پاسخ‌گویی به سؤالات و فرضیات تحقیق، از الگوی VECM استفاده شده است. ضرورت استفاده از این الگو نیز بدان جهت است که به‌طور هم‌زمان و در قالب یک الگوی سیستمی به برآورد روابط کوتاه‌مدت، پویا و بلندمدت میان متغیرها می‌پردازد. پس از تأیید وجود رابطه بلندمدت و برآورد آن، به تخمین مدل VECM پرداخته می‌شود. این مدل، ترکیبی از مدل‌های VAR و ECM است که در حقیقت ویژگی‌های هر دو مدل را به‌طور هم‌زمان در بردارد. بدین مفهوم که در این مدل، به صورت سیستمی به برآورد رابطه پویای کوتاه‌مدت می‌پردازد. همچنین منظور از رابطه پویای کوتاه‌مدت، رابطه‌ای است که در برگزیده پسماندهای رابطه بلندمدت با یک وقفه $ECT(-1)$ است. از نقطه نظر اقتصادی این متغیر مبین ضریب هم‌گرایی بوده که نشان‌دهنده میزان تعدیل عدم تعادل‌های کوتاه‌مدت به سوی تعادل بلندمدت است. نتایج حاصل از برآورد این مدل در جدول ارائه شده است.

جدول ۴- وجود رابطه هم‌انباشتگی بلندمدت (مأخذ: محاسبات محقق)

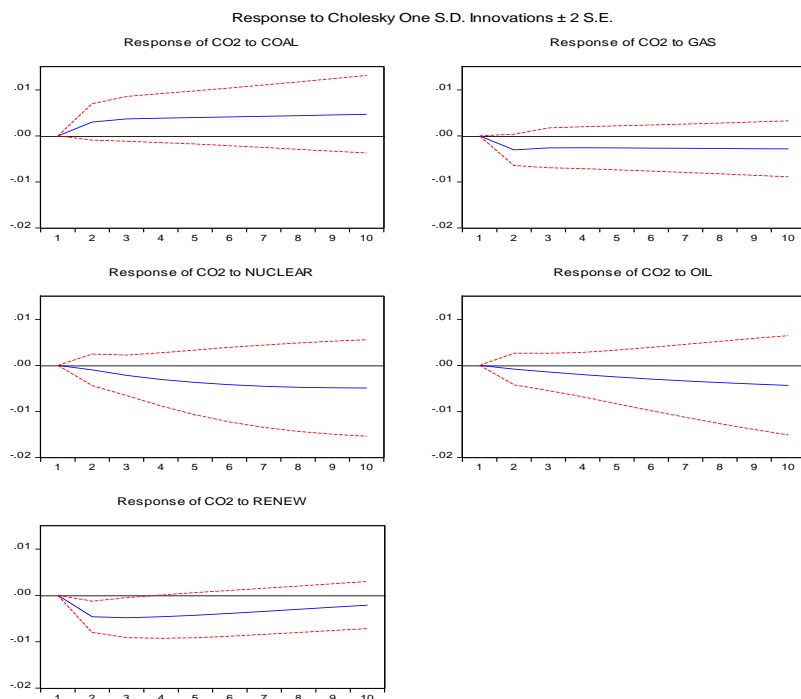
Cointegrating Eq:	Co2	Coal	Gas	Nuclear	Oil	Renew
CointEq1	۱,۰۰۰۰۰۰	۰/۰۳۶۰۸۶ (-۰/۱۲۹۴۱)	-۰/۱۱۵۱۶۴ (-۰/۱۰۸۷۲)	-۰/۰۵۴۴۲۴۳ (-۰/۱۸۷۱۴)	-۰/۰۰۵۱۲۸ (-۰/۰۰۴۴۵)	۰/۵۱۰۰۳۶ (-۰/۱۸۰۶۴)

۴-۴- توابع عکس‌العمل آنی (ضربه پاسخ)

بررسی توابع عکس‌العمل آنی در واقع همان مطالعه زمان‌بندی اثر تکانه‌ها می‌باشد. در این توابع، اثر انحراف معیار تکانه یک متغیر روی سایر متغیرهای موجود در مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور ترسیم نحوه حرکات زمانی سیستم پس از وارد کردن شوک و تفکیک رفتار هر یک از متغیرهای الگو پس از شوک، از رو ضربه‌های تعمیم یافته استفاده شده است. در این روش، با تغییر رتبه‌بندی متغیرهای الگو نتایج تغییری نمی‌کند.

در شکل (۱) نمودارهای مربوط به بررسی اثرات متغیرهای زغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی، انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای بر انتشار کربن نشان می‌دهند که اثرات متغیرهای نفت، گاز طبیعی، انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای بر انتشار کربن در تمامی دوره‌های مورد بررسی منفی است و سبب کاهش انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود و اثر متغیر زغال‌سنگ بر انتشار کربن مثبت است، که منجر افزایش انتشار گاز دی‌اکسید کربن می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود از بین متغیرهای اثرگذار بر انتشار دی‌اکسید کربن متغیرهای انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر بر انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به متغیرهای مصرف گاز طبیعی و مصرف نفت اثرگذاری بیشتری دارند.



شکل ۱- توابع عکس العمل آنی

۴-۵- نتایج تجزیه واریانس

یکی از کاربردهای مدل خود رگرسیون برداری VAR، تجزیه واریانس می‌باشد. در مطالعه‌ی تجزیه واریانس متغیرهای الگو، واریانس خطای پیش‌بینی به عناصری که تکانه‌های هر یک از متغیرها را در بردارند، تجزیه می‌گردد. به عبارت دیگر، با تجزیه واریانس سهم متغیرهای موجود در الگو از تغییرات هر یک از متغیرها در طول زمان مشخص می‌گردد. آزمون تجزیه واریانس، سهم هر یک از متغیرهای مستقل مدل را در توضیح‌دهی نوسانات متغیر وابسته نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس در جدول زیر ملاحظه می‌شود.

جدول ۵- تجزیه واریانس (مأخذ: محاسبات محقق)

period	SE	Co2	Coal	Gas	Nuclear	Oil	Renew
۱	۰/۰۱۹۵۱۴	۱۰۰,۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۲	۰/۰۳۰۰۱۹	۹۵/۴۲۴۷۴	۱/۰۱۳۲۸۱	۱/۰۱۷۵۳۶	-۱/۰۷۵۷۷	-۰/۰۷۳۳۲۷	۲/۳۶۳۵۳۴
۳	۰/۰۳۷۸۷۳	۹۳/۶۱۱۶۰	۱/۵۸۶۶۴۸	۱/۱۱۵۰۱۳	-۰/۳۹۶۰۸۹	-۰/۱۹۳۳۷۵	۳/۰۹۸۲۷۸
۴	۰/۰۴۴۴۲۶	۹۲/۵۱۴۳۸	۱/۹۰۷۱۸۶	۱/۱۴۴۵۱۵	-۰/۷۶۳۰۳۳	-۰/۳۴۷۸۴۳	۳/۳۲۳۰۴۴
۵	۰/۰۵۰۰۸۳	۹۱/۶۶۰۴۳	۲/۱۳۸۳۸۶	۱/۱۷۲۶۰۹	۱/۱۵۴۱۲۳	-۰/۵۲۹۲۵۲	۳/۳۴۵۱۹۷
۶	۰/۰۵۵۰۸۰	۹۰/۹۳۹۷۱	۲/۳۲۸۵۱۹	۱/۲۰۱۵۲۵	۱/۵۳۸۶۴۰	-۰/۷۳۰۱۷۵	۳/۲۶۱۴۳۰
۷	۰/۰۵۹۵۶۸	۹۰/۲۹۹۴۶	۲/۵۰۰۵۵۳	۱/۲۳۲۷۴۲	۱/۸۹۷۹۰۱	-۰/۹۴۶۲۱۹	۳/۱۲۳۱۲۸
۸	۰/۰۶۳۶۴۷	۸۹/۷۱۳۰۰	۲/۶۶۶۶۲۶	۱/۲۶۵۹۹۴	۲/۲۲۲۳۶۸	۱/۱۷۳۹۷۲	۲/۹۵۸۰۳۹
۹	۰/۰۶۷۳۸۸	۸۹/۱۶۵۰۷	۲/۸۳۳۲۷۶	۱/۳۰۰۶۱۲	۲/۵۰۸۱۵۱	۱/۴۱۰۷۳۲	۲/۷۸۲۱۷۰
۱۰	۰/۰۷۰۸۴۴	۸۸/۶۴۵۳۸	۳/۰۰۴۲۱۶	۱/۳۲۵۹۱۲	۲/۷۵۴۷۷۸	۱/۶۵۴۲۷۴	۲/۶۰۵۴۳۷

در جدول فوق، نتایج تجزیه واریانس مدل ارائه شده است. در این جدول، ستون نخست دوره تحلیل ۱۰ ساله و ستون دوم، خطای پیش‌بینی متغیر در افق پیش‌بینی را نشان می‌دهد. منبع این نوع خطای پیش‌بینی، تغییرات در مقادیر حال و آینده شوک‌های وارده به متغیرهای درونزای مدل VAR است. با توجه به اینکه این خطای پیش‌بینی هر سال بر اساس خطای سال گذشته محاسبه می‌شود، در دوره مورد بررسی همواره افزایش می‌یابد. ستون‌های بعدی، میزان درصد واریانس پیش‌بینی به دلیل شوک‌های گوناگون است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به تغییرات آب و هوایی که منجر به پیامدهای زیست محیطی زیادی می‌شود، کشورهای سراسر جهان به دنبال منابع انرژی مناسب برای دستیابی به هدف توسعه پایدار هستند. انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای به منابع انرژی ضروری برای بسیاری از کشورها تبدیل شده‌اند، اما هنوز مشخص نیست که آیا انرژی هسته‌ای به شدت ترویج شود یا خیر. بنابراین، این مقاله به مقایسه اثرات انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر بر انتشار دی‌اکسید کربن کشورهای منتخب در حال توسعه (مکزیک، هندوستان، آفریقای جنوبی، برزیل و پاکستان) برای دوره زمانی ۲۰۲۱-۱۹۸۹ با استفاده از نرم افزار Eviews مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های تجربی نشان می‌دهد که اثرات متغیرهای نفت، گاز طبیعی، انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای بر انتشار کربن در تمامی دوره‌های مورد بررسی منفی است و سبب کاهش انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود و اثر متغیر زغال سنگ بر انتشار کربن مثبت است، که منجر افزایش انتشار گاز دی‌اکسید کربن می‌شود.

منابع

۱. خانعلی زاده، بهمن، کاکایی، حمید، احمدی دانش آشتیانی، صادق (۱۳۹۸). تاثیر تولید انرژی برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و ناپذیر بر انتشار دی‌اکسید کربن در کشور ایران (باتاکید بر انرژی هسته‌ای)، سومین کنفرانس بین‌المللی تحولات نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری.
۲. سلاطین، پروانه، غفاری صومعه، نیلوفر (۱۳۹۹). تاثیر انرژی هسته‌ای بر کیفیت محیط زیست: رهیافت داده‌های پانل، فصلنامه پایداری، توسعه و محیط زیست، دوره ۱، شماره ۱، ۶۵-۵۴.
۳. فرازمنند، حسین، اسکندری، هانیه (۱۳۹۶). بررسی رابطه بین انرژی هسته‌ای، تجدیدپذیر و بهبود محیط زیست: در منتخبی از کشورها (از جمله ایران)، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، شماره ۵۴، ۱۹۶-۱۷۳.
4. Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Zhang, H., Yuan, J. (2021). Analyzing the effect of natural gas, nuclear energy and renewable energy on GDP and carbon emissions: A multi-variate panel data analysis, *energy*, 219.
5. Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A. et al. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy Environ. Sci.* 11, 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>.
6. Engle, J. H., Granger, C. W. J. (1991). Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing In Long-run Economic Relationships, New York: Oxford University Press.
7. Granger, C. W. J., Newbold, P. (1974). Spurious Regressions in econometrics, *Journal of Econometrics*, 2:111-120.
8. Johansen, S., Juselius, K. (1990). Maximum Likelihood Estimation and Inference on Co-integration With Application to the Demand for Money, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52:169-210.
9. Majeed, M. T., Ozturk, I., Samreen, I., Luni, T. (2022). Evaluating the asymmetric effects of nuclear energy on carbon emissions in Pakistan, *Nuclear Engineering and Technology*, 54 (5).
10. Fell, H., Gilbert, A., Jenkins, D.J., Mildenerger, M. (2021). Reply to "differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract>
11. Sovacool, B.K., Schmid, P., Stirling, A. et al. (2020). Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power. *Nat. Energy* 5, 928-935. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00696-3>.
12. Ulucak, R., Erdogan, S. (2022). The effect of nuclear energy on the environment in the context of globalization: Consumption vs production-based CO2 emissions, *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4).
13. Wagner, F. (2021). CO2 emissions of nuclear power and renewable energies: a statistical analysis of European and global data, *Eur. Phys. J. Plus*, 136-562 .
14. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01508-7>.
15. Wang, Q., Guo, J., Li, R., Jiang, X. T. (2023). Exploring the role of nuclear energy in the energy transition: A comparative perspective of the effects of coal, oil, natural gas, renewable energy, and nuclear power on economic growth and carbon emissions, *Environ Res*, 221:115290. doi: 10.1016/j.envres.2023.115290.
16. Wagner, F. (2018). Fusion energy. *MRS Energy Sustain.* 5, 1-16, <https://doi.org/10.1557/mre.2018.8>.

