فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیست و دوم / شماره ۸۹/ تابستان ۱۴۰۵ / صفحات ۱۴۳-۹۹

شناسایی عوامل هم رفتار با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی در ایران

مهدی گلدانی[۱]
دانشیار اقتصاد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار،ایران،
(m.goldani@hsu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸

چکیده

مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تحقق توسعه پایدار، کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و ارتقاء تاب‌آوری نظام انرژی ملی در برابر بحران‌های اقلیمی و زیرساختی مطرح است. در ایران، با توجه به تشدید خاموشی‌های برق، آلودگی شدید هوا و افزایش فشار بر شبکه‌های انرژی، ضرورت تحلیل جامع و مبتنی بر داده در خصوص عوامل موثر بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از پیش احساس می‌شود. پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بلندمدت بانک جهانی و بهره‌گیری از هفت روش پیشرفته مشابهت‌یابی سری‌های زمانی، به شناسایی و رتبه‌بندی متغیرهای کلیدی هم‌رفتار با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی در ایران پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر تنها به شاخص‌های زیست‌محیطی وابسته نیست، بلکه تحت تأثیر مستقیم مجموعه‌ای از متغیرهای آموزشی، جنسیتی، اقتصادی، نهادی و زیرساختی قرار دارد. در مقابل، مصرف انرژی‌های فسیلی با عواملی مانند ساختارهای حمایتی مبتنی بر یارانه، ضعف در نوسازی زیرساخت‌ها و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی گره خورده است. پژوهش حاضر با ارائه تصویری چندبُعدی از متغیرهای مؤثر، می‌تواند راهنمایی کارآمد برای سیاست‌گذاران در طراحی بسته‌های اصلاحی، تخصیص منابع هدفمند و تدوین استراتژی‌های ملی انرژی باشد.

طبقه‌بندی JEL: Q2, Q3, Q5, C38.

کلیدواژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف انرژی، مشابهت‌یابی سری‌های زمانی، سیاست‌گذاری انرژی، بحران برق.

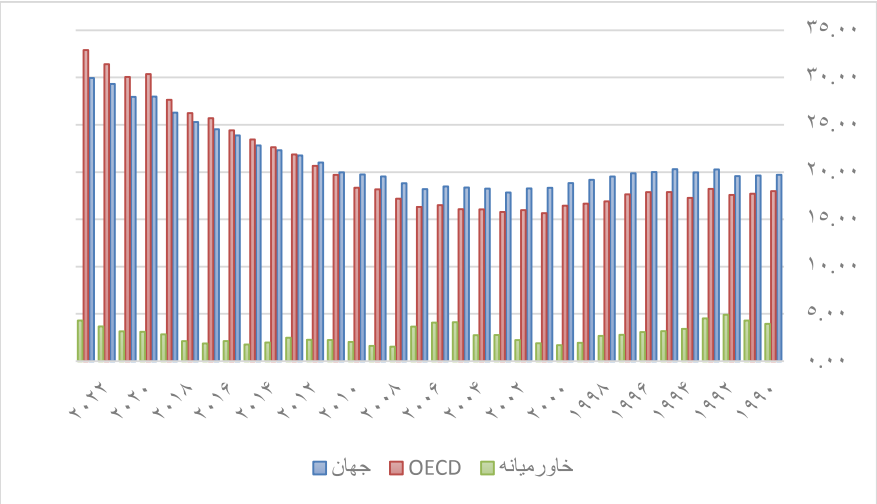
---

۱. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منابع پاک و کم‌کربن، نقش برجسته‌ای در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و مقابله با انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. برخلاف سوخت‌های فسیلی که منبع اصلی انتشار دی‌اکسید کربن و سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند، انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی، بادی، آبی و زیست‌توده با کمترین اثرات منفی بر محیط‌زیست، راهکاری مؤثر برای گذار به سمت توسعه پایدار محسوب می‌شوند. در سال‌های اخیر، محدودیت منابع فسیلی و آثار منفی ناشی از مصرف آن‌ها، از جمله گرم‌شدن زمین و ناپایداری اکولوژیکی، سبب شده‌اند که جوامع مختلف به‌طور فزآینده‌ای به سمت جایگزینی این منابع با انرژی‌های تجدیدپذیر حرکت کنند و سبد انرژی خود را به نفع منابع پاک بازنگری نمایند (سلیمی و همکاران،۱۴۰۲). در مقایسه با انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع فسیلی اگرچه به دلیل دسترسی آسان، تراکم انرژی بالا و زیرساخت‌های گسترده مصرفی همچنان سهم غالب را در سبد انرژی ایران و جهان دارند، اما ماهیتی تجدیدناپذیر داشته و مهم‌ترین منبع انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی به شمار می‌روند. علاوه بر این، در ایران قیمت پایین سوخت‌های فسیلی به‌واسطه یارانه‌های سنگین، موجب استمرار الگوی مصرف غیرکارآمد و تضعیف انگیزه برای جایگزینی آن‌ها شده است. در مقابل، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌رغم برخورداری از مزایای زیست‌محیطی و پایداری بلندمدت، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالا، فناوری‌های نوین و سیاست‌های حمایتی مشخص هستند تا بتوانند سهم قابل‌توجهی در سبد انرژی به دست آورند. این تفاوت بنیادین میان دو منبع انرژی، ضرورت تحلیل هم‌زمان هر دو بخش را آشکار می‌سازد؛ تحلیلی که می‌تواند درک دقیق‌تری از چالش‌ها و فرصت‌های گذار به سمت نظام انرژی پایدار ارائه دهد.

نمودار ۱ سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق را در سه بخش: جهان، OECD، و خاورمیانه طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد. سهم انرژی تجدیدپذیر در کشورهای OECD و جهان از اواسط دهه ۱۹۹۰ روندی افزایشی داشته، در حالی که در خاورمیانه این سهم به طور کلی پایین‌تر و با نوسانات محدود باقی مانده است. این تفاوت بیانگر وابستگی بالای خاورمیانه به سوخت‌های فسیلی و عدم سیاست‌گذاری فعال در حوزه انرژی‌های پاک است.



نمودار۱. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق (درصد) (منبع: World Energy & Climate Statistics – Yearbook)

براساس آمارهای ارائه شده موسسه امبر[1] ایران دوازدهمین کشور بزرگ جهان از نظر میزان تقاضای برق است. در سال ۲۰۲۴ تنها ۸ درصد از برق تولیدی کشور از منابع کم‌کربن تأمین شده که بسیار کمتر از میانگین جهانی (۴۱ درصد) است. همچنین، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تنها ۰/۵ درصد بوده و حدود ۹۲ درصد از برق ایران همچنان با اتکا به سوخت‌های فسیلی تولید می‌گردد.

با این حال، گذار به این نوع انرژی‌ها صرفاً یک فرآیند فناورانه یا اقتصادی نیست، بلکه مستلزم برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و تحولات اجتماعی عمیق است. تحقیقات نشان می‌دهد که توسعه و به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر به شدت وابسته به قصد و تمایل عمومی افراد جامعه برای استفاده از این فناوری‌ها می‌باشد. در واقع، پذیرش اجتماعی انرژی‌های پاک و عبور از وابستگی به سوخت‌های فسیلی، فرآیندی تدریجی و اجتماعی است که به درک، آگاهی و نگرش زیست‌محیطی شهروندان بستگی دارد (یزدان‌پناه و همکاران، ۲۰۱۵)[2]. بنابراین، موفقیت در توسعه این منابع، نه‌تنها در گرو سیاست‌گذاری‌های کلان، بلکه در گرو مشارکت عمومی و تغییر فرهنگ مصرف انرژی

1. Ember
2. Yazdanpanah et al

است. در این میان، شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر مصرف انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که این عوامل به‌طور مستقیم بر الگوهای مصرف، اثربخشی سیاست‌گذاری‌های انرژی و نیز سرعت و کیفیت گذار به سمت توسعه پایدار تأثیر می‌گذارند. تحلیل این عوامل به دولت‌ها و نهادهای تصمیم‌گیر کمک می‌کند تا با درک بهتری از محرک‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و نهادی، سیاست‌هایی هوشمندانه و متناسب با شرایط بومی هر کشور طراحی کنند. به عنوان مثال، آگاهی از نقش متغیرهایی مانند مصرف انرژی، حمایت‌های مالی، سطح آموزش عمومی یا میزان انتشار کربن می‌تواند در تنظیم یارانه‌ها، طراحی مشوق‌های انرژی پاک و ارتقای بهره‌وری بسیار مؤثر واقع شود (لین و همکاران، ۲۰۱۶)[1]. از سوی دیگر، تجربه کشورهای مختلف نشان داده است که توجه صرف به ابعاد فنی یا اقتصادی، بدون در نظر گرفتن عوامل فرهنگی، اجتماعی و نهادی، نمی‌تواند به تغییر پایدار در رفتار مصرف‌کنندگان و ساختارهای تولیدی منجر شود. لذا، اتخاذ یک رویکرد بین‌رشته‌ای و چندبعدی در تحلیل مصرف انرژی، امری ضروری است؛ چرا که تنها در این صورت می‌توان تأثیرات متقابل و پیچیده میان عوامل مختلف را درک کرد و مسیرهای مؤثر برای کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و توسعه منابع تجدیدپذیر را ترسیم نمود[2]. بر این اساس، هدف این پژوهش شناسایی متغیرهای هم‌رفتار با دو شاخص مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی با استفاده از روش‌های مشابهت‌یابی سری‌های زمانی است. لازم به ذکر است که شاخص‌های شناسایی‌شده صرفاً بر اساس شباهت رفتاری آن‌ها با شاخص‌های هدف دسته‌بندی شده‌اند و این پژوهش در پی کشف روابط علّی و معلولی میان داده‌ها نیست. شناسایی این متغیرها در درک الگوهای پنهان، هم‌زمانی‌های رفتاری و روابط ساختاری میان متغیرهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و نهادی با روند مصرف انرژی نقش کلیدی دارد. این تحلیل می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا با شناسایی عوامل هم‌راستا با تغییرات مصرف انرژی، سیاست‌هایی هدفمند، مبتنی بر داده و متناسب با واقعیت‌های رفتاری کشورها یا جوامع هدف طراحی نمایند و گذار به سمت توسعه پایدار انرژی را با کارایی و

1. Lin et al
2. IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency.

اثربخشی بیشتری مدیریت کنند. ازآنجاکه ممکن است شاخص‌های نامرتبط صرفاً به‌دلیل هم‌رفتاری تصادفی در طول زمان به‌عنوان متغیرهای هم‌رفتار شناسایی شوند، تطبیق یافته‌ها با مبانی نظری الزامی است.

۲- مبانی نظری

۲-۱- اهمیت تمایز میان انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر

انرژی‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ اگرچه در کوتاه‌مدت اثر مثبتی بر رشد اقتصادی دارند (برای نمونه هر ۱ درصد افزایش در تولید برق زغال‌سنگ حدود ۰/۲۷ درصد رشد اقتصادی ایجاد می‌کند)، اما این رشد همراه با افزایش شدید انتشار CO_2 و پیامدهای زیان‌بار زیست‌محیطی است. در مقابل، گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند همزمان منافع اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد؛ به‌گونه‌ای که هر ۱ درصد افزایش در سهم آن‌ها تا ۰/۵۳ درصد کاهش در انتشار CO_2 ایجاد می‌کند (هدوم، ۲۰۱۹)[1] و به کاهش آلودگی و پایداری محیطی کمک می‌نماید. از منظر اجتماعی نیز سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک، به‌ویژه خورشیدی و بادی، ظرفیت اشتغال‌آفرینی ۱,۷ تا ۱۴,۷ برابر بیشتر از منابع فسیلی دارد(کامرون و واندر،۲۰۱۵)[2].با وجود اینکه نیروگاه‌های فسیلی در ظاهر سرمایه‌گذاری اولیه کمتری می‌طلبند و در کوتاه‌مدت مقرون‌به‌صرفه به نظر می‌رسند، اما هزینه‌های سنگین زیست‌محیطی و اجتماعی آن‌ها در بلندمدت این مزیت را خنثی می‌کند. در مقابل، منابع تجدیدپذیر اگرچه سرمایه‌گذاری بیشتری نیاز دارند، ولی به دلیل آثار مثبت چندجانبه بر تولید ناخالص داخلی، اشتغال پایدار و کاهش انتشار آلاینده‌ها، گزینه‌ای راهبردی برای تحقق اقتصاد سبز و اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شوند (بورکه و همکاران، ۲۰۱۹)[3].

1. Hdom
2. Cameron and Van Der Zwaan
3. Burke et al

۲-۲- انرژی‌های تجدیدپذیر

تعیین عوامل محرک انرژی‌های تجدیدپذیر و ارزیابی تأثیر آنها، امکان تسریع فرآیند تحول سبز را برای غلبه و کاهش تغییرات نامساعد آب‌وهوایی در سطح جهانی فراهم می‌سازد (پولسین و همکاران، ۲۰۲۲)[1]. با این حال بررسی ادبیات در این حوزه نشان می‌دهد که تفاوت‌هایی در بهره‌گیری کشورها از انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد که ریشه در علل چندبعدی دارد. نکته قابل توجه اینکه ادبیات علمی عمدتاً به رابطه بین مصرف انرژی و پیشرفت اقتصادی می‌پردازد (کولوسوک و همکاران، ۲۰۲۴)[2]، به طور کلی در چارچوب تحلیلی پیشنهادی متغیرهای تعیین‌کننده را در سه بخش "اقتصادی-اجتماعی"، "سیاسی" و "ویژگی‌های خاص ملی" دسته‌بندی می‌کند:

الف) محرک‌های اقتصادی-اجتماعی: درآمد سرانه، قیمت نفت خام (به‌مثابه تقریبی قیمت سوخت‌های فسیلی) و شدت انتشار CO_2

ب) مؤلفه‌های نهادی: کیفیت حکمرانی

ج) مختصات ملی: سرمایه انسانی

محرک‌های اقتصادی و اجتماعی

در ادبیات پژوهش، عوامل اقتصادی و اجتماعی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین محرک‌های گذار به انرژی پاک شناخته شده‌اند (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). در بین این محرک‌ها، مطالعات بسیاری رابطه بین تولید ناخالص داخلی و مصرف انرژی (تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) را تایید کرده‌اند (دبوسی و ابید، ۲۰۲۲)[3]. همچنین در حوزه اقتصاد انرژی، عواملی مانند قیمت نسبی منابع مختلف انرژی، هزینه‌های اولیه برای راه‌اندازی و حمایت‌های دولتی نقش مهمی در تصمیم‌گیری برای انتخاب نوع انرژی دارند (مجدزاده و همکاران، ۱۳۹۴). در بسیاری از کشورها، سوخت‌های فسیلی به دلیل دریافت یارانه‌های دولتی، همچنان ارزان و به‌صرفه به نظر می‌رسند، در حالی که انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه در مرحله نصب و شروع به کار، معمولاً هزینه‌بر هستند (ابهوتا و جن، ۲۰۲۰)[4].

1. Polcyn et al
2. Dźwigoł et al
3. Dabboussi & Abid
4. Ebhota & Jen

از دیدگاه اجتماعی، نوع نگرش مردم به انرژی، شیوه‌های رایج مصرف و میزان آگاهی آن‌ها از مسائل زیست‌محیطی تأثیر قابل توجهی بر انتخاب و استفاده از منابع انرژی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پذیرش فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در جامعه، تا حد زیادی به عواملی مانند سطح دانش زیست‌محیطی افراد، اعتماد آن‌ها به عملکرد و ایمنی این فناوری‌ها و درک مزایای بلندمدت آن‌ها برای نسل‌های آینده بستگی دارد (وستینگن و همکاران، ۲۰۰۷)[1].

از منظر زیست‌محیطی، انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر آثار بسیار متفاوتی بر محیط‌زیست بر جای می‌گذارند .سوخت‌های فسیلی یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و آسیب به اکوسیستم‌ها هستند. مقابل، منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و آبی به دلیل انتشار کربن پایین، از جمله گزینه‌های پایدار برای مقابله با بحران تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند. با این حال، هرچند این منابع به‌طور کلی با محیط‌زیست سازگارتر هستند، اما نمی‌توان از برخی پیامدهای زیست‌محیطی خاص آن‌ها، مانند نیاز به زمین گسترده برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، یا تأثیرات محلی پروژه‌های برق‌آبی بر منابع آب و تنوع زیستی چشم‌پوشی کرد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین، ارزیابی محیط‌زیستی این فناوری‌ها باید با در نظر گرفتن مزایا و ملاحظات محلی به‌صورت متوازن انجام شود.

از بین متغیرهای اجتماعی، متغیرهای مربوط به سلامت عمومی جامعه رابطه‌ای دوسویه با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. مطالعات نشان می‌دهند که افراد سالم‌تر و با سطح آگاهی بالاتر، گرایش بیشتری به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. از سوی دیگر افزایش در مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر باعث بهبود سلامت عمومی می‌شود. به عبارت دیگر افزایش استفاده از انرژی‌های پاک به کاهش آلودگی هوا و در نتیجه ارتقاء سلامت جامعه کمک می‌کند (کاروسو و همکاران، ۲۰۲۰)[2].

1. Wüstenhagen et al
2. Caruso et al

مولفه‌های نهادی

موانع بهره‌وری انرژی در سه دسته کلی طبقه‌بندی می‌گردد: موانع سیاسی، نبود هماهنگی در سیاست‌ها و وجود دستورالعمل‌های متناقض در ساختار حکمرانی. در واقع، حکمرانی نقش کلیدی در تعیین و اجرای بسیاری از استانداردهای اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، نهادی، بهداشتی و زیست‌محیطی ایفا می‌کند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۲)[1]. از آنجا که منابع انرژی تجدیدپذیر دارای چرخه‌های خاصی هستند و اغلب به فناوری‌های ذخیره‌سازی یا سازوکارهای دیگری برای مدیریت مصرف نیاز دارند، بسیاری از کشورها توانایی سرمایه‌گذاری در این زیرساخت‌ها را ندارند. به همین دلیل، روش‌های متعارف و اغلب غیرقابل تجدید تولید انرژی، گزینه‌ای در دسترس‌تر و عملی‌تر برای آن‌ها محسوب می‌شود. این مسئله، ضرورت توجه به نحوه حکمرانی در حوزه انرژی را برجسته می‌سازد؛ حکمرانی‌ای که بتواند مسیر تولید و مصرف منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را به‌درستی هدایت و تنظیم کند (محمدیان و اسماعیلی، ۱۴۰۳).

مختصات ملی: سرمایه انسانی

گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سرمایه‌گذاری در ارتقای سرمایه انسانی می‌تواند نقش مؤثری در ایجاد نظام مالی پایدار و منعطف در کشورهای حوزه خلیج فارس ایفا کند. این منابع انرژی نه‌تنها موجب کاهش آثار زیست‌محیطی منفی می‌شوند، بلکه زمینه‌ساز رشد اقتصاد سبز و پایدار نیز هستند (پنسه و همکاران، ۲۰۲۱)[2]. با سرمایه‌گذاری در نیروی انسانی متخصص در حوزه انرژی‌های نو، امکان ارتقاء نوآوری و توسعه فناوری‌های پیشرفته فراهم می‌شود که خود منجر به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در منطقه خواهد شد. این روند همچنین بستر مناسبی برای جذب سرمایه‌گذاری خارجی جهت توسعه فناوری‌های مدرن فراهم می‌آورد و مسیر رشد اقتصادی را هموار می‌سازد (ذیاب سالم و همکاران، ۱۴۰۴).

1. Huang et al
2. Ponce et al

۲-۳- انرژی‌های فسیلی

انرژی‌های فسیلی به دلیل دسترسی آسان، تراکم بالای انرژی و زیرساخت‌های گسترده موجود طی بیش از یک قرن، نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیند صنعتی‌شدن و رشد اقتصادی کشورها ایفا کرده‌اند. نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ به عنوان منابع اصلی، ستون فقرات بسیاری از بخش‌های کلیدی اقتصاد جهانی از جمله حمل‌ونقل، تولید برق و صنایع سنگین محسوب می‌شوند. سهم بالای این منابع در سبد انرژی جهانی سبب شده است که بخش قابل توجهی از تولید ناخالص داخلی (GDP) کشورها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر مصرف انرژی‌های فسیلی استوار باشد (ساواکول، ۲۰۱۷)[1].

با این حال، پیامدهای منفی زیست‌محیطی ناشی از تداوم مصرف سوخت‌های فسیلی بسیار چشمگیر است. این منابع مهم‌ترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، به شمار می‌روند که با تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا و تهدید سلامت عمومی ارتباط مستقیم دارند (باهاتاچارایا، ۲۰۱۶)[2]. افزایش دمای کره زمین، پدیده گرمایش جهانی و ناپایداری‌های اکولوژیک از جمله اثرات مخرب ناشی از وابستگی شدید به این منابع است. بنابراین، هرچند سوخت‌های فسیلی محرک اصلی رشد صنعتی در سده گذشته بوده‌اند، اما امروزه یکی از چالش‌های جدی توسعه پایدار به شمار می‌روند.

در ایران، مصرف بالای سوخت‌های فسیلی نه‌تنها ناشی از دسترسی به منابع غنی نفت و گاز است، بلکه بیش از همه تحت تأثیر ساختار قیمت انرژی و یارانه‌های گسترده قرار دارد. پرداخت یارانه‌های سنگین به فرآورده‌های نفتی و گازی موجب شده است که قیمت نسبی انرژی در ایران بسیار پایین‌تر از سطح واقعی آن باشد و همین امر باعث استمرار الگوهای مصرف غیرکارآمد، اتلاف انرژی و کاهش انگیزه برای سرمایه‌گذاری در منابع پاک شده است (فریدزاد و همکاران، ۱۴۰۱). از سوی دیگر، وابستگی عمیق اقتصاد ایران به صادرات نفت و گاز، کشور را به‌شدت در برابر نوسانات بازار جهانی انرژی آسیب‌پذیر کرده و مسائل امنیت انرژی را به یکی از دغدغه‌های کلیدی سیاست‌گذاری تبدیل ساخته است.

---

1. Sovacool
2. Bhattacharya

در چنین شرایطی، سیاست‌گذاری مؤثر در حوزه انرژی نیازمند بازنگری در یارانه‌ها، واقعی‌سازی تدریجی قیمت حامل‌های فسیلی و حرکت به سمت تنوع‌بخشی سبد انرژی است. تنها از طریق کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و توسعه منابع تجدیدپذیر می‌توان از یک‌سو اثرات منفی زیست‌محیطی را مهار کرد و از سوی دیگر، ثبات اقتصادی و امنیت انرژی بلندمدت کشور را تضمین نمود.

۲-۱- پیشینه پژوهش

۲-۱-۱- مطالعات خارجی

الگوی مصرف انرژی و گذار به منابع انرژی تجدیدپذیر از مسائل اساسی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه محسوب می‌شود. این الگوها تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر رشد اقتصادی، سیاست‌های انرژی، پیشرفت‌های فناوری و تفاوت‌های ساختاری میان اقتصادها قرار دارند. در این مطالعه، عوامل کلیدی مؤثر بر مصرف کل انرژی، مصرف انرژی فسیلی، شدت مصرف انرژی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفته و تفاوت‌های موجود بین کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه تحلیل شده است.

هانت و همکاران (۲۰۲۴)[1] در مطالعه‌ای بر ۱۷۷ کشور (۲۰۲۰–۱۹۹۰) عوامل مؤثر بر گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر را بررسی کردند. نتایج نشان دادGDP ، قیمت نفت، دسترسی به برق و انتشار CO_2 و متان بر سهم انرژی‌های تجدیدپذیر اثرگذارند. تجارت بین‌المللی سهم تجدیدپذیرها را در مصرف کل انرژی افزایش می‌دهد، اما بر تولید برق اثر معناداری ندارد. این پژوهش بر تفاوت معنادار میان کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه و ضرورت سیاست‌گذاری متناسب با شرایط اقتصادی و نهادی آن‌ها تأکید می‌کند.

گارثیا-آلوارس و همکاران (۲۰۲۳)[2] با داده‌های پانل ۲۸ کشور اتحادیه اروپا (۲۰۱۹–۲۰۰۸) نقش سیاست‌های انرژی در مصرف پایدار را بررسی کردند. نتایج نشان داد مالیات‌های انرژی و توسعه تجدیدپذیرها شدت مصرف انرژی را کاهش داده و قیمت

1. Hunt et al
2. García-Álvarez et al

برق مهم‌ترین عامل کاهش مصرف کل انرژی بوده است. این پژوهش بر لزوم سیاست‌گذاری چندبعدی برای گذار به اقتصاد سبز تأکید می‌کند.

ساکیتی (۲۰۲۳)[1] با داده‌های ۳۵ کشور OECD (۲۰۱۴-۱۹۹۵) نشان داد مالیات‌های زیست‌محیطی در بلندمدت مصرف و شدت انرژی را کاهش می‌دهند و رابطه علی دوطرفه با شاخص‌های انرژی دارند. مالیات‌های مرتبط با انرژی، به‌ویژه مالیات CO_2، بیشترین اثرگذاری را داشته و نقش کلیدی در سیاست‌گذاری انرژی ایفا می‌کنند.

ژائو و قامروززمان (۲۰۲۳)[2] در کشورهای[3] BRI نشان دادند جهانی‌شدن، مصرف انرژی تجدیدپذیر را افزایش و مصرف انرژی تجدیدناپذیر را کاهش می‌دهد. همچنین شهرنشینی با هر دو نوع انرژی رابطه مثبت دارند. آزمون علیت نیز روابط دوطرفه میان جهانی‌شدن، شهرنشینی، رمیتنس‌ها و مصرف انرژی را تأیید کرد. این نتایج بر اهمیت عوامل کلان اقتصادی در سیاست‌گذاری انرژی تأکید دارد.

جین و همکاران (۲۰۲۲)[4] با بررسی ۲۸ کشور دارای بالاترین انتشار CO2 طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷، به مقایسه کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه پرداختند. نتایج نشان داد در همه کشورها رشد اقتصادی و انتشار کربن رابطه علی دوطرفه دارند. در کشورهای توسعه‌یافته، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نیز با رشد اقتصادی رابطه دوطرفه دارد، اما در کشورهای درحال‌توسعه چنین ارتباطی مشاهده نشد.

تاویاه و همکاران (۲۰۲۱)[5] با بررسی ۱۲۳ کشور نشان دادند توسعه اقتصادی رشد سبز را تقویت می‌کند، اما بازبودن تجاری و مصرف کلی انرژی اثر منفی دارند. در مقابل، انرژی‌های تجدیدپذیر اثری مثبت و معنادار بر رشد سبز دارند. نتایج همچنین تفاوت میان کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه را برجسته کرده و بر لزوم سیاست‌گذاری متناسب با سطح توسعه تأکید می‌کند.

1. Sackitey
2. Zhao & Qamruzzaman
3. Countries of the Belt and Road Initiative (BRI)
4. Jin et al
5. Tawiah et al

له و همکاران (۲۰۲۰)[1] با بررسی ۱۰۲ کشور (۲۰۱۲–۱۹۹۶) نشان دادند مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر رشد اقتصادی را تقویت می‌کند، اما انرژی‌های تجدیدناپذیر انتشار آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند. در حالی‌که تجدیدپذیرها تنها در کشورهای توسعه‌یافته باعث کاهش گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. این نتایج بر ضرورت سیاست‌های مؤثرتر در کشورهای درحال‌توسعه برای بهره‌گیری بهینه از انرژی‌های پاک تأکید دارد.

جدول (۱) مروری جامع بر عوامل کلیدی تأثیرگذار بر چهار شاخص اساسی انرژی ارائه می‌دهد. هر یک از این عوامل نقش مهمی در تعیین الگوی مصرف انرژی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ایفا می‌کنند و تحت تأثیر متغیرهایی مانند رشد اقتصادی، سیاست‌های انرژی، پیشرفت‌های فناوری، صنعتی‌سازی و میزان دسترسی به منابع انرژی قرار دارند.

جدول۱. عوامل موثر بر مصرف انرژی های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه

نوع کشور	نوع انرژی	عوامل تأثیرگذار
توسعه‌یافته	فسیلی	سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن و مقررات زیست‌محیطی
		رشد اقتصادی دوطرفه با مصرف انرژی
	تجدیدپذیر	سیاست‌های کاهش کربن و توسعه پایدار
		حمایت دولت، مالیات زیست‌محیطی، بازارهای رقابتی انرژی
		پیشرفت‌های فناوری و بهره‌وری انرژی
در حال توسعه	فسیلی	وابستگی به صنعتی‌سازی و کمبود منابع تجدیدپذیر ارزان
		رشد سریع اقتصادی مبتنی بر انرژی فسیلی
	تجدیدپذیر	هزینه‌های بالا، کمبود زیرساخت و دسترسی محدود به منابع مالی
		فناوری‌های ناکارآمد و شدت بالای مصرف انرژی
		شهرنشینی و جهانی‌شدن در بلندمدت

منبع: یافته‌های پژوهش

1. Le et al

۲-۱-۲- مطالعات انجام شده در ایران

فراهتی و سلیمی (۱۴۰۲) با بررسی ایران نشان دادند کاهش نابرابری درآمد، رشد اقتصادی، بازبودن تجاری و شهرنشینی مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد، در حالی‌که افزایش انتشار CO_2 اثر منفی دارد. این نتایج بر اهمیت سیاست‌های توزیع عادلانه درآمد و حمایت از انرژی‌های پاک در ارتقای پایداری انرژی تأکید می‌کند.

اویسی و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند رشد اقتصادی و شهرنشینی مصرف انرژی را افزایش می‌دهد، در حالی‌که بهره‌وری انرژی و فناوری‌های نوین آن را کاهش می‌دهند. همچنین سیاست‌های دولتی و منابع تجدیدپذیر در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی مؤثرند. این پژوهش بر ضرورت استراتژی‌های پایدار در مدیریت انرژی تأکید می‌کند.

شیدائی حبشی و همکاران (۱۴۰۲) با روش علی-تحلیلی تأثیر ریسک کشور را بر رابطه مصرف انرژی تجدیدپذیر و رشد اقتصادی در ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد این رابطه غیرخطی بوده و سطوح مختلف ریسک می‌توانند شدت و جهت آن را تغییر دهند. همچنین مقادیر آستانه‌ای برای متغیرهای کلیدی تعیین شد که بیانگر نقاط تغییر در اثرگذاری انرژی تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی است. این پژوهش نقش مهم ریسک‌های کشور در شکل‌دهی به ارتباط انرژی و رشد را برجسته می‌سازد.

امامی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل دو آستانه‌ای نشان دادند مصرف انرژی در بخش صنعتی ایران اثر منفی و معناداری بر بهره‌وری کل عوامل (TFP) دارد، به‌ویژه در رژیم‌های TFP پایین. در سطوح بالاتر بهره‌وری، شدت اثر منفی کاهش می‌یابد. همچنین تحلیل ۱۱۰ شاخه صنعتی تفاوت واکنش بخش‌ها را آشکار کرد. نتایج بر ضرورت سیاست‌های مدیریت انرژی متناسب با وضعیت بهره‌وری صنعتی تأکید دارد.

غلامی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه خود تاثیر مصرف انرژی های تجدید پذیر و تجدیدناپذیر را بر شاخص توسعه انسانی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر رابطه همسو و مثبت با شاخص توسعه انسانی دارد. همچنین رابطه بین مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و شاخص توسعه انسانی منفی است.

نوری و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند در ایران مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مستقیماً بر رفاه اقتصادی اثر دارد. GDP سرانه و نیروی کار مصرف انرژی

را افزایش می‌دهند و نابرابری درآمد (ضریب جینی) بر الگوی آن مؤثر است. سرعت تعدیل ۶۱ درصد بیانگر بازگشت سریع اقتصاد پس از شوک‌های انرژی است. همچنین متغیرهای برون‌زا بر رفاه اجتماعی و مصرف انرژی اثر مثبت دارند.

بررسی پیشینه نشان می‌دهد رشد اقتصادی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، شدت مصرف انرژی و سیاست‌های انرژی متغیرهای مشترک در مطالعات کشورهای توسعه‌یافته، درحال‌توسعه و ایران هستند. بهره‌وری انرژی، انتشار کربن و پیشرفت‌های فناوری نیز اهمیت داشته، اما در ایران بیشتر بر چالش‌های ساختاری و اقتصادی آن‌ها تأکید شده است. در ایران متغیرهایی مانند ریسک کشور (شیدائی حبشی و همکاران، ۱۴۰۲) و نابرابری درآمد (فراهتی و سلیمی، ۱۴۰۲) بیشتر بررسی شده‌اند، درحالی‌که عواملی مانند اثر آستانه‌ای مصرف انرژی بر بهره‌وری صنعتی (امامی و همکاران، ۱۴۰۲) بیشتر بر حوزه صنعتی متمرکز بوده‌اند. در مجموع، مطالعات داخلی علاوه بر متغیرهای کلان اقتصادی، به چالش‌های داخلی مانند ضعف زیرساخت، هزینه بالای فناوری‌های پاک و سیاست‌های مالی و تجاری نیز پرداخته‌اند. با این حال، هیچ مطالعه‌ای به‌طور جامع همه شاخص‌های مؤثر بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را بررسی نکرده است. ازاین‌رو، انجام پژوهشی جامع با داده‌های بانک جهانی و روش‌های تحلیل پیشرفته برای شناسایی متغیرهای کلیدی و ترسیم روابط آن‌ها ضروری است.

۳- چارچوب روش‌شناسی

انتخاب داده‌ها یکی از حیاتی‌ترین مراحل در تحلیل سری‌های زمانی است که به طور مستقیم بر دقت، اعتبار و تفسیرپذیری نتایج تأثیر می‌گذارد. در واقع، کیفیت داده‌های ورودی تعیین‌کننده کیفیت خروجی تحلیل است. اگر داده‌ها به درستی انتخاب نشوند، حتی پیشرفته‌ترین الگوریتم‌ها و مدل‌های تحلیل نیز نمی‌توانند نتایج معتبری ارائه دهند. به همین دلیل، دقت و حساسیت در انتخاب داده‌ها باید به عنوان اولویت اول در فرآیند تحلیل سری‌های زمانی در نظر گرفته شود.

از بین تمام ویژگی‌هایی که برای یک دیتاست وجود دارد جامعیت [1] یکی از مهم‌ترین عوامل برای اطمینان از اعتبار نتایج است. بنابراین در انتخاب دیتاست باید

1. Inclusiveness

جامعیت زمانی[1] و جامعیت متغیرها[2] در نظر گرفته شود. دیتاست توسعه بانک جهانی از این ویژگی‌ها برخوردار است که آن را به یکی از معتبرترین منابع برای تحلیل سری‌های زمانی تبدیل کرده است. این دیتاست با پوشش بلندمدت و پیوسته دوره‌های زمانی از سال ۱۹۶۰ تا زمان حال، امکان تحلیل روندهای بلندمدت و تأثیر رویدادهای تاریخی را فراهم می‌کند. همچنین، با دربرگیری بیش از ۱۵۰۰ شاخص اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، تمامی ابعاد توسعه اقتصادی و اجتماعی را پوشش می‌دهد. این جامعیت باعث می‌شود که داده‌های بانک جهانی به عنوان مبنایی قابل اعتماد برای تحلیل‌های چندمتغیره، پیش‌بینی‌های اقتصادی، و مقایسه‌های بین‌المللی مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل، در مطالعه حاضر از شاخص‌های توسعه بانک جهانی برای ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است.

۳-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

بررسی الگوی گمشدگی در داده‌های مورد استفاده نشان داد که شاخص‌های توسعه‌ای پایگاه شاخص‌های توسعه بانک جهانی برای ایران از نوع MAR[3] هستند؛ زیرا عدم گزارش برخی متغیرها معمولاً ناشی از محدودیت‌های نهادی، تغییرات دوره‌ای در نظام گزارش‌دهی، یا نبود داده در سال‌های مشخص است و به مقدار واقعی متغیر وابسته نیست. این ویژگی در مطالعات پیشین نیز برای داده‌های WDI تأیید شده است (لیتل و رابین، ۲۰۱۹). در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین مانند مدل خودرمزگذار برای برآورد مقادیر گمشده و استخراج الگوهای رفتاری داده‌ها مناسب و از نظر نظری کاملاً توجیه‌پذیر است.

شناسایی و مدیریت داده‌های پرت

برای جلوگیری از سوگیری در فرآیند بازسازی، داده‌های پرت شناسایی و مدیریت شدند. ابتدا از معیار بین‌چارکی (Interquartile Range – IQR) استفاده شد. اگر Q_1چارک اول، Q_3چارک سوم باشد:

1. Temporal Inclusiveness پوشش کامل و پیوسته دوره‌های زمانی
2. Variable Inclusiveness شناسایی و انتخاب تمامی متغیرهای تأثیرگذار
3. *Missing At Random*

(۱)

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

باشد، آنگاه هر مشاهده x_iکه در یکی از دو ناحیه‌ی زیر قرار گیرد، به‌عنوان پرت در نظر گرفته شد:

(۲)

$$x_i < Q_1 - 1.5 \times IQR \text{یا} x_i > Q_3 + 1.5 \times IQR$$

در کنار این معیار، الگوهای پرت در بعد زمانی نیز با بررسی نوسانات غیرمتعارف و شکست‌های ساختاری در سری‌های زمانی تحلیل شد. مقادیر پرت ناشی از خطای ثبت یا ناسازگار با روند واقعی، حذف یا در صورت امکان اصلاح شدند تا از تأثیر نامطلوب آن‌ها بر آموزش شبکه جلوگیری شود.

بررسی الگوهای همبستگی میان متغیرها

از آنجا که کارایی خودرمزگذار به وجود ساختار درونی و همبستگی میان متغیرها وابسته است، ماتریس همبستگی بین متغیرها محاسبه شد. ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر xو yبه صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_{xy} = \frac{\mathrm{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (۳)$$

که در آن σ_xو σ_y انحراف معیار و $\mathrm{cov}(x,y)$ کوواریانس دو متغیر است. وجود ضرایب همبستگی معنادار و الگوهای وابستگی ساختاری میان شاخص‌ها تأیید کرد که داده‌ها برای بازسازی مبتنی بر خودرمزگذار مناسب هستند و مدل می‌تواند از این روابط برای تخمین مقادیر گمشده استفاده کند.

استانداردسازی داده‌ها و آموزش مدل خودرمزگذار

پیش از آموزش مدل، تمامی متغیرها در محیط پایتون استانداردسازی شدند تا حساسیت شبکه عصبی نسبت به مقیاس متغیرها کنترل شود. استانداردسازی هر متغیر xبه صورت زیر انجام گرفت:

$$x^{\mathrm{std}} = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (۴)$$

که در آن μ میانگین و σ انحراف معیار متغیر است. این مرحله با هدف تسریع همگرایی الگوریتم یادگیری و بهبود پایداری و دقت بازسازی انجام شد.

مدل خودرمزگذار از یک تابع رمزگذار f_θ و یک تابع بازرمزگذار g_ϕ تشکیل شد که به‌ترتیب داده ورودی x را به نمایش فشرده z و سپس به داده بازسازی‌شده $\hat{x}$ نگاشت می‌کنند:

(۵)

$$z = f_\theta(x), \hat{x} = g_\phi(z)$$

تابع هزینه برای آموزش مدل بر اساس میانگین مربعات خطا (MSE) و تنها بر روی مقادیر مشاهده‌شده تعریف شد. اگر Ω مجموعه شاخص‌های مقادیر مشاهده‌شده باشد، آنگاه:

(۶)

$$L(\theta, \phi) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{i \in \Omega} (x_i - \hat{x}_i)^2$$

پس از بهینه‌سازی پارامترهای مدل و حصول همگرایی، مقادیر گمشده با استفاده از مقادیر بازسازی شده جایگزین شدند؛ به‌گونه‌ای که برای هر مؤلفه:

(۷)

$$x_i^* = \begin{cases} x_i & \text{اگر مشاهده شده است} \\ \hat{x}_i & \text{اگر گمشده است} \end{cases}$$

این رویکرد امکان تخمین مقادیر گمشده را در چارچوبی فراهم می‌کند که هم‌زمان الگوهای غیرخطی، همبستگی‌های چندمتغیره و پویایی‌های زمانی داده‌های انرژی ایران طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ حفظ شود.

۳-۲- محاسبه فاصله و شباهت

در این مطالعه، برای طبقه‌بندی شاخص‌های کلان انرژی شامل شدت مصرف انرژی، مصرف کل انرژی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و مصرف انرژی فسیلی از روش‌های

مبتنی بر فاصله[1] استفاده شده است. این روش‌ها به دلیل توجه به ترتیب زمانی و الگوهای غیرخطی، برای تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت و شناسایی الگوهای پیچیده مصرف انرژی بسیار مناسب هستند. در ادامه به جزئیات کامل هر روش و نحوه استفاده در این مطالعه پرداخته می‌شود.

اندازه‌گیری شباهت در سری‌های زمانی مبنایی برای خوشه‌بندی و طبقه‌بندی این داده‌ها است که وظیفه آن اندازه‌گیری فاصله دو سری زمانی از هم می‌باشد. شباهت سری‌های زمانی نقش مهمی در این روش‌ها برای تحلیل مسیر زمانی ایفا می‌کند. اول، شباهت سری‌های زمانی به عنوان یک معیار مطلق برای استنتاج آماری در مورد رابطه بین سری‌های زمانی مجموعه داده‌های مختلف استفاده شده است (سرا و آرکن، ۲۰۱۴)[2]. در سال‌های اخیر، افزایش جمع‌آوری داده امکان ایجاد داده‌های سری زمانی را فراهم کرده‌است. درحالیکه در چند سال گذشته، وظایفی نظیر رگرسیون، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی و بخش‌بندی برای کار با سری‌های زمانی به کار می‌رفت. در بسیاری موارد، این وظایف نیازمند تعریف یک اندازگیری فاصله بود که میزان شباهت میان سری‌های زمانی را نشان دهد. به همین علت مطالعه انواع روش‌های اندازه‌گیری فاصله میان سری‌های زمانی مهم و ضروری به نظر می‌رسد.

در بین انواع مختلف معیارهای اندازه‌گیری شباهت سری‌های زمانی، معیارهای شباهت را می‌توان به سه دسته معیارهای قدم به قدم، معیارهای کشسان، روش‌های هندسی تقسیم کرد.

معیارهای قدم به قدم شامل فاصله اقلیدسی و همبستگی است. فاصله اقلیدسی اولین تابع فاصله‌ای معیار اندازه‌گیری شباهت میان سری‌های زمانی است که به علت سادگی محاسبات مورد توجه می‌باشد، اما این روش برای زیرمسیرهای با طول برابر به کار می‌رود و از شیفت زمانی محلی تبعیت نمی‌کند. ضریب همبستگی، روشی است برای تخمین اینکه دو متغیر سری زمانی با چه درجه‌ای با هم همبستگی دارند. پیرسون از ۱- تا ۱ است و جای تعجب نیست که ضریب همبستگی پیرسون با فاصله اقلیدسی میان اشکال نرمال ارتباط نزدیک دارد.

1. Distance-based Methods
2. Serra & Arcos

معیارهای کشسان پیچ‌وتاب زمانی پویا[1] (DTW) برخلاف فاصله اقلیدسی در این روش هر نقطه از سری زمانی اول می‌تواند با هر نقطه اختیاری از سری زمانی دوم مقایسه شود به شرطی که اختلافات آن‌ها کمینه باشد، طول بزرگ‌ترین مسیر مشترک[2] (LCSS) این روش تغییر فاصله ویرایش است و ایده اصلی آن این است که با اجازه دادن به کشش دو سری، بدون تغییر ترتیب مجدد عناصر، اجازه می‌دهد که برخی از عناصر بی‌همتا باشند، فاصله ویرایش در توالی واقعی[3] (EDR)، براساس فاصله ویرایش روی رشته‌ها است و با کمی‌سازی فاصله بین یک جفت عنصر با دو مقدار صفر و یک، جلوه‌های نویز را از بین می‌برد)، فاصله ویرایش با مجازات واقعی[4](ERP) (با همراهی L1-norm و فاصله ویرایش، ERP می‌تواند از تغییر زمان محلی پشتیبانی کند و از L1-norm بین دو عنصر غیر شکاف استفاده می‌کند)، فاصله ویرایش پیچ و تاب زمانی[5](TWED) یک معیار تشابه متریک است که اجازه می‌دهد اشکال حتی در مورد محور زمان مطابقت داشته‌باشد.

معیارهای هندسی شامل هاسدورف[6]: سوپریمم کمترین فاصله از نقطه در مجموعه ۱ تا هر نقطه دیگر در مجموعه ۲، فرشت گسسته: حداقل طولی است که برای اتصال سگ و صاحب آن لازم می‌باشد و SSPD [7]: فاصله نقطه از پاره‌خط را برای تمام نمونه-های مسیر مرجع و تمام پاره‌خط‌های مسیر دیگر محاسبه می‌کند و سپس میانگین فاصله را گزارش می‌دهد می‌باشد.

۳-۳- وزن‌دهی براساس اهمیت متغیرها

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی اهمیت متغیرها در شدت انرژی، از رویکردی مبتنی بر تلفیق رتبه‌بندی و میزان تکرار متغیرها در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی استفاده شده است. این روش، امکان ارائه شاخص کمی برای مقایسه اهمیت نسبی متغیرها را فراهم کرده و موجب تمایز متغیرهای کلیدی که در رتبه‌های بالای روش‌های مختلف ظاهر

1. Dynamic time warping
2. Longest common subsequence
3. Edit distance on real sequence
4. Edit distance with real penalty
5. Time warp edit distance
6. Hausdorff
7. SymmetricSegment PathDistance

شده‌اند، از متغیرهایی که تنها به‌صورت پراکنده و در رتبه‌های پایین حضور داشته‌اند، می‌شود.

ابتدا، تعداد دفعاتی که هر متغیر در میان ۷ روش مختلف مشابهت‌یابی ظاهر شده است، محاسبه شده و به‌عنوان شاخصی از میزان پایداری و تأثیرگذاری آن متغیر در روش‌های مختلف در نظر گرفته شده است. به‌منظور تعیین اهمیت متغیرها، وزنی عددی متناسب با رتبه آن‌ها در هر روش اختصاص داده شده است. ازآنجاکه متغیرهای دارای رتبه بالاتر از اهمیت بیشتری برخوردارند، رابطه وزن‌دهی به‌صورت معکوس با رتبه تعریف شده است:

$$W_{i,m} = R_{i.m} - 21 \quad (۸)$$

که در آن:

$R_{i.m}$ رتبه متغیر iدر روش m است.

مقدار ثابت ۲۱ تنظیم شده است تا متغیرهایی که در رتبه ۱ قرار دارند، بیشترین وزن (۲۰) و متغیرهای با رتبه ۲۰، کمترین وزن (۱) را دریافت کنند.

برای دستیابی به وزن نهایی هر متغیر، مجموع وزن‌های اختصاص‌یافته به آن در تمامی روش‌هایی که در آن حضور داشته است، محاسبه شده است:

$$W_i^{total} = \sum_{m=1}^{M} W_{i,m} \quad (۹)$$

سپس، برای استانداردسازی مقادیر و حذف تأثیر تعداد دفعات ظاهر شدن متغیر، میانگین وزن متغیر با تقسیم مقدار کل وزن آن بر تعداد روش‌هایی که در آن ظاهر شده، به‌دست آمده است:

$$W_i^{mean} = \frac{W_i^{total}}{F_i} \quad (۱۰)$$

این روش وزن‌دهی امکان شناسایی متغیرهای کلیدی در تحلیل شدت انرژی را فراهم می‌کند. متغیرهایی که هم فراوانی بالایی دارند و هم وزن بالایی کسب کرده‌اند،

به‌عنوان عوامل تأثیرگذار پایدار شناسایی می‌شوند، درحالی‌که متغیرهایی با فراوانی کم یا رتبه‌های پایین، اهمیت کمتری در مدل‌های تحلیل شدت انرژی دارند.

۴- نتایج

در مطالعه حاضر هفت روش مشابهت‌یابی سری‌های زمانی برای اندازه‌گیری مشابهت متغیرهای توسعه بانک جهانی با دو متغیر کلان انرژی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه ۲۰ متغیر اول با بیشترین مشابهت به متغیرهای انرژی برای هر هفت روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. شاخص‌های به‌دست‌آمده فقط به دلیل شباهت رفتاری با شاخص‌های هدف گروه‌بندی شده‌اند و این پژوهش به‌هیچ‌وجه در پی کشف رابطه علت و معلولی بین متغیرها نیست.

۴-۱- مصرف انرژی تجدیدپذیر

با توجه به نقش حیاتی انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش آلودگی محیط‌زیست و افزایش امنیت انرژی در بسیاری از کشورهای جهان، شناسایی عوامل مرتبط با این نوع انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، ۲۰ شاخصی که بیشترین شباهت را به متغیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارند، بر اساس هفت روش مختلف مشابهت‌یابی رتبه‌بندی شده و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

یکی از نکات برجسته در این جدول، تکرار شاخص‌های آموزشی و جنسیتی در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی است. شاخص‌هایی مانند "ثبت‌نام در مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی "(GPI) و "نسبت جنسی در بدو تولد "که در بیشتر روش‌ها مشاهده می‌شوند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده همبستگی بالای توسعه آموزشی و برابری جنسیتی با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر باشد. به بیان دیگر، کشورهایی که سرمایه‌گذاری بیشتری در آموزش و برابری جنسیتی دارند، به‌طور هم‌زمان در حوزه انرژی‌های پاک نیز فعال‌تر هستند. آموزش یکی از محرک‌های اصلی در افزایش دانش و آگاهی عمومی نسبت به مسائل زیست‌محیطی است. جوامع با آموزش به عنوان سرمایه‌گذاری در سرمایه انسانی، به درک بهتری از پیامدهای استفاده از سوخت‌های فسیلی دست می‌یابند و در واقع این جوامع به استفاده از انرژی‌های پاک‌تر تمایل دارند. به بیانی دیگر جوامعی که سرمایه انسانی قوی‌تری دارند، توان

بیشتری برای توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های نوین و همچنین جذب سرمایه‌گذاری در این حوزه خواهند داشت. به همین دلیل، توسعه آموزش یکی از پیشران‌های اصلی انتقال به اقتصاد کم‌کربن و پایدار به‌شمار می‌رود. شاخص‌های برابری جنسیتی نیز به کررات در جدول ۲ تکرار شده‌اند که گواه نقش حیاتی مشارکت زنان در فرآنید توسعه دارند. دسترسی برابر زنان به فرصت‌های موجود در جوامع به طور غیرمستقیم، پذیرش و گسترش انرژی‌های پاک را تقویت می‌کند. انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) از ساختمان‌ها و زباله‌ها و انتشار متان (CH_4) از بخش انرژی در بسیاری از روش‌ها مشاهده می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که شدت مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به کاهش انتشار آلاینده‌های صنعتی و خانگی مرتبط است. به عبارت دیگر، کشورهایی که میزان آلودگی کمتری دارند یا سیاست‌های کنترل آلاینده‌ها را اجرا می‌کنند، تمایل بیشتری به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارند.

علاوه بر این، بررسی جدول حاکی از آن است که شاخص‌هایی مانند «کمک‌های توسعه‌ای رسمی (ODA) به‌عنوان درصدی از هزینه‌های دولت مرکزی» و «نسبت پرداخت بهره به هزینه‌های دولت» در برخی از روش‌های سنجش شباهت دیده می‌شوند. این موضوع بیانگر آن است که نقش حمایت‌های مالی بین‌المللی و سیاست‌های مالی دولت‌ها در گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر چشم‌گیر است. به‌عبارتی، کشورهایی که از منابع مالی خارجی بهره‌مند هستند، به‌ویژه کمک‌های بین‌المللی، بیشتر به سمت سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و پایدار گرایش پیدا می‌کنند.

از سوی دیگر، وجود منابع طبیعی تجدیدپذیر و کاهش شدت کربن در تولید ناخالص داخلی نیز از عواملی هستند که ارتباط نزدیکی با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. این شاخص‌ها نشان می‌دهند که کشورهایی با مدیریت مؤثر منابع زیست‌محیطی و سیاست‌های کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی، آمادگی بیشتری برای بهره‌گیری از انرژی‌های نو دارند. به‌عبارت دیگر، توسعه پایدار منابع طبیعی و سیاست‌گذاری کربن‌محور از محرک‌های کلیدی در مسیر گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند.

جدول۲. رتبه‌بندی ۲۰ شاخص برتر دارای بیشترین شباهت به متغیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)	نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)	خالص ODA (از %) دریافتی هزینه دولت (مرکزی)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)
ثبت‌نام در مدارس ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	دوره مقدماتی، مدت (سال)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	پرداخت بهره (٪ از هزینه)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)
زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	سرانه مصرف کل الکل (لیتر الکل خالص، تخمین های پیش بینی شده، سن بالای ۱۵ سال)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)
ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	ثبت نام مدرسه، دوره سوم (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	میزان مرگ و میر منتسب به مسمومیت غیر عمد، زن (به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ جمعیت زن)	انرژی جایگزین و هسته ای (درصد کل انرژی مصرفی)

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	خالص ODA (%) دریافتی از هزینه دولت (مرکزی)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	پزشکان (به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)	مساحت زمینی که ارتفاع آن کمتر از ۵ متر است (درصد کل مساحت زمین)
انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از زباله ها (Mt CO2e)	انرژی جایگزین و هسته ای (درصد کل انرژی مصرفی)	دوره مقدماتی، مدت (سال)	ثبت نام مدرسه، دوره سوم (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از زباله ها (Mt CO2e)	میزان مرگ و میر منتسب به آب ناسالم، بهداشت نامناسب و عدم رعایت بهداشت (به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)
ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	هزینه های خارجی سلامت سرانه، PPP (دلار بین المللی جاری)	خالص ODA (از %) دریافتی هزینه دولت (مرکزی)
برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، مرد (٪ از جمعیت مرد)	برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	شیوع لاغری شدید، وزن برای قد (درصد کودکان زیر ۵ سال)	نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)
کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	خالص ODA دریافتی (درصد) واردات کالا، خدمات و (درآمد اولیه	نسبت جنسی در بدو تولد (تولد پسر به ازای تولد دختر)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، مرد (٪ از جمعیت مرد)	کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	زمین روستایی که ارتفاع آن کمتر از ۵ متر است (درصد کل مساحت زمین)

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorff فاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، مرد (٪ از جمعیت مرد)	مساحت زمینی که ارتفاع آن کمتر از ۵ متر است (درصد کل مساحت زمین)	برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	تولید برق از منابع هسته ای (درصد کل)	جمعیت ساکن در مناطقی که ارتفاع آنها زیر ۵ متر است (درصد کل جمعیت)
جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، زن (٪ جمعیت زن)	زمین روستایی که ارتفاع آن کمتر از ۵ متر است (درصد کل مساحت زمین)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، مرد (٪ از جمعیت مرد)	کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، زن (٪ جمعیت زن)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)
شدت کربن تولید ناخالص داخلی (کیلوگرم CO2e در ۲۰۲۱ PPP دلار از تولید ناخالص داخلی)	حواله های شخصی، دریافتی (٪ تولید ناخالص داخلی)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از زباله ها (Mt CO2e)	میزان مرگ و میر منتسب به مسمومیت غیرعمدی (به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، زن (٪ جمعیت زن)	ثبت نام مدرسه، دوره سوم (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	شدت کربن تولید ناخالص داخلی (کیلوگرم CO2e در ۲۰۲۱ PPP دلار از تولید ناخالص داخلی)
جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، زن (٪ جمعیت زن)	جمعیت ساکن در مناطقی که ارتفاع آنها زیر ۵ متر است (درصد کل جمعیت)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، زن (٪ جمعیت زن)	پزشکان (به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)	ثبت نام مدرسه، دوره سوم (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	جمعیت شهری ساکن در مناطقی که ارتفاع آنها زیر ۵ متر است (٪ از کل جمعیت)
صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از زباله ها (Mt CO2e)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، زن (٪ جمعیت زن)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، مرد (٪ از جمعیت مرد)	انجام خالص بدهی ها، کل (٪ تولید ناخالص داخلی)	خالص ODA درصد)دریافتی واردات کالا، خدمات و درآمد (اولیه

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، مرد (٪ از جمعیت مرد)	برداشت سالانه آب شیرین، صنعت (٪ از کل برداشت آب شیرین)	پزشکان (به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)	خالص ODA از %) دریافتی هزینه دولت (مرکزی	دوره مقدماتی، مدت (سال)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	خالص ODA از %) دریافتی تشکیل سرمایه (ناخالص
انتشار گازهای متان (CH4) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	میزان مرگ و میر منتسب به مسمومیت غیرعمدی (به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از زباله ها (Mt CO2e)	شدت کربن تولید ناخالص داخلی (کیلوگرم CO2e در ۲۰۲۱ PPP دلار از تولید ناخالص داخلی)	زمان حل ورشکستگی (سالها)	تخت های بیمارستانی (به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)
انرژی جایگزین و هسته ای (درصد کل انرژی مصرفی)	کارفرمایان، زن (٪ از اشتغال زنان) (تخمین مدل شده ILO)	اجاره مواد معدنی (٪ تولید ناخالص داخلی)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	صرفه جویی تنظیم شده: آسیب انتشار ذرات (٪ GNI)	خالص ODA درصد)دریافتی واردات کالا، خدمات و درآمد (اولیه	شکاف فقر ۲,۱۵ دلار در روز (2017 PPP) (٪)
ثبت نام مدرسه، دوره سوم (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	جمعیت شهری ساکن در مناطقی که ارتفاع آنها زیر ۵ متر است (٪ از کل جمعیت)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، زن (٪ جمعیت زن)	اجاره مواد معدنی (٪ تولید ناخالص داخلی)	انتشار گازهای متان (CH4) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)	صرفه جویی تعدیل شده: کاهش مواد معدنی (٪ GNI)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، مرد (٪ از جمعیت مرد)
واردات کالا از اقتصادهای کم درآمد و متوسط در منطقه (درصد کل واردات کالا)	خالص ODA %) دریافتی از تشکیل سرمایه (ناخالص	شکاف فقر ۳,۶۵ دلار در روز (2017 PPP) (٪)	حواله های شخصی، دریافتی (٪ تولید ناخالص داخلی)	انرژی جایگزین و هسته ای (درصد کل انرژی مصرفی)	میزان مرگ و میر منتسب به مسمومیت غیرعمدی (به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت)	انتشار اکسید نیتروژن (N2O) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)
شدت کربن تولید ناخالص داخلی (کیلوگرم CO2e به ازای ثابت ۲۰۱۵ دلار آمریکا از تولید ناخالص داخلی)	جمعیت ۷۵-۷۹ ساله، مرد (٪ از جمعیت مرد)	جمعیت ۸۰ ساله و بالاتر، مرد (٪ از جمعیت مرد)	کل مصرف الکل سرانه، مرد (لیتر الکل خالص، تخمین‌های پیش‌بینی شده، مردان بالای ۱۵ سال)	رشد جمعیت (سالانه ٪)	زمین های زراعی دائمی (٪ از سطح زمین)	انتشار گازهای متان (CH4) از ساختمان (انرژی) (Mt CO2e)

منبع: یافته‌های پژوهش

نمودار ۲ فراوانی متغیرهای مشابه را نسبت به متغیر مصرف انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل فراوانی متغیرهایی که بیشترین شباهت به مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارند، می‌توان دریافت که این متغیر نه‌تنها تحت تأثیر عوامل زیست‌محیطی، بلکه به شدت به شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و نهادی نیز وابسته است. متغیرهای حوزه آموزش ابتدایی و نسبت ثبت‌نام دانش‌آموزان (پسر/دختر) بیشترین فراوانی در جدول ۲ به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع اهمیت سرمایه انسانی را به عنوان عامل کلیدی در تقاضا برای انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر برجسته می‌کند. توجه به بحث آموزش در جوامع همراه با برابری جنسیتی باعث می‌گردد تا آگاهی عمومی جوامع نسبت به پیامدهای زیست‌محیطی مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر افزایش یابد و همچنین افراد این جوامع رفتار مصرفی مسئولانه‌تر در قبال مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر از خود نشان دهند.

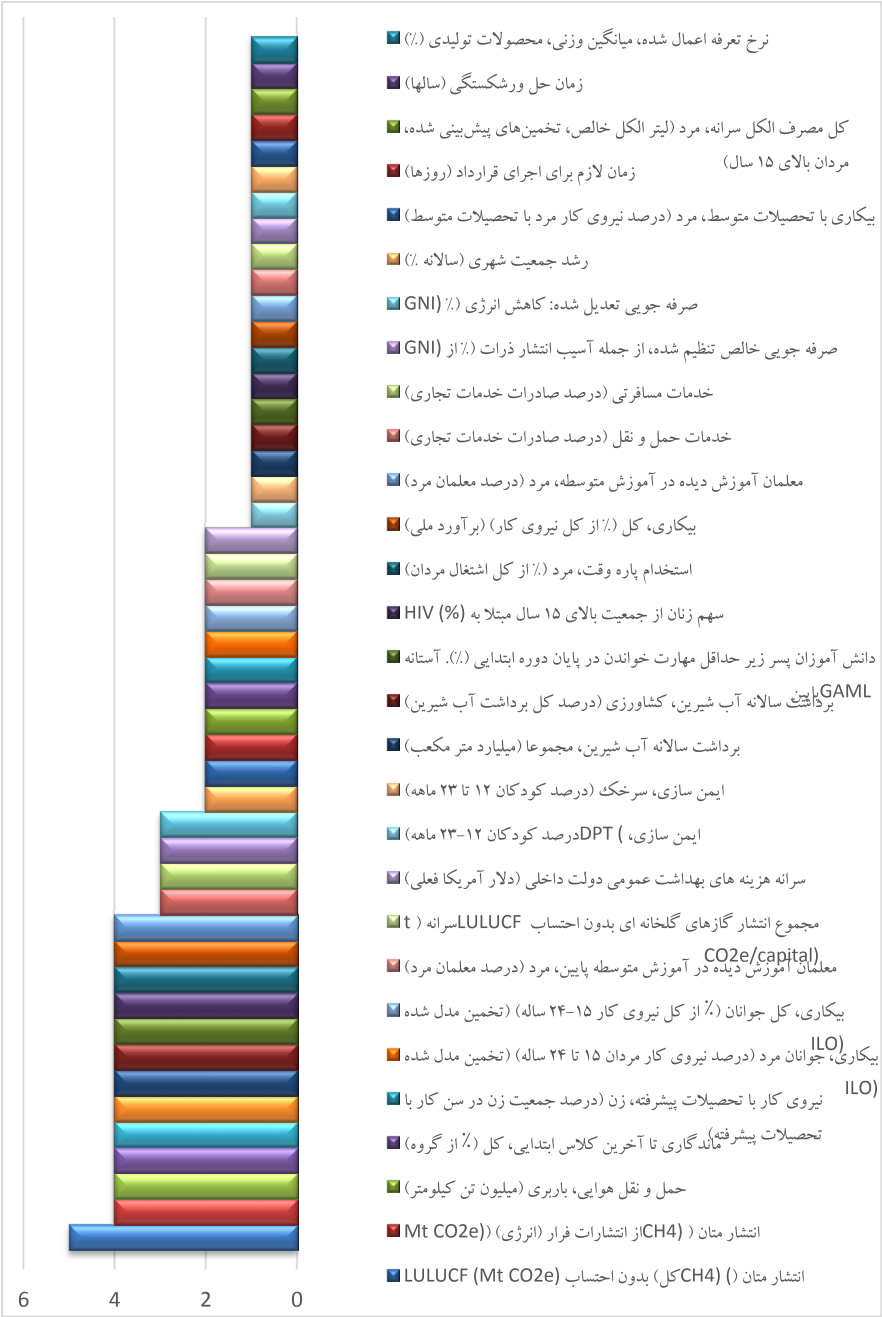
متغیرهای مربوط به سلامت عمومی جامعه (میزان مرگ و میر، ایمن‌سازی (واکسن‌ها)، و سرانه هزینه سلامت) چندین بار در نمودار فراوانی دیده شده‌اند. وجود این متغیرها حاکی از آن است که عموما بهبود سلامت عمومی جامعه در کشورها با سرمایه‌گذاری اجتماعی بالاتر رخ می‌دهد؛ مطالعات نشان می‌دهد چنین جوامعی معمولا تمایل بیشتری به سیاست‌های زیست‌محیطی و انرژی پاک دارند. از سوی دیگر مصرف انرژی‌های پاک باعث افزایش سلامت عمومی جامعه از طریق کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌گردد.

متغیرهایی مانند مصرف کود (درصد و کیلوگرم در هکتار)، میانگین بارش سالانه و منابع آب شیرین داخلی تکرار بالایی دارند. کشاورزی همواره از بخش‌هایی است که ارتباط مستقیمی با مصرف انرژی به ویژه انرژی‌های فسیلی دارد. کشاورزی مدرن وابستگی شدیدی به مصرف سوخت‌های فسیلی دارد، ولی از سوی دیگر بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و آبی در فعالیت‌های کشاورزی از جمله پمپ‌های آب، خشک‌کن‌های خورشیدی، سیستم‌های گرمایش و روشنایی می‌تواند به‌طور مؤثری در کاهش آثار تغییرات اقلیمی و حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار مؤثر باشد.

شاخص‌های محیط‌زیست از جمله انتشار متان(CH_4) ، انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) و شدت کربن از دیگر شاخص‌هایی است که فراوانی بالایی در بین هفت روش

مشابهت‌یابی بررسی شده دارند. کشورهایی که در مسیر کاهش شدت کربن و انتشار آلاینده‌ها گام برمی‌دارند، اغلب به سمت جایگزینی انرژی‌های فسیلی با منابع تجدیدپذیر سوق داده می‌شوند.

متغیرهایی مانند هزینه ناخالص ملی، بیکاری جوانان، اعتبارات داخلی، نرخ تعرفه و زمان اجرای قراردادها در جدول ظاهر شده‌اند. این شاخص‌ها نقش بستر نهادی و ظرفیت اقتصادی را در تسهیل یا مانع‌سازی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهند. به‌ویژه در کشورهایی که دسترسی به منابع مالی، ساختار حقوقی شفاف و سیاست‌های با ثبات دارند، پذیرش فناوری‌های انرژی پاک بیشتر است.



نمودار۲. فراوانی متغیرهای هم رفتار با مصرف انرژیهای تجدیدپذیر در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی

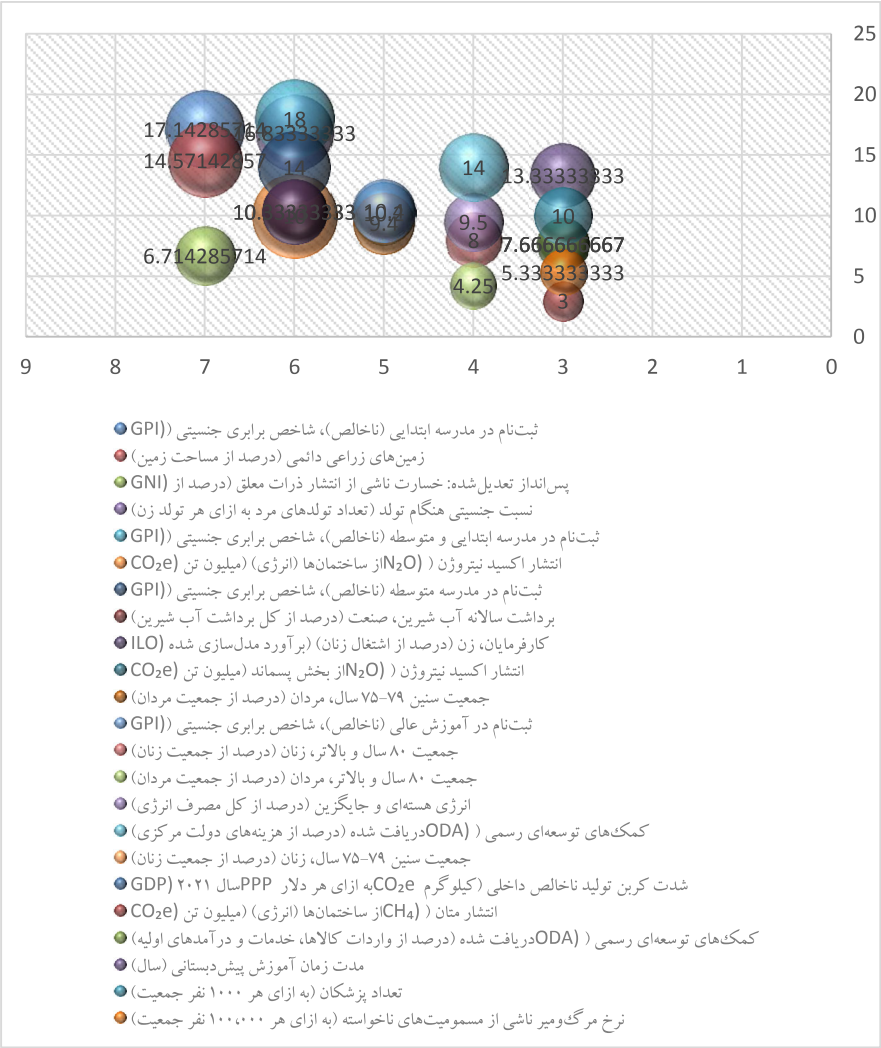
علاوه اهمیت تعداد تکرار متغیر در بین هفت روش موجود، وزن متغیر نیز حائز اهمیت است. منظور از وزن متغیر، رتبه متغیر در بین ۲۰ متغیر دسته‌بندی شده است. هرچه مقدار میانگین وزن یک متغیر بالاتر باشد، اهمیت آن در مدل‌های مختلف بیشتر است. این وزن‌ها بر اساس رتبه‌بندی متغیرها در روش‌های مختلف محاسبه شده‌اند و میزان ارتباط هر متغیر با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهند.

متغیرهای با بالاترین میانگین وزن (بیش از ۱۴) – شاخص‌های آموزشی، کشاورزی و آلودگی بوده‌اند.

مهم‌ترین متغیرهای این گروه شامل:

- ثبت‌نام در مدرسه ابتدایی : ۱۷/۱۴،
- ثبت‌نام در مدرسه ابتدایی و متوسطه : ۱۸،
- نسبت جنسیتی هنگام تولد : ۱۶/۸۳،
- زمین‌های زراعی دائمی (٪ از مساحت زمین) : ۱۴/۵۷ و
- پرداخت‌های بهره (درصد از هزینه‌ها) : ۱۹.

شاخص‌های آموزشی و برابری جنسیتی (GPI) بیشترین وزن را دارند که نشان‌دهنده تأثیر نظام آموزشی و توسعه اجتماعی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر است. همچنین، زمین‌های زراعی دائمی بر اهمیت پایداری منابع طبیعی در گذار به انرژی‌های پاک تأکید می‌کند. از سوی دیگر، پرداخت‌های بهره با وزن بالا نشان می‌دهد که سیاست‌های مالی و هزینه‌های دولتی می‌توانند به‌صورت غیرمستقیم بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر اثرگذار باشند. در این میان، حضور شاخص‌های مرتبط با مصرف الکل احتمالاً ناشی از عوامل اقتصادی و اجتماعی در کشورهای مختلف است، اما ارتباط مستقیمی با انرژی‌های تجدیدپذیر ندارد.



نمودار۳. تحلیل جامع اهمیت نسبی شاخص‌های هم‌رفتار با مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس رتبه و وزن در شش روش مشابهت‌یابی سری‌های زمانی

۴-۲- مصرف انرژی های فسیلی

بررسی متغیرهای مشابه با مصرف انرژی‌های فسیلی در روش‌های مختلف سنجش شباهت نشان می‌دهد که ابعاد گوناگونی از جمله عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، آموزشی و زیرساخت‌های انرژی با این نوع مصرف ارتباط نزدیکی دارند. در این میان،

متغیری که بیشترین تکرار را داشته، تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال‌سنگ است. مسئله‌ای که حاکی از وابستگی گسترده بسیاری از کشورها به سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی الکتریکی است. همچنین، متغیرهایی نظیر هزینه ناخالص ملی، یارانه‌ها و جریان‌های مالی بین دولت و مردم نشان می‌دهند که سیاست‌های اقتصادی می‌توانند نقشی تعیین‌کننده در حفظ یا کاهش وابستگی به این نوع انرژی ایفا نمایند. به‌طور معمول، کشورهایی که بخش قابل توجهی از بودجه خود را صرف یارانه‌های انرژی می‌نمایند، با تأخیر بیشتری به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر حرکت می‌کنند.

از سوی دیگر، متغیرهای مرتبط با محیط‌زیست و منابع آبی نیز نقش مهمی در تبیین مصرف انرژی‌های فسیلی دارند. شاخص‌هایی مانند برداشت سالانه آب شیرین برای مصارف مختلف، تنش آبی و میزان منابع آب تجدیدپذیر در دسته متغیرهای پرکاربرد قرار می‌گیرند. این داده‌ها نشان می‌دهند که کشورهایی با مصرف بالای انرژی‌های فسیلی اغلب برداشت بیشتری از منابع آبی دارند، به‌ویژه در صنایعی مانند کشاورزی یا تولید صنعتی که به آب وابسته‌اند. بنابراین، مدیریت بهینه منابع آبی می‌تواند ابزار مؤثری برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی باشد. همچنین، شاخص‌هایی نظیر دسترسی به برق، فناوری‌های پاک برای پخت‌وپز و خدمات حمل‌ونقل نشان می‌دهند که زیرساخت‌های انرژی ساخته‌شده بر پایه سوخت‌های فسیلی، نقش مهمی در تداوم مصرف این منابع دارند.

علاوه بر عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی، شاخص‌های آموزشی و توسعه انسانی نیز با مصرف سوخت‌های فسیلی در ارتباط هستند. متغیرهایی چون نرخ ثبت‌نام در مدارس، سطح تحصیلات عمومی و مهارت‌های آموزشی نیروی کار از جمله شاخص‌هایی هستند که در تحلیل‌های مشابهت‌یابی برجسته شده و نشان می‌دهند که افزایش سطح آموزش و آگاهی، می‌تواند الگوهای مصرف انرژی را دگرگون نماید. از سوی دیگر، شاخص‌هایی مانند میزان مشارکت نیروی کار، نرخ بقا تا سن سالمندی و امید به زندگی نمایانگر آن هستند که ساختار جمعیتی و کیفیت منابع انسانی نیز بر مصرف انرژی‌های فسیلی تأثیرگذارند. در نهایت، متغیرهایی مانند مصرف کود، شاخص‌های بهره‌وری کشاورزی و سطح تولید زراعی ارتباط بخش کشاورزی را با انرژی‌های فسیلی نشان

می‌دهند؛ چراکه این بخش یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان این نوع انرژی در فرآیندهایی همچون کاشت، آبیاری و حمل‌ونقل محصولات به شمار می‌رود.

جدول۳. رتبه‌بندی ۲۰ شاخص برتر دارای بیشترین شباهت به متغیر مصرف انرژی‌های فسیلی در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)	هزینه ناخالص ملی (درصد تولید ناخالص داخلی)	کامل بودن ثبت ولادت، مرد (درصد)	ثبت نام مدرسه، متوسطه (درصد ناخالص)	هزینه ناخالص ملی (درصد تولید ناخالص داخلی)	تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)	تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)
تولید برق از منابع گاز طبیعی (درصد از کل)	تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)	یارانه و سایر نقل و انتقالات (درصد هزینه)	یارانه و سایر نقل و انتقالات (درصد هزینه)	تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)	افرادی که از خدمات آب آشامیدنی با مدیریت ایمن استفاده می کنند (درصد جمعیت)	هزینه ناخالص ملی (درصد تولید ناخالص داخلی)
واردات کالا از اقتصادهای پردرآمد (درصد کل واردات کالا)	برداشت سالانه آب شیرین، مجموعا (میلیارد متر مکعب)	شیوع مصرف فعلی تنباکو (درصد بزرگسالان)	خدمات بدهی عمومی و تضمین شده عمومی (درصد صادرات کالا، خدمات و درآمد اولیه)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی، دختر (درصد ناخالص)	دسترسی به سوخت‌ها و فناوری‌های پاک برای پخت و پز (درصد جمعیت)	رایانه، ارتباطات و سایر خدمات (درصد صادرات خدمات تجاری)
صادرات کالا به اقتصادهای پردرآمد (درصد کل صادرات کالا)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی، دختر (درصد ناخالص)	زنان باردار تحت مراقبت های دوران بارداری (درصد)	تولید برق از منابع نفت، گاز و زغال سنگ (درصد کل)	نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، پسر (درصد گروه سنی مربوطه)	دسترسی به برق روستایی (درصد جمعیت روستایی)	منابع آب شیرین داخلی تجدیدپذیر، مجموعا (میلیارد متر مکعب)
مصرف کود (کیلوگرم در هکتار زمین زراعی)	بقا تا سن ۶۵ سال، زن (درصد از گروه)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه، مرد (درصد معلمان مرد)	کامل بودن ثبت ولادت، مرد (درصد)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی، پسر (درصد ناخالص)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه، زن (درصد معلمان زن)	بقا تا سن ۶۵ سال، زن (درصد از گروه)

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
نسبت دریافت ناخالص در پایه اول آموزش ابتدایی، کل (درصد گروه سنی مربوطه)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی، پسر (درصد ناخالص)	نرخ ثبت‌نام خالص تعدیل‌شده، ابتدایی، زن (درصد کودکان در سن دبستان)	کامل بودن ثبت ولادت (درصد)	نسبت دریافت ناخالص در پایه اول آموزش ابتدایی، کل (درصد گروه سنی مربوطه)	افرادی که از خدمات آب آشامیدنی با مدیریت ایمن استفاده می کنند، شهری (درصد جمعیت شهری)	مصرف کود (کیلوگرم در هکتار زمین زراعی)
نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، زن (درصد از گروه سنی مربوطه)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (درصد ناخالص)	بدهی کوتاه مدت (درصد صادرات کالا، خدمات و درآمد اولیه)	بیکاری با تحصیلات پایه (درصد کل نیروی کار با تحصیلات پایه)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی (درصد ناخالص)	افرادی که از حداقل خدمات اولیه آب شرب استفاده می کنند، روستایی (درصد جمعیت روستایی)	امید به زندگی در بدو تولد، زن (سال)
نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، پسر (درصد گروه سنی مربوطه)	ارتباطات، کامپیوتر و غیره (درصد صادرات خدمات، BoP)	جمعیت ۶۵ سال و بالاتر (درصد از کل جمعیت)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه، مرد (درصد معلمان مرد)	برداشت سالانه آب شیرین، مجموعا (میلیارد متر مکعب)	میزان تحصیلات، حداقل دوره ابتدایی تکمیل شده، جمعیت بالای ۲۵ سال، مرد (درصد) (تجمیع)	واردات کالا از اقتصادهای پردرآمد (درصد کل واردات کالا)
ثبت نام مدرسه، ابتدایی، پسر (درصد ناخالص)	مصرف کود (کیلوگرم در هکتار زمین زراعی)	پس انداز تعدیل شده: پس انداز ناخالص (درصد از GNI)	مالیات بر تجارت بین المللی (درصد از درآمد)	نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، زن (درصد از گروه سنی مربوطه)	دسترسی به سوخت‌ها و فناوری‌های پاک برای پخت و پز، شهری (درصد جمعیت شهری)	سهم زنان از جمعیت بالای ۱۵ سال مبتلا به HIV (درصد)
ثبت نام مدرسه، متوسطه، پسر (درصد ناخالص)	شاخص تولید زراعی (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	صرفه جویی تعدیل شده: کاهش مواد معدنی (درصد GNI)	زمان صادرات، رعایت مرزها (ساعت)	برداشت سالانه آب شیرین، کشاورزی (درصد کل برداشت آب شیرین)	دسترسی به برق (درصد جمعیت)	امید به زندگی در بدو تولد، کل (سال)
ثبت نام مدرسه، ابتدایی، دختر (درصد ناخالص)	نسبت دریافت ناخالص در پایه اول آموزش ابتدایی، کل (درصد گروه سنی مربوطه)	پیشرفت به دبیرستان، زن (درصد)	نرخ تعرفه، کشور مورد علاقه، متوسط ساده، محصولات تولیدی (درصد)	بقا تا سن ۶۵ سال، زن (درصد از گروه)	افرادی که از حداقل خدمات اولیه آب آشامیدنی استفاده می کنند (درصد جمعیت)	صادرات کالا به اقتصادهای پردرآمد (درصد کل صادرات کالا)
ثبت نام مدرسه،	سطح تنش آب:	شیوع کم	مالیات بر درآمد،	شاخص تولید	دسترسی به	ارتباطات،

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
ابتدایی (درصد ناخالص)	برداشت آب شیرین به عنوان نسبتی از منابع آب شیرین موجود	خونی در زنان در سنین باروری (درصد زنان ۱۵ تا ۴۹ ساله)	سود و عایدی سرمایه (درصد از درآمد)	دام (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	سوخت‌ها و فناوری‌های پاک برای پخت و پز، روستایی (درصد جمعیت روستایی)	کامپیوتر و غیره (درصد صادرات خدمات، BoP)
ثبت نام مدرسه، متوسطه (درصد ناخالص)	نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، پسر (درصد گروه سنی مربوطه)	برداشت سالانه آب شیرین، کشاورزی (درصد کل برداشت آب شیرین)	مراحل راه اندازی برای ثبت کسب و کار، مرد (شماره)	شاخص تولید زراعی (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	افرادی که از حداقل خدمات اولیه بهداشتی استفاده می کنند، شهری (درصد جمعیت شهری)	نرخ باروری نوجوانان (تولد در هر ۱۰۰۰ زن ۱۵ تا ۱۹ ساله)
نرخ مشارکت نیروی کار، مرد (درصد جمعیت پسر بالای ۱۵ سال) (تخمین مدل شده ILO)	رایانه، ارتباطات و سایر خدمات (درصد صادرات خدمات تجاری)	برداشت سالانه آب شیرین، خانگی (درصد از کل برداشت آب شیرین)	بدهی کوتاه مدت (درصد صادرات کالا، خدمات و درآمد اولیه)	شاخص تولید مواد غذایی (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه، زن (درصد معلمان زن)	برداشت سالانه آب شیرین، مجموعا (میلیارد متر مکعب)
سطح تنش آب: برداشت آب شیرین به عنوان نسبتی از منابع آب شیرین موجود	نسبت دریافت ناخالص در کلاس اول آموزش ابتدایی، زن (درصد از گروه سنی مربوطه)	تولد با حضور کارکنان بهداشتی ماهر (درصد از کل)	خدمات حمل و نقل (درصد از صادرات خدمات، BoP)	سطح تنش آب: برداشت آب شیرین به عنوان نسبتی از منابع آب شیرین موجود	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه، مرد (درصد معلمان مرد)	امید به زندگی در بدو تولد، مرد (سال)
برداشت سالانه آب شیرین، کل (درصد از منابع داخلی)	شاخص تولید مواد غذایی (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	نرخ تعرفه، کشور مورد علاقه، میانگین وزنی، محصولات اولیه (درصد)	نرخ ثبت‌نام خالص تعدیل‌شده، ابتدایی، زن (درصد کودکان در سن دبستان)	ارتباطات، کامپیوتر و غیره (درصد صادرات خدمات، BoP)	هزینه ناخالص ملی (درصد تولید ناخالص داخلی)	بقا تا سن ۶۵ سال، مرد (درصد همگروهی)
ثبت نام مدرسه، متوسطه، زن (درصد ناخالص)	شاخص تولید دام (۲۰۱۴-۲۰۱۶ = ۱۰۰)	جمعیت ۱۵-۱۹ ساله، زن (درصد جمعیت زن)	ثبت نام مدارس ابتدایی و متوسطه (ناخالص)، شاخص برابری جنسیتی (GPI)	مصرف کود (کیلوگرم در هکتار زمین زراعی)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه (درصد از کل معلمان)	نسبت وابستگی سنی، جوان (درصد جمعیت در سن کار)

روش اقلیدسی	DTWفاصله	LCSSفاصله	ERPفاصله	Hausdorffفاصه	TWEDفاصله	Fréchetفاصله
نرخ مشارکت نیروی کار، مرد (درصد جمعیت پسر ۱۵ تا ۶۴ ساله) (تخمین مدل شده ILO)	امید به زندگی در بدو تولد، زن (سال)	میزان کسب و کار شاخص افشا (۰ = افشای کمتر تا ۱۰ = افشای بیشتر)	رشد جمعیت روستایی (سالانه درصد)	میزان مرگ و میر، بزرگسال، زن (به ازای هر ۱۰۰۰ زن بزرگسال)	برداشت سالانه آب شیرین، کشاورزی (درصد کل برداشت آب شیرین)	سطح تنش آب: برداشت آب شیرین به عنوان نسبتی از منابع آب شیرین موجود
میزان مرگ و میر در بزرگسال، زن (به ازای هر ۱۰۰۰ زن بزرگسال)	بقا تا سن ۶۵ سال، مرد (درصد همگروهی)	کودکان خارج از مدرسه (درصد سن دبستان)	درآمد، بدون احتساب کمک های مالی (درصد از تولید ناخالص داخلی)	ثبت نام مدرسه، متوسطه، پسر (درصد ناخالص)	معلمان آموزش دیده در آموزش متوسطه (درصد از کل معلمان)	کمک های مالی و سایر درآمدها (درصد از درآمد)
برداشت سالانه آب شیرین، مجموعا (میلیارد متر مکعب)	منابع آب شیرین داخلی تجدیدپذیر، مجموعا (میلیارد متر مکعب)	ثبت نام مدرسه، ابتدایی، پسر (درصد خالص)	نسبت دانش آموز به معلم، متوسطه	امید به زندگی در بدو تولد، زن (سال)	افرادی که از حداقل خدمات اولیه بهداشتی استفاده می کنند (درصد جمعیت)	نرخ مشارکت نیروی کار برای سنین ۱۵ تا ۲۴ سال، مرد (درصد) (تخمین مدل ILO)

منبع: یافته‌های پژوهش

تحلیل نمودارهای مرتبط با متغیرهای مشابه مصرف انرژی‌های فسیلی نشان می‌دهد که این نوع مصرف در تعامل تنگاتنگی با مجموعه‌ای گسترده از شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، منابع آبی، آموزشی و زیرساختی می‌باشد. یافته‌ها حاکی از آن است که کشورهایی با وابستگی بالا به تولید برق از منابعی همچون نفت، گاز و زغال‌سنگ، نه‌تنها سهم بالایی در مصرف انرژی‌های فسیلی دارند، بلکه در سایر حوزه‌های توسعه‌ای نیز الگویی مبتنی بر مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی از خود نشان می‌دهند. شاخص‌هایی مانند میزان مصرف کود شیمیایی، برداشت سالانه آب شیرین و سطح تنش آبی نشان می‌دهند که در کشورهایی با ساختار اقتصادی متکی بر کشاورزی و بهره‌برداری گسترده از منابع طبیعی، مصرف سوخت‌های فسیلی به دلیل وابستگی به ماشین‌آلات، سیستم‌های آبیاری و شبکه حمل‌ونقل سنتی بالاتر است.

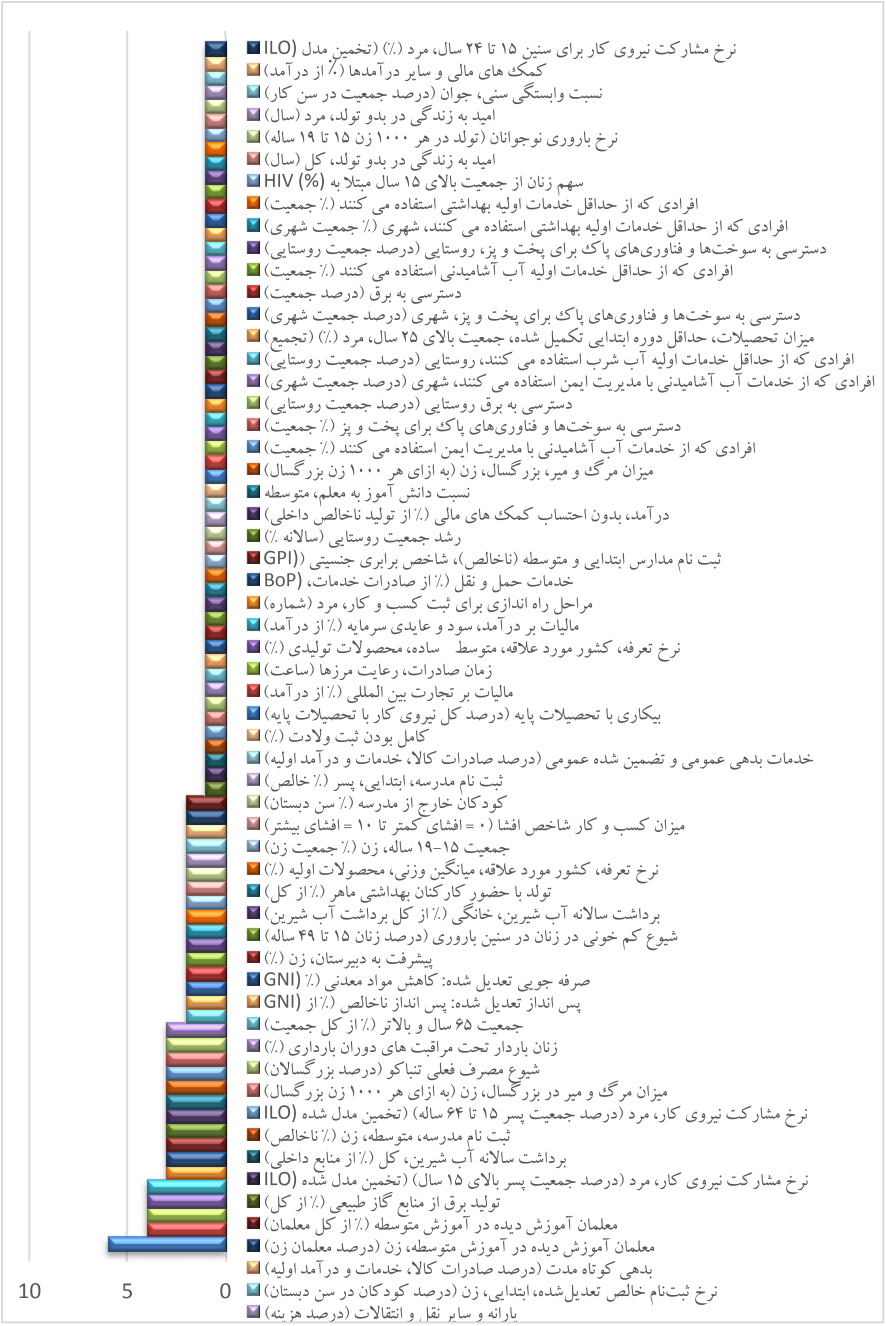
در بُعد اقتصادی، متغیرهایی همچون هزینه ناخالص ملی، یارانه‌های انرژی و نقل‌وانتقالات مالی بیانگر آن هستند که سیاست‌های مالی دولت‌ها نقش چشم‌گیری در حفظ یا تقویت مصرف انرژی‌های فسیلی دارند. به‌ویژه در کشورهایی که بخشی از

هزینه‌های عمومی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به حمایت از مصرف انرژی فسیلی اختصاص می‌یابد، گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر کندتر انجام می‌شود. همچنین، شاخص‌های مرتبط با تجارت بین‌المللی از جمله میزان واردات و صادرات کالاهای انرژی‌بر نشان می‌دهند که ساختارهای اقتصادی صادرات‌محور غالباً به مصرف بالاتر انرژی‌های فسیلی برای تولید، حمل‌ونقل و فرآوری وابسته می‌باشد.

ابعاد اجتماعی و آموزشی نیز در تبیین مصرف انرژی‌های فسیلی نقش دارند. متغیرهایی مانند نرخ ثبت‌نام در مقاطع ابتدایی و متوسطه، سطح تحصیلات نیروی کار، مشارکت اقتصادی، امید به زندگی و نرخ بقا تا سن سالمندی نشان می‌دهند که سرمایه انسانی توسعه‌یافته می‌تواند بستر مناسبی برای اصلاح الگوهای مصرف انرژی فراهم کند. به‌عبارتی، جوامعی که در آموزش و بهبود شاخص‌های سلامت سرمایه‌گذاری کرده‌اند، آمادگی بیشتری برای پذیرش و توسعه فناوری‌های پاک دارند.

از منظر زیرساختی، عواملی نظیر دسترسی به برق، استفاده از سوخت‌های پاک در پخت‌وپز، سطح توسعه حمل‌ونقل و سیاست‌های تجاری مرتبط، نشان می‌دهند که زیرساخت‌های انرژی چگونه می‌توانند مصرف سوخت‌های فسیلی را تشدید یا تعدیل کنند. در کشورهایی که زیرساخت‌های جایگزین فراهم نیست، نیاز به انرژی فسیلی همچنان غالب باقی می‌ماند. افزون بر این، شهرنشینی سریع و صنعتی‌سازی بدون درنظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، ساختارهای تولید و مصرف را به‌شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته می‌سازد.

در مجموع، الگوی مصرف انرژی‌های فسیلی صرفاً نتیجه فناوری یا منابع طبیعی در دسترس نیست، بلکه بازتابی از نظام‌های اقتصادی، ساختارهای اجتماعی، سطح توسعه زیرساخت‌ها و جهت‌گیری‌های سیاست‌گذاری در هر کشور است. کشورهایی که درگیر اقتصاد یارانه‌ای، کشاورزی انرژی‌بر و شبکه‌های حمل‌ونقل فسیلی هستند، وابستگی بیشتری به این منابع دارند. در مقابل، کشورهایی که به تقویت آموزش، بهینه‌سازی سلامت عمومی، ارتقای زیرساخت‌ها و حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌پردازند، مسیر روشنی برای کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و حرکت به سوی توسعه پایدار در پیش دارند.



نمودار۴. فراوانی متغیرهای هم رفتار با مصرف انرژیهای فسیلی در روش‌های مختلف مشابهت‌یابی

نمودار۵. تحلیل جامع اهمیت نسبی شاخص‌های هم‌رفتار با مصرف انرژیهای فسیلی بر اساس رتبه و وزن در شش روش مشابهت‌یابی سری‌های زمانی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی جامع‌تر نسبت به مطالعات پیشین، ارتباط مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی را با متغیرهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، نهادی و زیرساختی بررسی کرده است. برخلاف مطالعاتی که بر متغیرهای محدودی چون نابرابری درآمد (فراهتی و سلیمی، ۱۴۰۲)، ریسک کشور (شیدایی حبشی و همکاران، ۱۴۰۲) یا رابطه خطی انرژی و رشد (نوری و همکاران، ۱۴۰۰) متمرکز بودند، این پژوهش با مشابهت‌یابی سری‌های زمانی و داده‌های بانک جهانی تصویری چندبعدی

ارائه داده است. همچنین، در حالی‌که بیشتر مطالعات پیشین بر رویکردهای سنتی اقتصادسنجی و تحلیل تک‌بعدی تکیه داشتند، این پژوهش نشان داده عوامل مصرف انرژی در تعامل پیچیده با آموزش، زیرساخت، تنش آبی، سیاست‌های مالی و شدت کربن GDP قرار دارند. یافته‌ها نیز همسو با مطالعاتی چون جان و کورکماز (۲۰۱۹) و گارسیا آلوارز و همکاران (۲۰۲۳) بر نقش سیاست‌های حمایتی و فناوری در گذار انرژی تأکید داشته، اما دامنه‌ای گسترده‌تر از متغیرهای نهادی، جمعیتی و تجاری را پوشش داده است.

این مطالعه با پرکردن شکاف‌های مفهومی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، چارچوبی نوین برای شناسایی متغیرهای مشابه و اثرگذار بر مصرف انرژی ارائه کرده است. بااین‌حال، محدودیت‌هایی چون عدم انجام آزمون‌های استحکام (مانند تقسیم‌بندی دوره‌ها یا داده‌های جایگزین) باقی است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی این آزمون‌ها را لحاظ کرده و تحلیل‌ها را در سطوح منطقه‌ای، بخشی (صنعت، کشاورزی، حمل‌ونقل) و خانوارمحور گسترش دهند. همچنین، استفاده از مدل‌های پویا مانند VAR یا TVP-VAR می‌تواند اثر شوک‌های بیرونی (تحریم، قیمت نفت، اصلاح یارانه، بحران اقتصادی) را بهتر کنترل کند. مدل‌های علّی ساختاری یا یادگیری ماشین علّی نیز برای فهم دقیق‌تر روابط پیشنهاد می‌شوند.

در شرایط فعلی ایران با چالش‌هایی چون وابستگی به سوخت‌های فسیلی، بحران برق و پیامدهای زیست‌محیطی، بازنگری سیاست‌های انرژی ضروری است. یافته‌ها نشان می‌دهد ادامه پرداخت یارانه به انرژی‌های آلاینده منجر به اتلاف منابع و مانعی در مسیر توسعه انرژی‌های پاک است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود منابع مالی از حمایت گسترده سوخت‌های فسیلی به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تجدیدپذیر، فناوری‌های پاک و آموزش انرژی پایدار منتقل شود. آموزش باید چندلایه باشد: گنجاندن مفاهیم در مدارس و دانشگاه‌ها، ایجاد دوره‌های تخصصی برای تکنسین‌ها و کارآفرینان محلی و کمپین‌های عمومی برای فرهنگ‌سازی. این رویکرد علاوه بر افزایش دانش و تغییر نگرش، زمینه اشتغال تخصصی و گذار به انرژی پایدار را فراهم می‌کند.

همچنین کاهش تدریجی یارانه‌های سوخت‌های فسیلی همراه با مشوق‌های مالیاتی، تسهیلات بانکی و تضمین‌های دولتی برای پروژه‌های پاک، می‌تواند الگوی

مصرف را اصلاح کند. توجه ویژه به استان‌های پرمصرف یا کمبود برق (مانند مناطق گرم‌سیر و صنعتی) و احداث نیروگاه‌های محلی خورشیدی و بادی امنیت انرژی و کاهش وابستگی به شبکه‌های سراسری را تقویت خواهد کرد. سرمایه‌گذاری در آموزش‌های تخصصی و عمومی نیز توانمندسازی نیروی انسانی، بومی‌سازی فناوری و پذیرش اجتماعی انرژی‌های پاک را تسهیل می‌کند.

در مجموع، چنین اصلاحات سیاستی می‌تواند شدت کربن اقتصادی را کاهش دهد، تاب‌آوری انرژی و توان مقابله با بحران‌های اقلیمی و ژئوپلیتیکی را افزایش دهد و ایران را در مسیر توسعه پایدار قرار دهد.

منابع

- فراهتی، محبوبه و سلیمی، لیلا (۱۴۰۲). اثر نابرابری درآمد بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. فصلنامه برنامه ریزی و بودجه، ۲۸(۱)، ۷۷-۹۵.
- نورانی، اکرم، رحیمی، محمود، و میرباقری جم، محمد (۱۴۰۰). بررسی تأثیر مصرف انواع انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر رفاه اقتصادی در ایران. نشریه انرژی های تجدیدپذیر و نو، ۹(۱)، ۶۱-۶۸.
- شیدائی حبشی، اکبر، صادقی، سید کمال، و بهبودی، داود (۱۴۰۲). بررسی تأثیر ریسک‌های کشوری در رابطه بین مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و رشد اقتصادی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۲(۴۷)، ۷۹-۱۰۰.
- اویسی، محمد، همایونی فر، مسعود، مصطفوی، سید مهدی، و ناجی میدانی، علی اکبر (۱۴۰۰). اثر تغییرات بهره‌وری بخش‌های اقتصادی بر مصرف انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، انرژی گرمایی، رشد و توسعه اقتصادی. مدلسازی اقتصادی، ۱۵(۵۴)، ۶۷-۷۶.
- امامی، سید علی، ابطحی، سید یحیی، طباطبایی نسب، زهره، و دهقان تفتی، محمد علی (۱۴۰۲). تحلیل پویایی‌های مصرف انرژی و بهره‌وری کل عوامل تولید در بخش صنعت ایران. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۲(۴۶)، ۴۳-۶۸.
- مجدزاده طباطبایی، شراره، هادیان، ابراهیم و زیبایی، منصور . (۱۳۹۴). تعیین میزان یارانه مناسب جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از یک الگوی تعادل عمومی قابل محاسبه با رهیافت تلفیقی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران ۵(۱۷), ۱۲۹-۱۶۷.
- محمدی ده چشمه، مصطفی، صفایی پور، مسعود، سجادیان، ناهید و عبادی، حسین (۱۴۰۳). امکان‌سنجی توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر شهری اهواز با رویکرد دفاع غیرعامل. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۵(۱)، ۱۹-۴۴.
- سلیمی، لیلا ، مستولی زاده، سید محمد و فراهتی، محبوبه . (۱۴۰۲). بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. سیاست ها و تحقیقات اقتصادی ، ۲(۳)، ۱-۲۰.

- محمدیان، فرشته، و اسماعیلی، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی تاثیرحکمرانی خوب و رشد اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر: شواهدی از مجمع کشورهای صادرکننده گاز. سیاست ها و تحقیقات اقتصادی، ۳(۲)، ۱-۲۹.
- ذیاب سالم، انس، قبادی، عبد الرزاق، و دائی کریم زاده. (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر سرمایه‌گذاری زیر ساخت منابع تجدید پذیر، سرمایه انسانی و پایداری محیط‌زیست بر مصرف انرژی های تجدید پذیردر کشورهای نفت خیز حوزه خلیج فارس. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵(۵۸)، ۵۰۴-۵۲۱.
- فریدزاد، علی، جهانگرد، اسفندیار و اسدی، ثریا . (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات تولید ناشی از افزایش قیمت بنزین در بخش‌های اقتصادی ایران: مقایسه الگوی استاندارد و الگوی غیرخطی عرضه محور گش. اقتصاد و الگو سازی، ۱۳(۴)، ۲۹-۶۲.
- غلامی، آرین، نیکپور، ساغر، و میرکی، فائزه. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر شاخص توسعه انسانی در ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۹(۷۸)، ۶۹-۱۰۱.
- Caruso, G., Colantonio, E., & Gattone, S. A. (2020). Relationships between renewable energy consumption, social factors, and health: A panel vector auto regression analysis of a cluster of 12 EU countries. Sustainability, 12(7), 2915.
- Dabboussi, M., & Abid, M. (2022). A comparative study of sectoral renewable energy consumption and GDP in the US: Evidence from a threshold approach. Renewable Energy, 192, 705-715.
- Ebhota, W. S., & Jen, T. C. (2020). Fossil fuels environmental challenges and the role of solar photovoltaic technology advances in fast tracking hybrid renewable energy system. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 7, 97-117.
- García-Álvarez, M. T., Pineiro-Villaverde, G., & Soares, I. (2023). Renewables, taxes and competitive markets: the role of energy policies on the EU's sustainable energy consumption. Environment, Development and Sustainability, 1-22.
- Huang, Y., Ahmad, M., & Ali, S. (2022). The impact of trade, environmental degradation and governance on renewable energy consumption: Evidence from selected ASEAN countries. Renewable Energy, 197, 1144-1150. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.042

- Hunt, L. C., Kipouros, P., & Lamprakis, Z. (2024). The drivers of renewable energy: a global empirical analysis of developed and developing countries. Energies, 17(12), 2902.
- Jin, L., Chang, Y. H., Wang, M., Zheng, X. Z., Yang, J. X., & Gu, J. (2022). The dynamics of CO2 emissions, energy consumption, and economic development: evidence from the top 28 greenhouse gas emitters. Environmental Science and Pollution Research, 29(24), 36565-36574.
- Kolosok, S., Bilan, Y., Vasylieva, T., Wojciechowski, A., & Morawski, M. (2021). A scoping review of renewable energy, sustainability and the environment. Energies, 14(15), 4490.
- Le, T., Chang, Y., & Park, D. (2020). Renewable and nonrenewable energy consumption, economic growth, and emissions: international evidence. The Energy Journal, 41(2), 73-92. https://doi.org/10.5547/01956574.41.2.thle
- Lin, B., Omoju, O. E., & Okonkwo, J. U. (2016). Factors influencing renewable electricity consumption in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 687-696.
- Polcyn, J.; Us, Y.; Lyulyov, O.; Pimonenko, T.; Kwilinski, A. Factors Influencing the Renewable Energy Consumption in Selected European Countries. Energies 2022, 15, 108. https://doi.org/ 10.3390/en15010108
- Ponce, P., Álvarez-García, J., Medina, J., & del Río-Rama, M. C. (2021). Financial Development, Clean Energy, and Human Capital: Roadmap towards Sustainable Growth in América Latina. Energies, 14(13), 3763. https://doi.org/10.3390/en14133763
- Sackitey, G. L. (2023). Do environmental taxes affect energy consumption and energy intensity? An empirical analysis of OECD countries. Cogent Economics & Finance, 11(1), 2156094.
- Tawiah, V., Zakari, A., & Adedoyin, F. F. (2021). Determinants of green growth in developed and developing countries. Environmental Science and Pollution Research, 28(29), 39227-39242.
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy policy, 35(5), 2683-2691.
- Zhao, L., & Qamruzzaman, M. (2022). Do urbanization, remittances, and globalization matter for energy consumption in belt and road countries: Evidence from renewable and non-renewable energy consumption. Frontiers in Environmental Science, 10, 930728.
- Cameron, L., Van Der Zwaan, B., 2015. Employment factors for wind and solar energy technologies: a literature review. Renew. Sustain. Energy Rev. 45, 160–172.

- Hdom, H.A., 2019. Examining carbon dioxide emissions, fossil & renewable electricity generation and economic growth: evidence form a panel of South American countries. Renew. Energy 139, 186–197.
- Burke, P.J., Widnyana, J., Anjum, Z., Aisbett, E., Resosudarmo, B., Baldwin, K.G.H., 2019. Overcoming barriers to solar and wind energy adoption in two Asian giants: India and Indonesia. Energy Pol. 132 (July), 1216–1228.
- Sovacool, B. K. (2017). Reviewing, reforming, and rethinking global energy subsidies: Towards a political economy research agenda. Ecological Economics, 135, 150–163.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. Applied Energy, 162, 733–741.
- Serra, J., & Arcos, J. L. (2014). An empirical evaluation of similarity measures for time series classification. Knowledge-Based Systems, 67, 305-314.
- Little, R. J. A., & Rubin, D. B. (2019). Statistical Analysis with Missing Data. Wiley.

Identification of Co-Behavior Factors Associated with Renewable and Fossil Energy Consumption in Iran

Mahdi Goldani [1]
Associate Professor of Economics, Hakim Sabzevari University, Iran, (m.goldani@hsu.ac.ir)

Received: 2025/10/23 Accepted: 2026/01/18

Abstract

The consumption of renewable energy, as a key pillar of achieving sustainable development, reducing environmental risks, and enhancing the resilience of the national energy system against climate and infrastructure crises, has gained increasing significance. In Iran, given the intensification of electricity blackouts, severe air pollution, and growing pressure on energy networks, the need for comprehensive, data-driven analysis of the factors influencing renewable energy consumption is felt more than ever. This study, using long-term World Bank data and seven advanced time series similarity-matching methods, identifies and ranks the key variables co-behaving with renewable and fossil energy consumption in Iran. The findings reveal that renewable energy consumption is not solely dependent on environmental indicators but is directly influenced by a set of educational, gender-related, economic, institutional, and infrastructural variables. In contrast, fossil energy consumption is tied to factors such as subsidy-based support structures, weaknesses in infrastructure modernization, and the intensive exploitation of natural resources. By offering a multidimensional picture of the influencing variables, this research can serve as an effective guide for policymakers in designing reform packages, allocating targeted resources, and formulating national energy strategies.

JEL Classification: Q2, Q3, Q5, C38.

Keywords: Renewable energy, energy consumption, time series similarity, energy policy, electricity crisis in Iran.

1. Corresponding Author