

Prioritizing the Interrelationships of the Share of Renewable Energy Sources in Sustainable Development

Amrollah Amini *

Assistant Professor, Department of Islamic Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Hassan Amoozadeh Khalili 

Ph.D., Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

Abstract

Today, energy demand has increased as a result of population growth around the world. Due to the limited fossil energy resources and the problems caused by greenhouse gas emissions, it is necessary to pay more attention to renewable energy, because in this way, the goals of sustainable development can be achieved. Therefore, the purpose of this study is to properly evaluate the performance of renewable energy technologies and also to investigate the relationship between renewable energy, carbon dioxide emissions, and sustainable development in Iran and compare it with non-renewable energy. In order to rank renewable energy carriers and identify the best type of them for electricity generation in Iran, a multi-criteria decision model has been used. In this regard, by conducting library studies and collecting the opinions of experts, a set of criteria in the form of four technical, economic, social, and environmental dimensions has been determined. Then, using the VIKOR approach, renewable energies consisting of wind, hydropower, solar, biomass, and geothermal energies are discussed. Findings indicate a high priority of wind energy and solar, hydropower, geothermal and biomass are in the next ranks. The results indicate that the effect of positive momentum on the share of renewable and non-renewable energy on sustainable development in Iran is positive.

Keywords: Renewable Energy, Sustainable Development, Prioritization, VIKOR.


JEL Classification: L94 , Q01 , O25


* Corresponding Author: a.aminij@atu.ac.ir

How to Cite: Amini, A., Amoozadeh Khalili, H. (2021). Prioritizing the Interrelationships of the Share of Renewable Energy Sources in Sustainable Development, Iranian Energy Economics 38 (10), 65-95.



الویت‌بندی روابط متقابل سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در توسعه پایدار

امراه امینی*  استادیار گروه اقتصاد اسلامی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

حسن عموزاده خلیلی  فارغ‌التحصیل دوره دکتری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

چکیده

امروزه در نتیجه افزایش جمعیت در سراسر جهان تقاضای انرژی افزایش یافته است. با توجه به محدود بودن منابع انرژی فسیلی و مشکلات ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجه بیش از پیش به انرژی‌های تجدیدپذیر ضرورت دارد، زیرا از این طریق می‌توان به اهداف توسعه پایدار دست یافت. بنابراین هدف پژوهش حاضر، ارزیابی مناسب از عملکرد تکنولوژی‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز بررسی روابط بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انتشار دی‌اکسید کربن و توسعه پایدار در ایران و مقایسه با انرژی‌های تجدیدناپذیر است. به منظور رتبه‌بندی حامل‌های انرژی تجدیدپذیر و شناسایی بهترین نوع آنها جهت تولید برق در ایران از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. در این راستا با انجام مطالعات کتابخانه‌ای و جمع‌آوری نظرات خبرگان، مجموعه‌ای از معیارها در قالب چهار بعد فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تعیین گردیده است. در ادامه با استفاده از رویکرد VIKOR به اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر متشکل از انرژی‌های بادی، برق آبی، خورشیدی، زیست توده و زمین گرمایی پرداخته شده است. یافته‌های پژوهش بیانگر اولویت بالای انرژی بادی بوده و انرژی‌های خورشیدی، برق آبی، زمین گرمایی و زیست توده در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند. نتایج حاکی از آن است که تأثیر ایجاد تکانه مثبت در سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر بر توسعه پایدار در ایران مثبت است.

کلیدواژه‌ها: انرژی تجدیدپذیر، توسعه پایدار، الویت‌بندی، VIKOR

طبقه‌بندی JEL: O25 , Q01 , L94

۱. مقدمه

با توجه به توسعه پرشتاب اقتصاد جهانی، تقاضای انرژی به ویژه در کشورهای در حال توسعه افزایش یافته است، در این میان، انرژی الکتریسیته از جمله حامل‌های انرژی بسیار پرکاربرد بوده که در فرآیند توسعه نقش قابل توجهی دارد. منابع سوخت فسیلی مورد نیاز برای تولید برق پایان‌پذیر بوده و نیز تغییرات آب و هوا به آلاینده‌های کربنی مرتبط می‌باشد بنابراین پایان‌پذیری این منابع و آلودگی‌های زیست محیطی موجب افزایش توجهات به صرفه‌جویی انرژی و حفظ محیط زیست شده است. اولین راه‌حل برای کاهش وابستگی به منابع فسیلی، کاهش مصرف انرژی با به‌کارگیری برنامه‌های صرفه‌جویی انرژی است که به کاهش تقاضای انرژی و کارایی انرژی در صنعت و حوزه‌های داخلی تمرکز دارد. دومین راه‌حل جهت دستیابی به این هدف استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید انرژی در مقیاس بزرگ است (ژو و همکاران^۱، ۲۰۱۰). انرژی که از منابع طبیعی همچون نور خورشید، باد، باران، جزر و مد دریاها و انرژی مرکزی زمین به دست می‌آید، انرژی تجدیدپذیر نامیده می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر در سطوح جغرافیایی وسیعی وجود دارد، این در حالی است که منابع انرژی تجدیدناپذیر در تعداد محدودی از کشورها متمرکز شده‌اند به‌کارگیری سریع انرژی تجدیدپذیر و تنوع تکنولوژیکی منابع انرژی، امنیت انرژی و منافع اقتصادی را در پی دارد (شیلپا^۲، ۲۰۱۵). کاهش سریع منابع انرژی تجدیدناپذیر، کمیابی آنها، هزینه‌های فزاینده تولید و استفاده از این‌گونه منابع و آلودگی‌های زیست‌محیطی آنها دلایلی هستند که اهمیت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را به منظور محافظت جوامع از اثرات گازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه ازن و آلودگی هوا که موجب باران اسیدی و گرد و غبار می‌شوند، افزایش می‌دهد. به تازگی استخراج «نفت شیل» و «گاز شیل» به عنوان راه‌حلی جهت کاهش استفاده از ذخایر فسیلی مطرح شده است، با وجود توجه روزافزون به نفت و گاز شیل به عنوان جایگزینی برای ذخایر سوخت‌های فسیلی، فرآیندهای استخراج آن موجب افزایش اثرات منفی زیست‌محیطی همچون گرم شدن زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر بر آبهای زیرزمینی می‌شود. به طور کلی براساس گزارش انوی^۳ (۲۰۱۱) می‌توان گفت که اثرات

1. Zhou
2. Shilpa
3. ENVI

نامطلوب زیست‌محیطی و هزینه بالای تولید نفت و گاز شیل از موانع عمده در توسعه صنعت شیل به شمار می‌رود. در مقابل، منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابع انرژی پاک، مشکلات زیست‌محیطی کمتری در مقایسه با سوخت‌های فسیلی و نفت و گاز شیل ایجاد می‌کنند. بزرگترین مزیت منابع تجدیدپذیر، برطرف کردن آلودگی‌های دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید سولفور و آلودگی‌های نیتروژنی است. همچنین ویژگی پایان‌ناپذیری این منابع و وجود آنها در همه جوامع، عرضه انرژی باثبات‌تری را فراهم می‌کند. بنابراین اینکه منابع تجدیدپذیر می‌توانند ارتباطی بین حفاظت محیط زیست و رشد اقتصادی برقرار نمایند، ضرورت توجه به این منابع را دو چندان می‌کند (صادقی و خاکسار، ۱۳۹۳).

در مطالعه حاضر، تلاش شده است تا کاستی‌های موجود در مطالعات گذشته برطرف شود. بنابراین، مهم‌ترین جنبه‌های نوآوری در این تحقیق به شرح زیر است: اول، برای رتبه‌بندی فناوری‌های برق تجدیدپذیر از تکنیک VIKOR استفاده شده است تا بتوان به طور هم‌زمان از معیارهای کمی و کیفی برای ارزیابی گزینه‌ها بهره برد؛ دوم، از شاخصی کارآمد برای بیان توسعه پایدار استفاده شده است؛ سوم، مصرف انرژی به دو گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تفکیک شده تا بررسی شود که روابط بین توسعه پایدار، آلودگی هوا و مصرف انرژی به تفکیک انواع متفاوت انرژی چگونه است؛ و همچنین، از روش خودرگرسیون برداری بیزین^۱ استفاده شده است تا با رفع مشکل محدودیت داده و وفور پارامتر در مدل‌های خودرگرسیون برداری نامقید بررسی شود که انواع مختلف مصرف انرژی چگونه بر توسعه پایدار در ایران تأثیرگذار است.

۲. مبانی نظری تحقیق

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی موجب ترغیب دولت‌ها به حمایت از ترکیب وسیعی از انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های انرژی به وسیله تنظیم استانداردهای انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ یا سیاست‌های مشابه شده است. با توجه به تغییرات جهانی اقلیم، منطقه غرب آسیا یکی از حساس‌ترین مناطق شناخته شده است. اطلاعات ثبت شده جهانی نشان می‌دهد که دما در طول ۳۵ سال گذشته در این منطقه حداقل ۱ درجه افزایش یافته است. برنامه

1. Bayesian Vector AutoRegression (BVAR)

2. Renewable portfolio standard (RPS)

اهداف مورد نظر مشارکت ملی^۱ سال ۲۰۱۵، بعضی از اثرات احتمالی تغییر اقلیم در ایران را شامل افزایش دما، کاهش مقدار آب برگشت‌پذیر، کاهش سطح روان آب‌ها، افزایش روند خشک شدن تالاب‌ها، افزایش نقاط گرد و خاک و طوفان‌ها، افزایش آلودگی هوا، تناوب بالای حوادث ناشی از اقلیم مانند سیل و خشکسالی، آتش‌سوزی جنگل‌ها، میزان بالای فرسایش خاک، آسیب‌پذیری تنوع زیستی و منابع طبیعی و شیوع آفات و بیماری‌ها می‌داند. جدا از بحث تغییر اقلیم و اثرات آن، ایران به سرعت در حال تغییر است و از دهه ۱۹۵۰ یکی از بالاترین نرخ رشد شهری (جمعیت شهری در حال حاضر ۷۴ درصد) را داشته است. در حقیقت، شهرسازی سریع منجر به افزایش چالش‌های محیط زیستی مانند آلودگی هوا، مشکل دفع زباله، مصرف بالای انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. با توجه به برنامه ملی راهبردی تغییر اقلیم کشور، افزایش آگاهی عمومی به ویژه در مدارس و دانشگاه‌ها در این مورد، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، ارتقاء بازدهی انرژی در مناطق شهری و روستایی و مدیریت یکپارچه منابع طبیعی از جمله راهبردهایی هستند که نیاز است به آن پرداخته شود. با توجه به سهم بالای بخش انرژی در انتشار دی‌اکسید کربن (بیش از ۸۰ درصد) و به تبع آن پتانسیل بالای این بخش در کاهش انتشار، یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها به منظور دستیابی به اهداف برنامه مشارکت ملی سازمان ملل متحد توسعه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزین، سوخت‌های زیستی، تولید بیوگاز و تبدیل زباله به انرژی است. برای حصول به تعهدات مشارکت ملی سرمایه‌گذاری زیادی مورد نیاز است که می‌توان با توسعه مکانیسم‌های صحیح مالی و اقتصاد انرژی همچون حذف تدریجی و کامل یارانه‌های انرژی، صندوق تسهیلات محیط زیست جهانی و توسعه فعالیت بخش خصوصی در بخش انرژی به آن دست یافت. استراتژی‌های صندوق تسهیلات محیط زیست جهانی^۲ در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین دارای ۶ هدف است. این اهداف عبارتند از:

- ترویج، به‌کارگیری و انتقال تکنولوژی‌های کم‌کربن به کشورهای در حال توسعه
- رفع موانع بازار در بهره‌وری و بهینه‌سازی انرژی در بخش صنعت و ساختمان
- ترویج سرمایه‌گذاری در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
- ترویج و توسعه سیستم‌های حمل و نقل کارآمد و کم‌کربن

1. Intended Nationally Determined Contribution (INDC)

2. Green European Foundation (GEF)

- مدیریت پایدار جنگل، جنگل‌داری و احیاء جنگل
- طرح‌های توانمندسازی و ظرفیت‌سازی در زمینه تغییرات آب و هوایی و تهیه گزارشات ملی

بنابراین پروژه‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر که می‌تواند فشار بر چرخه عرضه برق توسط نیروگاه‌های حرارتی را کم کند دارای قابلیت اخذ کمک‌های مالی از صندوق تسهیلات محیط زیست جهانی تحت هدف ۳ می‌باشد. در نشست سالیانه سازمان ملل متحد درخصوص تغییرات اقلیمی سال ۲۰۱۵ موسوم به کاپ ۲۱، ایران به صورت داوطلبانه متعهد شده است در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برنامه مشارکت ملی خویش را ارائه نماید. براساس این برنامه، ایران تمایل به مشارکت در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۳۰ به میزان ۴ درصد نسبت به سال پایه (۲۰۱۰) را دارد. این برنامه با تمرکز بر توسعه سیکل ترکیبی نیروگاهی، توسعه برق هسته‌ای، توسعه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، افزایش کارایی انرژی در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده، جایگزینی سوخت‌های معمول با پایه کربن با گاز طبیعی و توسعه راهبردی استفاده از سوخت‌های کم کربن حاصل خواهد شد که نتایج آن در کاهش آلودگی هوا محسوس خواهد بود. سیاست‌گذاران انرژی ایران مدت‌هاست در تلاش هستند تا برای توسعه سیستم تولید برق پایدار، تنوع سوختی ایجاد کرده و انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز وارد سبد انرژی کنند (شعربافیان، ۱۳۸۷). برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت براساس الگوی فعلی تصمیم‌گیری اقتصادی بزرگترین مانع در مقابل رشد انرژی‌های تجدیدپذیر است. فرآیند توسعه در انرژی‌های تجدیدپذیر در ظاهر به سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری نسبت به سوخت‌های فسیلی نیاز دارد، در حالی که هزینه‌های جاری آنها به دلیل عدم نیاز به سوخت ناچیز است. بنابراین بازنگری و به روز کردن سیاست‌های اقتصادی همچون افزایش اولویت سرمایه‌گذاری بر روی پروژه‌های تجدیدپذیر در بین مؤسسات مالی، ایجاد بازار رقابتی، حذف تدریجی یارانه انرژی فسیلی و سوق دادن درآمد حاصل از آن به تأمین بودجه سرمایه‌گذاری در انرژی تجدیدپذیر، تشویق بخش خصوصی به شرکت در سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش بودجه بخش آموزش و تحقیقات انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (بریمانی و کعبی‌نژادیان، ۱۳۹۲). فرمول‌بندی مدل‌های انرژی به

محققین کمک خواهد کرد تا بتوانند با تصمیم‌گیری مناسب، به نحو بهینه از منابع گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر موجود نظیر انرژی‌های خورشیدی، بادی، انرژی زیستی و آبی جهت پاسخ دادن به نیاز آینده جهان به انرژی استفاده کنند (جیراج و اینیان^۱، ۲۰۰۶). در گذشته، انتخاب بهترین منابع انرژی تنها بر پایه معیار حداقل‌سازی هزینه استوار بوده است اما به دلیل اینکه معیارهای بسیاری برای ارزیابی فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر وجود دارند که اغلب در تضاد با یکدیگر هستند، انجام تحقیق با استفاده از یک معیار (به طور مثال حداقل‌سازی هزینه) نمی‌تواند منجر به پاسخ قابل قبولی شود. بنابراین اولویت‌بندی این فناوری‌ها باید براساس مجموعه‌ای از مهم‌ترین معیارها که به طور معمول در مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند، انجام شود (خاتمی و قاضی متین^۲، ۲۰۱۳). رتبه‌بندی فناوری‌های تولید برق مبتنی بر منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن معیارهای متفاوت فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی کاری پیچیده و دشوار است. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند به آنها برای ارزیابی برنامه‌ها و سیاست‌های بخش انرژی کمک کند. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بر مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی متفاوت استوار است. به همین دلیل، بسیاری از محققین بر استفاده از این روش‌ها به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای کمک به فرآیند تصمیم‌گیری تأکید دارند (والکر و همکاران^۳، ۲۰۰۳). تکنیک VIKOR یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که به طور سیستماتیک قادر است گزینه‌های موجود را با توجه به معیارهای مورد نظر اولویت‌بندی کند. مزیت این روش این است که الف) منطق استفاده شده در روش ویکور قابل فهم است، ب) بهترین راه‌حل توافقی را ارائه می‌کند و ج) این روش به طور همزمان نزدیکی به گزینه ایدئال و ماکزیمم فاصله از گزینه ضد ایدئال را در محاسبات به فرم ساده ریاضی بیان می‌کند (ممینی، ۱۳۹۳). روش VIKOR می‌تواند ابزاری مناسب برای سیاستگذاران صنعت برق برای اولویت‌بندی فناوری‌های برق تجدیدپذیر با توجه به شرایط کشور و ویژگی‌های خاص هر فناوری باشد. در مجموع به رغم تلاش‌های صورت گرفته برای تنوع بخشی و افزایش سهم برق تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور، انتخاب فناوری‌های مناسب و بهینه تولید برق تجدیدپذیر برای تصمیم‌گیری بهینه در خصوص افزایش سهم انرژی‌های

1. Jebaraj
2. Khatami
3. Walker

تجدیدپذیر در تولید برق یکی از چالش‌های عمده در تحقق انرژی پایدار و توسعه پایدار است که تاکنون کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین یکی از اهداف این تحقیق، اولویت‌بندی فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر در ایران با در نظر گرفتن ویژگی‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی هر منبع انرژی و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری کارآمد است.

انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه اقتصادی است اما دستیابی به توسعه پایدار بدون حفاظت محیط زیست و بهبود شرایط اقتصادی امکان‌پذیر نیست (باریش و کوچو کالی^۱، ۲۰۱۲). اگر یک کشور وابسته به انرژی باشد هرگونه سیاست‌های اصلاح ساختاری با هدف کاهش مصرف انرژی ممکن است باعث کاهش رشد اقتصادی شود. صرفه‌جویی در مصرف انرژی در کنار توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های جایگزین، به ویژه انرژی‌های پاک می‌تواند نقش به‌سزایی را در کنترل و کاهش مصرف حامل‌های انرژی فسیلی و به تبع آن کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و رسیدن به توسعه پایدار ایفا کند (تکلیف و همکاران، ۱۳۹۵). براساس گزارش برانت لندن، توسعه پایدار عبارت است از توسعه‌ای که نیازهای کنونی جهان را تأمین کند بدون اینکه توانایی نسل‌های آتی را در برآوردن نیازهای خود به مخاطره افکند. توسعه پایدار، فرآیند توسعه اقتصادی همراه با حفاظت محیط زیست و احترام به عدالت اجتماعی است.

امروزه توسعه پایدار و حفظ محیط زیست به عنوان دو هدف ارزشمند، نه تنها در سطح کشورها بلکه در سطح جهانی مطرح است. توسعه پایدار می‌تواند شامل برنامه‌های پیشگیری از آلودگی، کاهش استفاده از مواد سمی و زائد و کند کردن روند تهنی‌سازی منابع تجدیدناپذیر باشد. توسعه پایدار مبنای سیاست‌های زیست محیطی از طرف کشورها برای قرن بیست و یکم است یکی از اصول اساسی توسعه پایدار است. مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار عبارتند از: افزایش جمعیت و افزایش مصرف منابع، فقر، تهنی شدن منابع، آلودگی، بی‌ثباتی سیاسی، بدهی‌های کشور و شعاری شدن توسعه پایدار حرکت به سمت استفاده از انرژی‌های پاک و غیر آلاینده در همه کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه جهان رو به افزایش است. استفاده از انرژی‌های پاک به دلیل آماده بهره‌برداری بودن، نداشتن آلودگی‌های زیست محیطی و نیز ارزان بودن باید مورد توجه بیشتر سیاست‌گذاران

1. Baris

کشورها قرار گیرد. در ایران، با وجود شرایط و ظرفیت مناسب کشور از نظر انرژی‌های تجدیدپذیر، میزان استفاده از این نوع انرژی در مقایسه با دیگر کشورهای در حال توسعه پایین‌تر است به همین دلیل در جهت افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم ۱۰ درصدی ظرفیت تولید برق کشور در سند چشم‌انداز ۲۰ ساله (۱۴۰۴-۱۳۸۴) به انرژی‌های نو اختصاص یافته است که به منظور دستیابی به این هدف، پژوهش و برنامه‌ریزی برای ارتقای مستمر سهم منابع انرژی‌های نو در عرضه انرژی الکتریکی ضروری است. در صورت تولید بخشی از انرژی الکتریکی از طریق انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر حفظ ذخایر ملی، جلوگیری از آلودگی زیست محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، اشتغال‌زایی و توسعه نواحی دورافتاده و ارتقای جایگاه کشور در محیط استراتژیک بین‌المللی، دستیابی به انرژی پایدار و توسعه پایدار نیز از دستاوردهای آن خواهد بود. لذا سؤالی که مطرح می‌شود این است که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق در کشور تا چه میزان در دستیابی به توسعه پایدار مؤثر است و آیا توسعه پایدار موجبات رشد سهم حامل‌های انرژی تجدیدپذیر در تولید برق را فراهم می‌کند یا خیر؟

مطالعه درخصوص رابطه بین مصرف انرژی و رشد و توسعه اقتصادی از دیرباز مورد توجه محققان و سیاست‌گذاران بوده است. مشکلی که در بخش قابل توجهی از این مطالعات مشاهده می‌شود این است که از تولید ناخالص داخلی به عنوان شاخصی برای ارزیابی رشد اقتصادی و توسعه پایدار به طور هم‌زمان استفاده کرده‌اند. باید توجه داشت که تولید ناخالص داخلی کاربردهای فراوانی دارد اما برای ارزیابی توسعه پایدار ناکارآمد است. به علاوه، تولید ناخالص داخلی توانایی سنجش آسیب‌های زیست‌محیطی و رفاه اجتماعی را ندارد (لی و فنگ^۱، ۲۰۱۴). براساس استدلال همیلتون، پس‌انداز خالص تعدیل شده^۲ دربرگیرنده تمام انواع سرمایه و بیانگر کاهش سرمایه فیزیکی و طبیعی است. پس‌انداز خالص تعدیل شده به عنوان شاخصی برای پایداری ضعیف در نظر گرفته می‌شود که مقادیر منفی آن نشان‌دهنده کاهش مطلوبیت در آینده است (یو^۳، ۲۰۱۱). همچنین اکثر این مطالعات براساس داده‌های مصرف کل انرژی انجام شده‌اند. در مطالعه حاضر، تلاش شده است تا کاستی‌های موجود در مطالعات گذشته برطرف شود. بنابراین مهم‌ترین

1. Li & Fang

2. GS

3. Yu

جنبه‌های نوآوری در این تحقیق به شرح زیر است: اول برای رتبه‌بندی فناوری‌های برق تجدیدپذیر از تکنیک VIKOR استفاده شده است تا بتوان به طور هم‌زمان از معیارهای کمی و کیفی برای ارزیابی گزینه‌ها بهره برد؛ دوم، از شاخصی کارآمد برای بیان توسعه پایدار استفاده شده است؛ سوم، مصرف انرژی به دو گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر تفکیک شده تا بررسی شود که روابط بین توسعه پایدار، آلودگی هوا و مصرف انرژی به تفکیک انواع متفاوت انرژی چگونه است و چهارم، از روش خود رگرسیون برداری بیزین^۱ استفاده شده است تا با رفع مشکل محدودیت داده و وفور پارامتر در مدل‌های خودرگرسیون برداری نامقید بررسی شود که انواع مختلف مصرف انرژی چگونه بر توسعه پایدار در ایران تأثیرگذار است.

انرژی عنصری حیاتی برای توسعه پایدار و رفاه در هر کشوری در دوران کنونی به شمار می‌رود. عرضه اولیه انرژی در ایران معادل ۱۵۹۳ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۳۹۰ بوده که به ۱۵۹۸ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۳۹۱ افزایش یافته است. تقاضای برق در ایران در سال‌های اخیر در راستای رشد اقتصادی و توسعه اجتماعی فزاینده به طور چشمگیری افزایش یافته است. بر طبق پیش‌بینی‌های انجام شده در معاونت توسعه و برنامه‌ریزی وزارت نیرو برای دوره ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱، انتظار می‌رود که تقاضای برق در ایران به ۷۱۰۳۴ مگاوات در سال ۱۴۰۱ افزایش یابد. بنابراین تقاضای برق سهم بیشتری در اهداف توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور به عهده خواهد داشت. لذا نیاز است سیاست‌گذاران کشور راهی جهت تضمین عرضه پایدار برق بیابند و با در نظر گرفتن محدودیت ذخایر سوخت فسیلی، به استفاده از منابع تجدیدپذیر روی آورند.

بر اساس توافق‌نامه اقلیمی پاریس^۲ در نشست سال ۲۰۱۵ (کاپ ۲۱) کشورهای عضو کنوانسیون متعهد شدند تا در زمینه مقابله با پدیده گرمایش زمین به منظور کاهش خطرات و عوارض ناشی از تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گام بردارند. این توافق‌نامه به عنوان انگیزه و نیروی محرک برای کاهش سرمایه‌گذاری در حوزه سوخت‌های فسیلی و اولین پیمان جامع اقلیمی در جهان به شمار می‌رود. هرچند این برنامه تعهد الزام‌آوری برای ایران در رابطه با اقداماتی که در بخش‌های مختلف اقتصادی و

1. BVAR
2. UNFCCC

صنعتی اجرا خواهد نمود ایجاد نمی‌کند اما عدم پایبندی به آن می‌تواند تبعات سنگینی برای کشور همچون طرح پرونده در شورای امنیت به همراه داشته باشد.

در سال‌های اخیر، هم اقتصادهای توسعه یافته و هم اقتصادهای در حال توسعه این فرصت را درک کرده و شروع به ترکیب انرژی مصرفی خود با منابع انرژی تجدیدپذیر نموده‌اند، فرصت‌های تجاری و توسعه کارآفرینی نو در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تولید درآمد بالاتر و رشد اقتصادی به ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌شود (احمد و طاهر^۱، ۲۰۱۴). براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ تا پایان سال ۲۰۱۴، در حدود ۲۳ درصد از مصرف کل انرژی جهان از منابع انرژی تجدیدپذیر شامل زیست توده، برق آبی، بادی، زمین گرمایی و انرژی خورشیدی تأمین شده است. انرژی‌های تجدیدپذیر کمتر در معرض نوسانات قیمت در بازارهای جهانی قرار دارند و به همین دلیل به ثبات اقتصادی کشورها کمک می‌کنند. وجود شبکه‌های پراکنده و مستقل انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح ملی و منطقه‌ای، ثبات شبکه را افزایش داده و احتمال خاموشی سراسری را کاهش می‌دهد، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر امکان وقوع حوادث و فجایع زیست محیطی را کاهش داده و نیز حفاظت از آنها به سادگی امکان‌پذیر است. به طور کلی، گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش مؤثری در تأمین بخشی از تقاضای انرژی، ایجاد فرصت‌های شغلی و حفاظت محیط زیست داشته باشد. محققان سیستم تولید برق را به صورت مجموعه اجتماعی - فنی و فنی - نهادی توصیف کرده‌اند. بنابراین هر تصمیمی در این سیستم یک فرآیند پیچیده است که ضرورت بررسی پتانسیل منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق و رتبه‌بندی این منابع براساس مزیت هریک را ایجاب می‌کند. این رتبه‌بندی برای سیاست‌گذاران در تدبیر راه کارهایی در جهت نیل به توسعه سیستم تولید برق پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است. تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر، تناوبی بوده و هزینه نگهداری نسبتاً بالایی دارند، بنابراین در مقایسه با سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی سنتی از توان رقابتی کمتری برخوردار هستند. با این وجود، منابع انرژی تجدیدپذیر دارای مزیت‌های بسیاری همچون کاهش وابستگی به منابع سوخت فسیلی و نیز کاهش آلاینده‌های کربنی در جو می‌باشند. به علاوه، انرژی‌های تجدیدپذیر از مشکلات ایمنی ناشی از انرژی اتمی جلوگیری می‌کنند که این

1. Ahmad, S. & Tahar

2. IRENA

امر دلیل مقبولیت نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر از منظر اجتماعی می‌باشد. برای دولت‌ها و حوزه‌های تجاری، تصمیم‌گیری در این خصوص که آیا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را در محل مورد نظر تأسیس نمایند و اینکه کدام منبع انرژی تجدیدپذیر برای ترکیب بهینه منابع در تولید برق مناسب‌تر است، از اهمیت بالایی برخوردار است. گسترش تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر به توسعه پایدار و تهیه راه‌حلی برای مشکلات زیست محیطی مرتبط با برخی از انواع انرژی کمک خواهد کرد (بانوس و همکاران، ۲۰۱۱). پژوهش‌های جدید نشان داده است که بین سطح توسعه یک کشور و میزان مصرف انرژی آن رابطه مستقیمی برقرار است. امروزه، بحران‌های سیاسی، اقتصادی و مسائلی نظیر محدودیت ذخایر فسیلی، نگرانی‌های زیست محیطی، افزایش جمعیت و افزایش مصرف انرژی، همگی مباحث جهان‌شمولی هستند که فکر اندیشمندان را به خود مشغول داشته است. براساس اصل عدالت بین نسلی، منابع طبیعی باید طوری مورد بهره‌برداری قرار گیرند که نه تنها نسل فعلی بلکه نسل‌های آینده نیز قادر باشند نیازهای اساسی خود را برآورده سازند. لذا بررسی توسعه پایدار و رابطه آن با عواملی همچون مصرف منابع تجدیدپذیر برای سیاست‌گذاری‌های اقتصادی و زیست محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. محدودیت منابع فسیلی و رشد بالای مصرف سرانه انرژی در کشورهای دارای منابع عظیم نفت و گاز همچون ایران، سبب تهی شدن این منابع پایان‌پذیر در زمانی نه چندان دور می‌شود که توسعه این کشورها را به طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. با وجود اینکه گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر از لحاظ تکنولوژیکی امکان‌پذیر است اما فقط با حمایت همه جانبه بین‌المللی و با تعیین اولویت‌ها و سیاست‌های اقتصادی، جذب منابع مالی خارجی، مشارکت بخش خصوصی در سرمایه‌گذاری و انجام برنامه‌های آموزشی و پژوهشی میسر می‌گردد. در ایران نیز در سال‌های اخیر اقداماتی در جهت ایجاد تنوع در منابع انرژی انجام گرفته است، هرچند به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر هنوز به صورت یک ضرورت پذیرفته نشده است. حال آنکه محدودیت منابع فسیلی، رشد بالای مصرف سالانه انرژی در ایران، کاهش صادرات نفت و به تبع آن کاهش درآمدهای ناشی از صدور نفت باعث می‌شود در صورت عدم برنامه‌ریزی‌های لازم روند توسعه کشور تحت تأثیر قرار گیرد. عدم کارایی فنی و اقتصادی و هدر رفتن بخش زیادی از کل انرژی در

فرآیند مصرف و مشکلات فزاینده زیست محیطی ناشی از آن، لزوم مدیریت مصرف انرژی و بالابردن بازده و بهره‌وری انرژی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. لذا ضروری است مصرف بهینه منابع انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر و رابطه آن با توسعه پایدار مورد توجه ویژه قرار گیرد تا منابع انرژی برای نسل‌های آینده حفظ شده و اهداف توسعه‌ای کشورها با مشکل مواجه نشود. به بیان دیگر، پایداری توسعه و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها تضمین گردد.

۳. روش تحقیق

مدل رتبه‌بندی به کاررفته در این مطالعه شامل چهار سطح می‌باشد. در سطح اول، هدف مدل رتبه‌بندی که تعیین بهترین نوع منبع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق در ایران است، قرار دارد. در سطح دوم، معیارهای اصلی قرار دارند که در چهار بُعد فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دسته‌بندی می‌شوند. سطح سوم، نشان‌دهنده معیارهای فرعی است و انواع مختلف فناوری‌های برق تجدیدپذیر که گزینه‌ها نام دارند، در سطح چهارم جای می‌گیرند. برای تعیین معیارهای فرعی با انجام مطالعات کتابخانه‌ای مجموعه‌ای از معیارها شناسایی شده و سپس با جمع‌آوری نظرات متخصصان این حوزه در خصوص معیارهای پیشنهادی، از ۱۵ معیار برای سنجش و ارزیابی حامل‌های انرژی تجدیدپذیر استفاده شده تا در نهایت با در نظر گرفتن داده‌های مربوط به معیارها و وزن‌های تعیین شده آنها، فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر در ایران رتبه‌بندی شوند. به عبارت دیگر، معیارهای پژوهش به چهار دسته فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دسته‌بندی می‌شوند.

روش رتبه‌بندی توافقی (که روش VIKOR نامیده می‌شود) به وسیله Opricovic و Tzeng به عنوان یک تکنیک قابل اجرا و کاربرد در LFDMM پیشنهاد شد. فرض شود که گزینه‌ها با $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$ نشان داده می‌شود. رتبه (امتیاز عملکرد) معیار j ام برای گزینه‌ی A_i با f_{ij} نشان داده می‌شود، w_j وزن معیار j ام می‌باشد که اهمیت نسبی این معیار را نشان می‌دهد که $j = 1, 2, \dots, n$ و n تعداد معیارها می‌باشد. روش VIKOR با فرمول زیر برای سنجش L_p شروع می‌شود:

$$L_i^p = \left\{ \sum_{j=1}^n [w_j (|f_j^* - f_{ij}|) / (|f_j^* - f_j^-|)]^p \right\}^{1/p}$$

که $i = 1, 2, \dots, m$ ، $1 \leq p \leq \infty$ و وزن شاخص‌های پژوهش با استفاده از ANP مطابق با NRM مبتنی بر روش DEMATEL به دست می‌آید. همچنین روش VIKOR برای فرموله کردن اندازه‌ی رتبه‌بندی از $L_i^{p=1}$ (به عنوان Si) و $L_i^{p=\infty}$ (به عنوان Qi) استفاده می‌کند.

$$S_i = L_i^{p-1} = \sum_{j=1}^n [w_j (|f_j^* - f_{ij}|) / (|f_j^* - f_j^-|)]$$

$$R_i = L_i^{p-1} = \max [w_j (|f_j^* - f_{ij}|) / (|f_j^* - f_j^-|)] \quad j = 1, 2, \dots, n$$

برای جواب توافقی mini Lip انتخاب می‌شود زیرا مقدار آن به سطح ایدئال/ دلخواه نزدیک‌ترین می‌باشد. به علاوه هنگامی که p کوچک است (مثلاً $p = 1$) بر سودمندی گروه تأکید می‌شود، هنگامی که p افزایش می‌یابد به شکاف‌ها/ تأسف‌های فردی وزن بیشتری اختصاص می‌یابد. بنابراین mini Si بر حداکثر سودمندی گروه تأکید می‌کند در حالی که mini Ri بر انتخاب حداقل از میان حداکثر تأسف‌های گروه تأکید می‌کند. بر مبنای مفاهیم بالا الگوریتم رتبه‌بندی توافقی VIKOR شامل گام‌های زیر می‌باشد. گام ۱: بهترین مقدار از میان همه توابع معیارها f_j^* و بدترین مقدار f_j^- را تعیین کنید، $j = 1, 2, \dots, n$ فرض کنید که تابع f_j^* از معرف سود باشد، $f_j^* = \max_i f_{ij}$ (یا برقراری یک سطح دلخواه) و $f_j^- = \min_i f_{ij}$ (یا برقراری یک سطح قابل قبول). به همین ترتیب فرض کنید که تابع f_j^- معرف هزینه باشد، $f_j^- = \max_i f_{ij}$ (یا برقراری یک سطح دلخواه) و $f_j^* = \min_i f_{ij}$ (یا برقراری یک سطح قابل قبول باشد). افزون بر این ماتریس رتبه‌بندی اصلی به ماتریس رتبه‌بندی - وزن با فرمول زیر تبدیل می‌شود:

$$r_{ij} = (|f_j^* - f_{ij}|) / (|f_j^* - f_j^-|)$$

گام ۲: مقادیر S_j و R_i ، $i = 1, 2, \dots, m$ را با استفاده از روابط زیر محاسبه کنید

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}$$

$$R_i = \max_i \{w_j r_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n\}$$

گام ۳: مقادیر شاخص R_i ، $i = 1, 2, \dots, m$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید.

$$Q_i^1 = v(S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v)(R_i - R^*) / (R^- - R^*)$$

که $S^* = \max_i S_i$ ، $S^- = \min_i R_i$ ، $R^* = \max_i R_i$ (در اینجا همچنین می‌توان بهترین مقدار را برابر با 0 و بدترین مقدار برابر با 1 قرار داده می‌شود) و $0 \leq v \leq 1$ که

به عنوان وزن استراتژی حداکثر سودمندی گروه معرفی می شود در حالی که $v-1$ وزن تأسف فردی است. به عبارت دیگر هنگامی که $v > 0.5$ باشد، این فرآیند تصمیم گیری ای را نشان می دهد که می تواند استراتژی حداکثر سودمندی گروه را مورد استفاده قرار دهد (یعنی اگر v بزرگ باشد سودمندی گروه مورد تأکید قرار می گیرد) یا هنگامی که $v \approx 0.5$ از اجماع افراد یا هنگامی که $v > 0.5$ باشد با استفاده از حق وتو^۱ استفاده کرد. همچنین می توان هنگامی که $R^* = 0$ ، $S^* = 1$ ، $R^- = 1$ و $R^* = 0$ است، به صورت $Q_i = vS_i + (1 - v_i) R_i$ بازنویسی می شود.

گام ۴: گزینه ها با استفاده از امتیازبندی مقادیر $\{S_i, R_i, \text{ and } Q_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ به ترتیب نزولی رتبه بندی می شود.

گزینه $(A^{(1)})$ را به عنوان یک توافق پیشنهاد دهید که نخست با استفاده از سنجه $\min\{R_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ به دست می آید اگر دو شرط زیر برآورده شوند.

• C1. مزیت رضایت بخش: $Q(A(2)) - Q(A(1)) > 1/(m - 1)$ که $A(2)$ گزینه رتبه دوم از فهرست R می باشد، m هم تعداد گزینه هاست.

• C2. ثبات قابل قبول در تصمیم گیری: گزینه $A(1)$ هنگام رتبه بندی به وسیله S_i و یا R_i ، $i = 1, 2, \dots, m$ بهترین گزینه انتخاب شود.

اگر یکی از شرایط بالا برآورده نشود، مجموعه ای از راه حل های توافقی پیشنهاد می شود. این مجموعه توافقی شامل می شود:

• وقتی گزینه های $A(1)$ و $A(2)$ شرط اول را رعایت نکنند، هر دو در یک طبقه (رتبه) قرار می گیرند.

• گزینه های $A(1), A(2), \dots, A(M)$ اگر که $C1$ برآورده نشود. دقت کنید که $A(M)$ با استفاده از رابطه

• $R(A(M)) - R(A(1)) < 1/(m - 1)$ برای حداکثر M به دست می آید (موقعیت این گزینه ها به هم نزدیک است).

این جواب توافقی با استفاده از روش رتبه بندی توافقی تعیین می شود؛ از آنجا که این جواب توافقی حداکثر سودمندی را برای اکثریت گروه و حداقل تأسف فردی را برای مخالفان (بیان شده با $\min R$ معادله به دست می دهد می تواند به وسیله تصمیم گیران مورد قبول واقع شود.

1. veto

۴. رتبه‌بندی به روش VIKOR

به منظور رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش VIKOR، پس از تشکیل ماتریس تصمیم، بهترین و بدترین مقدار برای معیارهای مثبت و منفی تعیین می‌شود که جدول بالا نشان‌دهنده این مقادیر است. سپس، با استفاده از روابط ارائه‌شده در فصل پیشین، مقدار سودمندی (S) و مقدار تأسف (R) محاسبه شده و با توجه به این مقادیر، شاخص VIKOR تعیین می‌گردد. در جدول زیر، مقادیر R و Q و رتبه‌بندی براساس این معیارها آورده شده است.

جدول ۱. رتبه‌بندی براساس مقادیر R و S و Q

رتبه‌بندی براساس Q	Q	رتبه‌بندی براساس R	R	رتبه‌بندی براساس S	S	
۲	۰/۳۷۱۱	۳	۰/۰۹۲۷	۲	۰/۴۱۹۶	خورشیدی
۱	۰	۱	۰/۰۶۶۹	۱	۰/۳۴۲۰	بادی
۳	۰/۴۱۷۳	۲	۰/۰۸۷۳	۳	۰/۴۷۴۳	برق آبی
۵	۱	۵	۰/۱۲۱۵	۵	۰/۶۲۸۵	زیست توده
۴	۰/۷۵۰۹	۴	۰/۱۱۹۰	۴	۰/۴۹۹۰	زمین گرمایی

منبع: یافته‌های تحقیق

در توضیح روش ویکور شرح داده شد که انتخاب گزینه نهایی با کنترل دو شرط انجام خواهد شد و در صورت عدم برآورده شدن هر کدام از شروط، جواب مسئله از حالت تک گزینه‌ای به حالت دو یا چند گزینه‌ای تغییر خواهد یافت. در ادامه این شروط بررسی می‌شوند. با توجه به اینکه براساس رتبه‌بندی، گزینه خورشیدی با ارزشی بیش از ۰/۲۵ در جایگاه دوم قرار گرفته است بنابراین شرط اول برآورده شده و گزینه بادی به عنوان گزینه برتر تعیین می‌شود. با توجه به جدول بالا، نتایج رتبه‌بندی و با S همخوانی دارد بنابراین شرط دوم برقرار است بنابراین نتایج به دست آمده، در مسئله انتخاب بهترین نوع تکنولوژی انرژی تجدیدپذیر از منظر توسعه پایدار، گزینه بادی به عنوان گزینه برتر شناخته شده و گزینه‌های خورشیدی، برق آبی، زمین گرمایی و زیست توده به ترتیب در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند به طور معمول ارزش ۲ برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، اگرچه می‌توان هر عددی بین ۰ و ۱ برای آن به کار برد. به منظور آنالیز حساسیت به ازای مقادیر مختلف، مقادیر مختلف Q به دست می‌آید که در جدول زیر درج شده است. مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر مختلف، انرژی بادی دارای اولویت است.

جدول ۲. آنالیز حساسیت

Q v=۱	Q v=۰/۸	Q v=۰/۶	Q v=۰/۴	Q v=۰/۲	Q v=۰	
۰/۲۷۰۶	۰/۳۱۰۸	۰/۳۵۱۰	۰/۳۹۱۲	۰/۴۳۱۴	۰/۴۷۱۶	خورشیدی
۰	۰	۰	۰	۰	۰	بادی
۰/۴۶۱۸	۰/۴۴۴۰	۰/۴۲۶۱	۰/۴۰۸۳	۰/۳۹۰۵	۰/۳۷۲۷	برق آبی
۱	۱	۱	۱	۱	۱	زیست توده
۰/۵۴۸۰	۰/۶۲۹۲	۰/۷۱۰۳	۰/۷۹۱۵	۰/۸۷۲۶	۰/۹۵۳۸	زمین گرمایی

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج به دست آمده از اولویت بندی نیروگاه‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهد که در میان گزینه‌های مورد بررسی، نیروگاه زیست توده به دلیل اثرات منفی زیست محیطی آن جذابیتی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها ندارد. همچنین نیروگاه‌های برق آبی در ایران با بلوغ قابل قبولی روبه‌رو بوده‌اند اما در سالیان اخیر به دلیل عدم توجه به تأثیرات زیست محیطی این نیروگاه‌ها، بحران‌هایی در نقاط مختلف کشور به وجود آورده‌اند که کم‌آبی دریاچه ارومیه از پیامدهای آن است بنابراین با توجه به موقعیت قرارگیری کشور در شرایط جغرافیایی خشک و نیمه خشک، توسعه بیشتر این نیروگاه‌های کشور را با مشکل کمبود منابع آبی مواجه کرده است بر پایه یافته‌های پژوهش، علی‌رغم پتانسیل بالایی که کشور در دریافت انرژی خورشیدی دارد، نیروگاه خورشیدی در جایگاه دوم رتبه بندی نیروگاه‌های تجدیدپذیر قرار دارد. این نتیجه به دلیل هزینه بالای تکنولوژی، تجهیزات و فناوری استفاده از انرژی خورشیدی است که باعث شده هزینه تولید یک مگاوات برق خورشیدی در مقایسه با سایر انرژی‌ها قابل توجه باشد. بنابراین لازمه توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و به ویژه انرژی خورشیدی، زمینه‌سازی رشد صنعت به منظور بومی سازی انواع تجهیزات نیروگاه‌های خورشیدی است تا هزینه تولید برق از این منبع انرژی کاهش یابد با توجه به شرایط فوق، نیروگاه بادی به دلیل کسب بالاترین امتیازات و با توجه به اینکه سهم ناچیزی از تولید برق کشور را بر عهده دارد و با وجود شرایط مناسب توسعه از نظر زیرساختی و منبع انرژی اولیه در کشور، بهترین گزینه برای توسعه شبکه تولید برق است. در گذشته به دلیل عدم بلوغ تکنولوژی نیروگاه‌های بادی، استفاده از این تکنولوژی به خصوص از منظر اقتصادی معقول به نظر نمی‌رسید. با این حال به دلیل پیشرفت چشمگیر و کاهش هزینه‌های این نیروگاه، جذابیت استفاده از آن افزایش یافته است. هرچند ممکن

است احداث و راه‌اندازی نیروگاه‌های بادی نیازمند صرف هزینه‌های اولیه زیادی باشد اما وفور و در دسترس بودن این منبع و منافع زیست‌محیطی آن موجب برتری آن در بلندمدت می‌شود. بنابراین برنامه‌ریزان صنعت برق می‌توانند با اتخاذ مشوق‌هایی مانند نرخ خرید تضمینی بالاتر برای برق تولید شده از نیروگاه‌های بادی به عنوان گزینه برتر، سبب ایجاد انگیزه بیشتر در بخش خصوصی برای سرمایه‌گذاری در این نوع انرژی شوند.

۵. برآورد الگوی انرژی - توسعه پایدار - انتشار دی‌اکسید کربن به روش BVAR

۵-۱. نتایج آزمون ریشه واحد و هم‌جمعی

در ابتدا پایایی متغیرها با استفاده از آزمون‌های ریشه واحد ADF و PP مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های پایایی متغیرهای مدل

سطح	ADF (احتمال)	PP (احتمال)	تفاضل مرتبه اول	ADF (احتمال)	PP (احتمال)
GS	-۰/۸۸ (۰/۹۴)	-۰/۸۸ (۰/۹۴)	D(GS)	-۴/۸۷ (۰/۰)	-۴/۸۳
EC-re	-۲/۶۸ (۰/۲۴)	-۲/۲۳ (۰/۴۵)	D(EC-re)	-۵/۵۵ (۰/۰)	-۱۱/۱۱
EC-nre	-۳/۰۵ (۰/۱۳)	-۳/۰۴ (۰/۱۳)	D(EC-nre)	-۷/۲۷ (۰/۰)	-۸/۰۱
CO ₂	-۳/۱۰ (۰/۱۲)	-۳/۰۸ (۰/۱۲)	D(CO ₂)	-۶/۳۳ (۰/۰)	-۶/۸۰

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول بالا بیانگر پایایی تفاضل مرتبه اول متغیرهای مدل است. برای بررسی وجود رابطه هم‌جمعی میان متغیرها و تعیین تعداد بردارهای همگرایی از آزمون یوهانسن - جوسیلیوس استفاده شده است. نتایج آزمون هم‌جمعی در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون هم‌جمعی

تعداد بردارهای هم‌جمعی	مقدار آماره λ_{Trace}	مقادیر بحرانی (۰/۰۵)	احتمال
$r = 0$	۲۴/۸۹	۲۴/۲۷	۰/۰۴۱
$r \leq 1$	۹/۸۴	۱۲/۳۲	۰/۱۲۵
$r \leq 2$	۳/۸۷	۴/۱۲	۰/۰۵۸

منبع: یافته‌های تحقیق

برای تعیین طول وقفه بهینه مدل می‌توان مدل را به ازای وقفه‌های مختلف برآورد کرده و براساس معیارهای اطلاعاتی، وقفه بهینه مدل را تعیین کرد. براساس جداول، با توجه به معیارهای شوارتز - بیزین، حنان - کوین و آکانیک طول وقفه بهینه در هر دو مدل مدل ۱ است.

جدول ۵. تعیین وقفه بهینه مدل (GS, E-re, CO₂)

طول وقفه	LL	LR	FPE	AIC	HQ	SC
۰	-۴۱/۹۷۶	-	$۴/۰۲ \times 10^{-۱۰}$	۲/۹۹۸۴	۳/۰۴۳۲	۳/۱۳۸۵
۱	۴۶/۶۳۳	۱۷۷/۲۲	$۴/۰۲ \times 10^{-۳۰}$	-۲/۳۰۸۸	-۲/۱۲۹۵	-۱/۷۴۸۴
۲	۵۰/۸۵۹	۸/۴۵۲۶	$۲/۸ \times 10^{-۱۰}$	-۱/۹۹۰۶	-۱/۶۷۶۸	-۱/۰۰۹

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۶. تعیین وقفه بهینه مدل (GS, E-nre, CO₂)

طول وقفه	LL	LR	FPE	AIC	HQ	SC
۰	۱۴/۲۴۹	-	$۹/۵ \times 10^{-۱۰}$	-۰/۸۴۹۹	-۰/۷۰۵۱	-۰/۶۰۹۸
۱	۱۰/۵۲۹	۱۸۶/۵۶	$۳/۵ \times 10^{-۷۰}$	-۶/۳۶۸۶	-۶/۱۸۹۳	-۵/۸۰۸۱
۲	۱۰۹/۴۹۸	۳/۹۳۷۳	$۵/۶ \times 10^{-۱۰}$	-۵/۸۹۹۸	-۵/۵۸۶۰	-۴/۹۱۹۳

منبع: یافته‌های تحقیق

۲-۵. انتخاب تابع پیشین مناسب

در این تحقیق، برای برآورد مدل از نرم‌افزار «متلب»^۱ و شش تابع پیشین که در فصل گذشته شرح داده شد، استفاده شده است. یکی از روش‌های مقایسه کارایی مدل‌های مختلف و انتخاب بهترین و دقیق‌ترین تابع پیشین در مدل‌های خودرگرسیون برداری بیزین، پیش‌بینی خارج از نمونه است. برای بررسی این مسئله، پیش‌بینی مدل با استفاده از توابع پیشین شش‌گانه برای یک دوره جلوتر به همراه انحراف معیار آنها در جدول (۵-۲۴) آورده شده است:

جدول ۷. پیش‌بینی یک دوره جلوتر متغیرهای مدل (GS, E-TE, C09)

نوع تابع پیشین	GS _{t+1}	RE _{t+1}	CO ₂ t+1
پراکنده	(۰/۲۸) ۸/۸۵	(۰/۳۶) ۴/۹۳	(۰/۰۷) ۲/۱۱
مینسوتا	(۰/۲۸) ۸/۸۴	(۰/۳۳) ۴/۹۶	(۰/۰۷) ۲/۱۱
توامان طبیعی	(۰/۳۱) ۸/۷۹	(۰/۳۷) ۵/۰۶	(۰/۲۲) ۲/۱۰
نرمال - ویشارت مستقل	(۰/۳۱) ۸/۷۲	(۰/۳۸) ۵/۲۰	(۰/۲۲) ۲/۰۸
SSVS - Wishart	(۰/۳۱) ۸/۷۶	(۰/۳۷) ۴/۹۸	(۰/۲۱) ۲/۱۲
SSVS - Full	(۰/۲۳) ۸/۷۸	(۰/۳۳) ۴/۹۸	(۰/۰۷) ۲/۱۴
مقدار واقعی	۸/۶۷	۴/۹۶	۲/۱۳

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود پیش‌بینی‌های انجام‌شده با استفاده از تابع پیشین SSVS-Full در مورد مقدار آتی هر یک از متغیرهای مدل از دقت بالاتری در مقایسه با سایر توابع پیشین برخوردار است. برای بررسی دقیق‌تر میزان دقت پیش‌بینی مدل‌های مختلف از شاخص RMSE استفاده می‌شود که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=\tau_0}^{t-h} [y_{i,\tau+h}^0 - E(y_{i,\tau+h} | data_{\tau})]^2}{T - h - \tau_0 + 1}}$$

با در نظر گرفتن $1980=10$ و افق پیش‌بینی متفاوت از $h=1$ تا $h=4$ ، پیش‌بینی هر یک از مدل‌های فوق با یکدیگر مقایسه می‌شود. براساس نتایج جدول زیر، تابع عکس‌العمل آنی در مدل دوم با استفاده از تابع پیشین نرمال - ویشارت مستقل از دقت بیشتری برخوردار است.

جدول ۸. شاخص RMSE پیش‌بینی مدل‌های مختلف (GS, E-re, C0)

نوع تابع پیشین	h=1	h=2	h=3	h=4	متوسط 1 تا 4 دوره	شاخص نسبی
پراکنده	0/106	0/151	0/162	0/120	0/135	0/48
مینسوتا	0/099	0/140	0/166	0/148	0/138	0/49
توامان طبیعی	0/092	0/167	0/253	0/299	0/202	0/73
نرمال - ویشارت مستقل	0/145	0/256	0/335	0/373	0/277	1
SSVS - Wishart	0/053	0/113	0/175	0/118	0/115	0/42
SSVS - Full	0/064	0/131	0/171	0/091	0/114	0/41

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۹. ساخت RMSE پیش‌بینی مدل‌های مختلف

نوع تابع پیشین	h=1	h=2	h=3	h=4	متوسط 1 تا 4 دوره	شاخص نسبی
پراکنده	0/095	0/122	0/129	0/220	0/141	0/84
مینسوتا	0/094	0/139	0/191	0/248	0/168	1
توامان طبیعی	0/088	0/134	0/180	0/208	0/152	0/90
نرمال - ویشارت مستقل	0/085	0/105	0/119	0/153	0/115	0/68
SSVS - Wishart	0/055	0/066	0/146	0/243	0/127	0/75
SSVS - Full	0/053	0/072	0/171	0/268	0/141	0/84

منبع: یافته‌های تحقیق

نکته قابل توجه آن است که مدل خودرگرسیون برداری^۱ با تابع پیشین پراکنده (حداقل مربعات معمولی)^۲ دارای دقت پایین تری است. بنابراین تخمین مدل خودرگرسیون برداری از روش اقتصادسنجی کلاسیک و استفاده از روش حداقل مربعات معمولی برای تخمین آن نتایج ضعیف تری را به دنبال دارد. بنابراین به دلیل خطای پیش بینی کمتر روش خودرگرسیون برداری بیزین^۳، از این روش برای محاسبه توابع عکس العمل آنی استفاده می شود.

۳-۵. احتمال شمولیت پسین تابع پیشین SSVS-Full

این امکان را فراهم می کند که احتمال $pr(y_i = 1 | y)$ برای هر یک از ضرایب مدل خودرگرسیون برداری محاسبه شود. این احتمالات پسین می تواند برای میانگین گیری مدل ها و به عنوان یک معیار غیر رسمی برای انتخاب متغیرهای مدل و ساخت یک مدل جدید و مقید مبتنی بر آنها مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه مدل اول با تابع پیشین SSVS-Full برآورد می شود جدول زیر احتمال شمولیت پسین برای هر یک از ضرایب مدل را نشان می دهد.

جدول ۱۰. احتمال پسین شمولیت ضرایب با تابع پیشین (SSVS-Full) (GS, E-re, CO₂)

CO_{2t}	$EC - re_t$	GS_t	
۰/۰۴۶۹	۰/۶۰۵۵	۰/۰۶۰۴	جزء ثابت
۰/۰۳۱۳	۰/۰۹۲۲	۱	GS_{t-1}
۰/۰۵۲۰	۰/۹۷۹۵	۰/۰۶۶۱	$EC - re_{t-1}$
۱	۰/۰۵۰۶	۰/۱۴۸۸	CO_{2t-1}
۰/۰۲۴۳	۰/۱۰۲۲	۰/۰۸۷۴	GS_{t-2}
۰/۰۴۶۹	۰/۱۲۵۸	۰/۰۷۳۰	$EC - re_{t-2}$
۰/۰۸۳۴	۰/۰۵۲۲	۰/۱۱۴۵	CO_{2t-2}

منبع: یافته های تحقیق

جدول فوق می تواند از جهات مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر می توان از تابع پیشین SSVS-Full به عنوان روشی برای انتخاب تعداد وقفه های بهینه مدل و یا انتخاب متغیرهای مدل مقید استفاده کرد (کوپ و کروبیلیس^۴، ۲۰۱۰)، احتمال شمولیت پسین ضرایب در مدل فوق با وقفه ۲ محاسبه شده است. همان طور که مشاهده می شود در

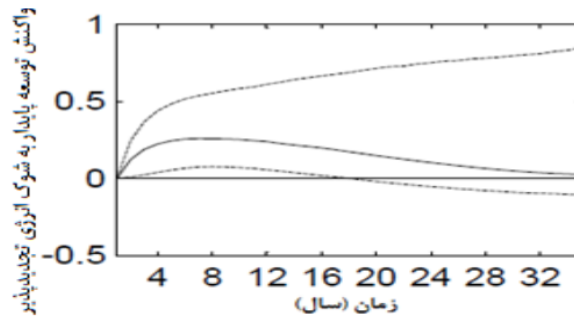
1. Vector AutoRegression (VAR)
2. Ordinary Least Squares (OLS)
3. BVAR
4. Koop

وقفه دوم هیچ‌یک از ضرایب از اهمیت زیادی برخوردار نیست؛ به بیان دیگر، در وقفه دوم ضریبی با احتمال شمولیت بالاتر از ۵۰ درصد وجود ندارد؛ بنابراین وقفه بهینه مدل ۱ است.

۳-۵. توابع عکس‌العمل آنی

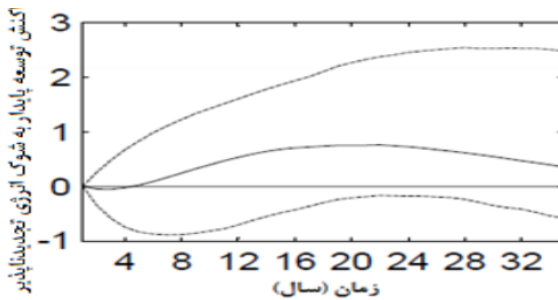
در مدل‌های خودرگرسیون برداری برای بررسی تأثیر ایجاد یک شوک در یک متغیر خاص بر سایر متغیرهای مدل از توابع عکس‌العمل آنی استفاده می‌شود. در اقتصادسنجی بیزین برای محاسبه توابع عکس‌العمل آنی، روش‌های شبیه‌سازی پسین به کار گرفته می‌شود. به منظور بررسی معناداری توابع عکس‌العمل، توارهای اطمینان با استفاده از شبیه‌سازی نمونه‌گیری گیبس محاسبه شده‌اند. معناداری در توابع عکس‌العمل آنی به این معنا است که عکس‌العمل متغیرهای مربوطه به لحاظ آماری صفر نباشد و این مسئله زمانی رخ می‌دهد که توارهای اطمینان در یک سوی محور افقی قرار گیرند (لانژ، ۲۰۱۰).

نمودار ۱. اثر تکانه تولید برق از انرژی تجدیدپذیر بر توسعه پایدار



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۲. اثر تکانه تولید برق از انرژی تجدیدناپذیر بر توسعه پایدار



منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که در بالا مشاهده می‌شود تأثیر ایجاد یک شوک در سهم انرژی تجدیدپذیر در تولید برق بر توسعه پایدار مثبت است. عکس‌العمل توسعه پایدار به شوک تولید برق از منابع تجدیدناپذیر نیز مثبت می‌باشد. بنابراین مصرف انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر موجب رشد و بهبود توسعه پایدار در ایران می‌شود. ایجاد یک تکانه در تولید برق از انرژی تجدیدپذیر موجب افزایش توسعه پایدار از دوره اول شده و پس از به حداکثر رسیدن در دوره ۶ به آرامی میرا می‌شود. همچنین اثر افزایش تولید برق تجدیدناپذیر بر توسعه پایدار پس از ۵ دوره ظاهر شده و در دوره ۲۰ به اوج خود رسیده و سپس به تدریج میرا می‌شود اما نکته قابل توجه این است که عکس‌العمل توسعه پایدار به شوک انرژی تجدیدناپذیر در طول دوره مورد بررسی بی‌معنا می‌باشد، درحالی‌که عکس‌العمل توسعه پایدار به انرژی تجدیدپذیر از دوره ۱ تا ۱۵ معنادار و مثبت بوده و بعد از آن بی‌معنا شده است که حاکی از حساسیت سریع و بدون وقفه توسعه پایدار به انرژی تجدیدپذیر است. نتیجه به دست آمده با نتایج مطالعاتی که تأثیر شوک مثبت انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر رشد اقتصادی را در کشورهای مختلف بررسی کرده‌اند مطابقت دارد. به دلیل اینکه رشد اقتصادی و به دنبال آن افزایش پس‌انداز ناخالص ملی از مؤلفه‌های تأثیرگذار بر توسعه پایدار به شمار می‌رود، عواملی که موجب رشد سریع اقتصادی شوند می‌توانند در کوتاه‌مدت کشور را در مسیر ارتقای توسعه پایدار قرار دهند. اما باید توجه داشت که در بلندمدت توجه یک‌جانبه به رشد اقتصادی و مصرف بی‌رویه انرژی‌های فسیلی در کشور به دلیل هزینه کمتر نصب و راه‌اندازی نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر پیامدهای زیست‌محیطی مخربی خواهد داشت که توسعه پایدار را با مشکل مواجه می‌کند. عکس‌العمل انرژی تجدیدپذیر به شوک وارده به توسعه پایدار مثبت و از دوره ۱ تا ۲۵ معنادار است؛ نتایج حاکی از آن است که اثر تکانه ایجاد شده در توسعه پایدار بر انرژی تجدیدناپذیر منفی و تا دوره ۲۵ معنادار است. همچنین عکس‌العمل تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به شوک توسعه پایدار ماندگار نبوده و به تدریج میرا می‌شود. نتایج مطالعات انجام‌شده در خصوص انرژی و رشد اقتصادی حاکی از آن است که شوک مثبت رشد اقتصادی تأثیر مثبت بر انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر داشته است (مزقانی و بن‌حداد، ۲۰۱۷) و آنتوناکاکیس و کاتزیانتونو، (۲۰۱۷)). نتایج به دست آمده از رابطه توسعه پایدار و انرژی متفاوت است، در رشد اقتصادی توجهی به اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی مصرف منابع انرژی نمی‌شود و افزایش رشد اقتصادی موجب رشد

سرمایه فیزیکی و در نتیجه سرمایه‌گذاری بیشتر در بهره‌برداری از منابع انرژی به ویژه انرژی‌های فسیلی می‌شود؛ اما شوک مثبت توسعه پایدار و دستیابی به مراحل بالاتر توسعه پایدار در کشور موجب می‌شود تمرکز بر کیفیت محیط زیست و رفاه اجتماعی که از مؤلفه‌های دیگر توسعه پایدار هستند افزایش یافته و برنامه‌ریزی در جهت تشویق سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش استفاده از انرژی‌های فسیلی بیشتر شود. می‌توان نتیجه گرفت که هرچند افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید برق موجب افزایش توسعه پایدار در کشور می‌شود اما بهبود و ارتقای توسعه پایدار موجب می‌شود که گرایش به استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر کاهش یافته و انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین آن شود. به عبارت دیگر، برای دستیابی به توسعه پایدار به ویژه در کشورهایی مانند ایران که در حال توسعه محسوب می‌شوند، استفاده از انواع انرژی تجدیدپذیر و فسیلی در تولید برق ضرورت دارد و نمی‌توان تنها با استفاده از منابع تجدیدپذیر و چشم‌پوشی از منابع تجدیدناپذیر به دلیل آسیب‌های زیست‌محیطی آن، به توسعه پایدار دست یافت. استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید برق با محدودیت همیشه در دسترس نبودن منابع انرژی (مانند باد و خورشید و مشکل عدم توانایی ذخیره‌سازی برق در مقیاس بزرگ مواجه است که باعث به وجود آمدن مسائلی همچون ظرفیت پایین بهره‌گیری از این منابع و کاهش ثبات عرضه انرژی می‌شود. این مسائل، لزوم وجود ظرفیت‌های تولیدی پشتیبان که وابسته به انرژی‌های تجدیدناپذیر است را آشکار می‌کند.

به طور کلی استفاده از انرژی پاک، انتخاب مناسب‌تری برای افزایش پایداری است اما اگر دولت بر رشد سریع اقتصادی و افزایش پس‌انداز ناخالص ملی اصرار داشته باشد، انرژی تجدیدناپذیر به دلیل هزینه‌های پایین‌تر آن بیشتر انتخاب خواهد شد. همان‌طور که در محاسبه شاخص توسعه پایدار مشاهده شد، پس‌انداز ناخالص ملی مهم‌ترین مؤلفه توسعه پایدار است. بنابراین در کوتاه‌مدت و در مراحل ابتدایی توسعه توجه به این مؤلفه و تلاش بر رشد آن از اهمیت فراوانی برخوردار است که مصرف انواع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دستیابی به این مهم بسیار تأثیرگذار است. اما پس از رشد پس‌انداز ناخالص ملی و حرکت به سوی توسعه پایدار و بهبود نسبی آن، توجه به سایر مؤلفه‌های توسعه پایدار همچون کاهش منابع طبیعی به ویژه منابع انرژی تجدیدناپذیر و میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی ضرورت دارد. بنابراین رشد شاخص توسعه پایدار در بلندمدت موجب گرایش به افزایش سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و رشد مصرف

آن می‌شود. این نتایج با فرضیه کوزنتس نیز همخوانی دارد. کوزنتس بیان می‌کند که در مراحل اولیه توسعه توجه کشورها به رشد اقتصادی، آنها را از پرداختن به آسیب‌های زیست‌محیطی باز می‌دارد اما با افزایش درآمد و دستیابی به مراحل بالاتر توسعه، توجه به کیفیت محیط زیست افزایش یافته و حرکت به سمت کاهش آلاینده‌ها شتاب می‌گیرد.

اثر توزیعی شوک‌های وارده به متغیرهای سهم انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید برق بر انتشار دی‌اکسید کربن نشان داده شده است. براساس این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در ابتدا موجب افزایش انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن می‌شود اما با گذشت ۳ دوره و رسیدن به نقطه حداکثر، آلودگی هوا کاهش یافته و پس از ۱۵ دوره میرا می‌شود؛ این در حالی است که افزایش سهم انرژی تجدیدناپذیر سبب تشدید آلودگی هوا شده و این اثر پس از ۳۳ دوره از بین می‌رود. به طور کلی افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، افزایش انتشار دی‌اکسید کربن را نیز در پی دارد بنابراین افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در عین حال که موجب بهبود توسعه پایدار در ایران می‌شود آلودگی هوا را نیز در پی خواهد داشت اما آلودگی ناشی از به‌کارگیری انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با انرژی تجدیدناپذیر کمتر بوده و در زمان کوتاه‌تری از بین خواهد رفت. همان‌گونه که در بخش‌های پیشین اشاره شد منابع انرژی تجدیدپذیر آلودگی کمتری در مقایسه با انرژی تجدیدناپذیر ایجاد می‌کنند اما نمی‌توان گفت که منابع تجدیدپذیر منابعی با تولید آلاینده صفر هستند. لذا با توجه به نمودارهای فوق، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جهت میزان انتشار دی‌اکسید کربن بر منابع تجدیدناپذیر ارجحیت دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری در جهت به‌کارگیری تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر در تولید برق در کشور انجام گرفته است. بهبود قوانین در جهت توسعه منابع تجدیدپذیر در کشور، به موازات توسعه منابع تجدیدپذیر در جهان به دلیل مشکلات تغییرات آب و هوایی حاصل شده است. هرچند سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق با توجه به پتانسیل عظیم کشور در این منابع در سطح مطلوبی قرار ندارد. در بخش ابتدایی این مطالعه، پنج نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق و محدودیت‌های هر یک مورد بررسی قرار گرفت. معیارهای اصلی مدل شامل ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی و

زیست محیطی بوده که هر یک از این ابعاد دربرگیرنده معیارهای فرعی زیرمجموعه خود است. در این بخش به منظور رتبه‌بندی تکنولوژی تولید برق تجدیدپذیر، تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی فازی شامل VIKOR و AHP فازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین آنالیز حساسیت با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای آزمون صحت نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم تحقیق، روابط پویا بین توسعه پایدار، انرژی (به تفکیک انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) و انتشار آلاینده‌های هوا در ایران بررسی شد. برای این منظور از روش خودرگرسیون برداری بیزین و توابع عکس‌العمل آبی برای بررسی اثرات شوک‌های وارده به هر متغیر بر متغیرهای دیگر مدل استفاده شد.

در حال حاضر به دلیل افزایش تغییرات آب و هوایی و گرم شدن زمین، دستیابی به توسعه پایدار در کشورها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. ایران کشوری در حال توسعه با نرخ بالای مصرف سالانه برق بوده که موجب پدید آمدن مشکلات زیست محیطی و آلودگی هوا شده است بنابراین ضروری است که به منظور توسعه سیستم پایدار برق از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در تولید برق استفاده شود. با توجه به اینکه هدف اصلی در بخش ابتدایی این مطالعه، ارزیابی و رتبه‌بندی حامل‌های انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق در ایران بود لذا برای نیل به این هدف، پنج نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق و محدودیت‌های هر یک مورد بررسی قرار گرفت، چهارچوب مدل شامل ابعاد و معیارهایی است که منابع تجدیدپذیر براساس آنها ارزیابی شدند. ابعاد اصلی دربرگیرنده ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هستند. با استفاده از نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل معیارها و اوزان آنها می‌توان به یافته‌های زیر اشاره کرد:

۱. نتایج تعیین وزن معیارها حاکی از اهمیت بالاتر معیارهای پتانسیل منابع و کارایی در بعد فنی و معیار هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه و نرخ خرید تضمینی برق تجدیدپذیر در بعد اقتصادی برای توسعه سیستم تولید برق پایدار است. همچنین معیار اشتغال‌زایی در بعد اجتماعی و دو معیار آلودگی هوا و تأثیر منفی بر اکوسیستم توسط نیروگاه به ترتیب مهم‌ترین معیارها در بعد زیست‌محیطی می‌باشند.

۲. نتایج سنجش‌نهایی گزینه‌ها با در نظر گرفتن تمامی معیارها و میزان اهمیت هر معیار و با استفاده از تکنیک VIKOR نشان داد که نیروگاه بادی با کمترین مقدار Q به عنوان بهترین تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور شناخته شده و نیروگاه‌های خورشیدی، برق آبی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده در رتبه‌های بعدی از لحاظ اولویت قرار گرفتند.

۳. نتایج تحلیل حساسیت روش ویکور بر نتیجه به دست آمده فوق‌صحه می‌گذارد. با در نظر گرفتن مقادیر مختلف، نتایج بیانگر اولویت تکنولوژی انرژی بادی در بین ۵ نیروگاه تجدیدپذیر است.

نتایج بررسی الگوی انرژی - آلودگی هوا - توسعه پایدار به شرح زیر است:

۱. براساس معیار RMSE، استفاده از تابع پیشین SSVS-Full برای بررسی رابطه انرژی تجدیدپذیر و توسعه پایدار و تابع پیشین نرمال - ویشارت مستقل برای بررسی رابطه بین انرژی تجدیدناپذیر و توسعه پایدار نسبت به سایر توابع پیشین در روش «خودرگرسیون برداری بیزین» مناسب‌تر است.

۲. نتایج توابع عکس‌العمل آبی نشان می‌دهد که شوک مثبت انواع انرژی (افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) رابطه مثبت با توسعه پایدار در ایران دارد؛ لکن عکس این قضیه صادق نیست. به عبارت دیگر واکنش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به شوک وارده به توسعه پایدار مثبت است اما شوک مثبت توسعه پایدار رابطه منفی با منابع تجدیدناپذیر دارد. همچنین افزایش تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، افزایش انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن را نیز در پی دارد اما آلودگی ناشی از به‌کارگیری انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با انرژی تجدیدناپذیر کمتر بوده و در زمان کوتاه‌تری از بین خواهد رفت. با جمع‌بندی نتایج حاصل از پژوهش حاضر، پاسخ سؤالات تحقیق به شرح زیر است:

کدامیک از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق در ایران دارای اولویت است؟ براساس محاسبات انجام‌شده و نتایج برآوردها، تکنولوژی انرژی بادی بر دیگر انواع انرژی برتری دارد. انرژی‌های خورشیدی، برق آبی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج تحلیل حساسیت نیز صحت نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند.

چگونگی رابطه بین سهم انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر از تولید برق و توسعه پایدار نتایج توابع عکس‌العمل آبی نشان می‌دهد که شوک مثبت انواع انرژی (افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) رابطه مثبت با توسعه پایدار در ایران دارد. همچنین براساس توابع عکس‌العمل آبی، واکنش منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به شوک مثبت توسعه پایدار متفاوت است. با ارتقای توسعه پایدار در کشور، گرایش به تولید برق از منابع تجدیدپذیر افزایش و از منابع تجدیدناپذیر کاهش می‌یابد. براساس نتایج تحقیق و

لزوم استفاده از منابع تجدیدناپذیر در دستیابی به توسعه پایدار در کشور توجه به این نکته ضرورت دارد که حرکت به سمت جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر با منابع تجدیدناپذیر در کشور باید به آهستگی و با شیب ملایم صورت گیرد. کاهش یکباره استفاده از منابع فسیلی نه تنها کمکی به توسعه کشور نمی‌کند بلکه با توجه به هزینه بالای نصب و راه‌اندازی فناوری‌های تجدیدپذیر و سهم ناچیز این منابع در سبد انرژی کشور موجب کاهش رشد اقتصادی و به تبع آن کاهش توسعه پایدار می‌شود.

نتایج، رابطه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در آلودگی هوا این‌طور نشان می‌دهند که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، افزایش انتشار دی‌اکسید کربن را در پی دارد، لذا افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در عین حال که موجب بهبود توسعه پایدار در ایران می‌شود آلودگی هوا را نیز در پی خواهد داشت اما آلودگی ناشی از مصرف انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با انرژی تجدیدناپذیر کمتر بوده و در زمان کوتاه‌تری از بین خواهد رفت.

۷. تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

۸. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از نظرات ارزشمند داوران گرامی در راستای بهبود کیفی مقاله سپاسگزاری می‌نمایند.

ORCID

Amrollah Amini



<https://orcid.org/0000-0002-8571-3362>

Hassan Amoozadeh Khalili



<https://orcid.org/0000-0002-8878-4588>

۹. منابع

بریمانی، مهدی و کعبی‌نژادیان، عبدالرزاق. (۱۳۹۳). انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه پایدار در ایران. دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱، ۲۶-۲۱.

تکلیف، عاطفه؛ محمدی، تیمور و بختیار، محسن. (۱۳۹۵). گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش آن در توسعه آینده صنعت نیروگاهی ایران. فصلنامه پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی، ۷(۲۵)، ۱۴۳-۱۵۸.

الویت‌بندی روابط متقابل سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در توسعه پایدار | امینی و همکار | ۹۳

شعربافیان، نیلوفر. (۱۳۸۷). برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران: راهکاری برای توسعه پایدار انرژی خورشیدی. *مطالعات اقتصاد انرژی*، ۱۵، ۳۵-۵۴.

صادقی، حسین و خاکسارآستانه، سمانه. (۱۳۹۳). ارائه یک الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی استوار. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۳، ۱۹۵-۱۵۹.

ممینی، حسین و یزدانی چمزینی، عبدالرضا (۱۳۹۳). ارائه یک روش جدید برای اولویت‌بندی استراتژی‌های سرمایه‌گذاری در بخش خصوصی ایران. *دانش سرمایه‌گذاری*، ۱۱، ۲۸۹-۲۵۹.

References

- Ahmad, S. and Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable energy*, Vol. 63, pp. 458-466.
- Al-Mulali, U., Saboori, B., and Ozturk, I. (2015). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, Vol. 76, pp. 123-131.
- Amer, M. and Daim, T. U. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 15(4), pp. 420-435.
- Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I. and Hough, R. L. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, pp. 461-475.
- Amri, F. (2016). The relationship amongst energy consumption, foreign direct investment and output in developed and developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, pp. 694-702.
- Amri, F. 2016. The relationship amongst energy consumption, foreign direct investment and output in developed and developing Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, pp. 694-702.
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I. and Filis, G. (2017). Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: an ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 808-824.
- Apergis, N. and Payne, J. E. (2009). Energy consumption and economic growth: evidence from the Commonwealth of Independent States. *Energy Economics*, Vol. 31(5), pp. 641-647.
- Apergis, N. and Payne, J. E. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption-growth nexus: Evidence from a panel error correction model. *Energy Economics*, Vol. 34(3), pp. 733-738.

- Asumadu-Sarkodie, S. and Owusu, P. A. (2016). Carbon dioxide emissions, GDP, energy use, and population growth: a multivariate and causality analysis for Ghana, 1971–2013. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23(13), pp. 13508-13520.
- Atmaca, E. and Basar, H. B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). *Energy*, Vol.44(1), pp.555-563.
- Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A. and Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15(4), pp. 1753-1766.
- Baris, K. and Kucukali, S. (2012). Availability of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective. *Energy Policy*, Vol. 42, pp. 377-391.
- Bélaïd, F. and Youssef, M. (2017). Environmental degradation, renewable and non-renewable electricity consumption, and economic growth: Assessing the evidence from Algeria. *Energy Policy*, Vol. 102, pp. 277-287.
- ENVI. (2011). *Impact of Shale gas and shale oil extraction on the environment and on human health*. European Parliament Committees.
- Jebaraj, S., & Iniyan, S. (2006). A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 281-311.
- Khatami Firouzabadi, A., & Ghazimatin, E. (2013). Application of preference ranking organization method for enrichment evaluation method in energy planning-regional level. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 10(4), 67-81.
- Koop, G. M. (2013). Forecasting with medium and large Bayesian VARs. *Journal of Applied Econometrics*, 28(2), 177-203.
- Lange, K. (2010). *Advanced Optimization Topics*. In *Numerical Analysis for Statisticians* (297-332). Springer New York.
- Li, G. and Fang, C. (2014). Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green GDP' accounting. *Ecological Indicators*, Vol. 46, pp. 293-314.
- Mathews, A. P. (2014). Renewable energy technologies: panacea for world energy security and climate change?. *Procedia Computer Science*, Vol. 32, pp. 731-737.
- Mathiesen, B. V., Lund, H. and Karlsson, K. (2011). 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. *Applied Energy*, Vol. 88(2), pp. 488-501.
- Mezghani, I. and Haddad, H. B. (2017). Energy consumption and economic growth: An empirical study of the electricity consumption in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 145-156.

- Payne, J. E. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption-growth nexus: evidence from a panel error correction model, *Energy Economics*, Vol. 34, pp. 733-738.
- Sabour, S. A. A. (2005). Quantifying the external cost of oil consumption within the context of sustainable development. *Energy policy*, Vol. 33(6), pp. 809-813.
- Shilpa, C., Zabiullah, S., & Venugopal, N. (2015). Implementation of solar power converter for DC distribution by incremental conductance controller. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 3, 322-328.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B., Janssen, P., & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4(1), 5-17.
- Wang, Z., and Yang, L. (2015). Delinking indicators on regional industry development and carbon emissions: Beijing–Tianjin–Hebei economic band case. *Ecological Indicators*, Vol. 48, pp. 41-48.
- Yu, X., & Qu, H. (2013). The role of China's renewable powers against climate change during the 12th Five-Year and until 2020. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 401-409.
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., & Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, 87(2), 380-388.

استناد به این مقاله: امینی، امراله؛ عموزاده خلیلی، حسن. (۱۴۰۰). الویت‌بندی روابط متقابل سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در توسعه پایدار، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۳۸ (۱۰)، ۶۵-۹۵.



Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.