

ارزیابی مبتنی بر شواهد از بلوغ فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر هوشمند و سناریوهای آینده

محمدامین ادهمی^{۱*}، مسعود براتی^۲

۱- گروه مدیریت، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، mohammadamin.adhami@iau.ac.ir

۲- گروه مدیریت، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، barati_masoud@iau.ac.ir

چکیده

تحول نظام‌های انرژی در دهه‌های اخیر نشان‌دهنده افزایش چشمگیر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و امنیت انرژی است. رشد ظرفیت منابع تجدیدپذیر، خصوصاً منابع هوشمند، به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، بیانگر تغییر تدریجی الگوی تأمین انرژی از سوخت‌های فسیلی به سمت منابع پاک، پایدار و یکپارچه با فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی است. بررسی روندهای جهانی و منطقه‌ای حاکی از آن است که اگرچه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در برخی از کشورها شتاب گرفته، اما میزان بهره‌برداری از این منابع به شدت تحت تأثیر عوامل فناورانه، نهادی، اقتصادی و اجتماعی قرار دارد. در ایران نیز با وجود ظرفیت بالقوه بالا، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در سبد تولید برق محدود باقی مانده است؛ که این امر ناشی از موانع ساختاری، اقتصادی، فناوری و سیاستی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که دستیابی به آینده‌ای پایدار در حوزه انرژی مستلزم اتخاذ رویکردی جامع شامل سرمایه‌گذاری هدفمند، توسعه زیرساخت‌ها، ادغام فناوری‌های هوشمند و سیستم‌های پیش‌بینی و ذخیره‌سازی انرژی و ارتقای پذیرش اجتماعی است. حرکت به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند نه تنها به کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود سلامت عمومی منجر می‌شود، بلکه نقش مهمی در تقویت امنیت انرژی، بهینه‌سازی شبکه و توسعه پایدار ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: امنیت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند، شبکه‌های هوشمند.

۱- مقدمه

همزمان با رشد فناوری و صنعت، نیاز به انرژی به طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. این نیاز خصوصاً با آغاز انقلاب صنعتی و ظهور ماشین‌آلات، بیشتر شد در عمل موجب آن شد که سوخت‌های فسیلی شامل زغال‌سنگ، نفت، گاز و مشتقات آن‌ها راه خود را برای تولید و مصرف انرژی باز کنند. تولید و مصرف این نوع انرژی، اثرات تخریبی فراوانی بر محیط زیست داشته و همچنان ادامه دارد؛ از جمله تغییرات اکوسیستم‌ها، تخریب و از بین رفتن برخی گونه‌های گیاهی و جانوری، بروز بیماری‌های قلبی و تنفسی در انسان و حتی تغییرات دمای کره زمین تنها بخشی از این آثار است [۱]. تغییرات آب و هوایی عمدتاً ناشی از استفاده گسترده و طولانی مدت از سوخت‌های فسیلی است و تأثیر عمیقی بر سیستم آب و هوای زمین داشته است که منجر به مجموعه‌ای از پیامدهای زیست محیطی می‌شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی مقادیر زیادی گازهای گلخانه‌ای را آزاد می‌کنند و به ویژه دی اکسید کربن وارد جو می‌شود که گرما را به دام می‌اندازد و باعث ایجاد افزایش دمای جهانی می‌شود این افزایش دما منجر به یک سری رویدادهای آب و هوایی شدید، مانند طوفان‌های شدیدتر و مکرر، خشکسالی، موج گرما، و رویدادهای بارندگی شدید. علاوه بر این، گرم شدن هوا به ذوب شدن یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی کمک کرده است که باعث افزایش قابل توجه سطح دریا می‌شود این افزایش تهدیدی برای سواحل است. این امر در جوامع و اکوسیستم‌ها باعث تغییر در الگوهای دما و منجر به افزایش سیل و فرسایش می‌شود. همچنین سیستم‌های زیست محیطی طبیعی و حیات وحش را مختل کرده است و بر تنوع زیستی و تعادل انواع مختلف تأثیر می‌گذارد [۲].

بدین ترتیب توسعه فناوری و صنایع مختلف در دهه‌های اخیر باعث تغییرات گسترده‌ای در اقلیم و محیط زیست جانداران، از جمله انسان‌ها، گیاهان و جانوران شده است. به عبارت دیگر، همراه با رشد صنعت و پیشرفت فناوری، یکی از مهم‌ترین تحولات ایجاد شده در عرصه پیرامون حیات جانداران یا همان محیط زیست بوده است. تولید و مصرف انرژی، به‌ویژه از منابع فسیلی، موجب تغییرات و تهدیدات زیست محیطی قابل توجهی شده است [۳].

با توجه به پیامدهای زیست محیطی گسترده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، گرایش جوامع به استفاده از انرژی‌های پاک در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. انرژی‌های پاک به منابعی اطلاق می‌شوند که ماهیتی تجدیدپذیر در طبیعت دارند و شامل انرژی‌های بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی، زیست‌توده و آبی می‌شوند. با این حال، کارایی، پایداری و اثربخشی این منابع تنها به ماهیت تجدیدپذیر آن‌ها محدود نمی‌شود، بلکه به نحوه مدیریت، کنترل و یکپارچه‌سازی آن‌ها در سیستم انرژی نیز وابسته است.

در همین راستا، توسعه فناوری‌های دیجیتال، شبکه‌های هوشمند، سیستم‌های پایش و مدیریت داده‌محور و الگوریتم‌های هوشمند تصمیم‌گیری، مفهوم «انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند» را مطرح کرده است؛ مفهومی که در آن، تولید، توزیع و مصرف انرژی با اتکا بر داده‌های لحظه‌ای و ابزارهای هوشمند بهینه می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بهره‌گیری از این رویکردهای هوشمند نه تنها می‌تواند اثرات زیست محیطی انرژی‌های تجدیدپذیر را کاهش دهد، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب فناوری مناسب، افزایش بهره‌وری و تضمین پایداری بلندمدت نظام انرژی ایفا می‌کند. از این رو، توسعه فناوری‌های نوین در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه در پیوند با هوشمندسازی، به یکی از محورهای اصلی تحقیقات علمی معاصر تبدیل شده است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مبتنی بر شواهد از میزان بلوغ فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند و تحلیل سناریوهای آینده توسعه آن‌ها، می‌کوشد تصویری واقع‌بینانه از مسیر تحول این فناوری‌ها در نظام انرژی ارائه دهد.

۲- مبانی نظری

بخش انرژی در طول تاریخ در انواع روش‌های تولید و روش‌های استفاده از منابع، مشمول سه روند اساسی بوده است: تولید ساده به تولید تکنولوژیک که به روند استفاده انسان‌های اولیه از چوب به عنوان منبع تأمین انرژی تا توسعه نوآوری‌های

تکنولوژیک در زمینه انرژی های تجدیدناپذیر اشاره دارد، توسعه انرژی از کربن بالا به کربن پایین که تولید از طریق سوخت فسیلی به انرژی تجدیدناپذیر است و استفاده یکباره به چندانگانه که به تولید برق از طریق انرژی با روش های القای الکترومغناطیسی مربوط می شود [۴]. طی تمام دوران ها بخش انرژی که بخشی جدایی ناپذیر از زندگی بوده است و نقش مهمی در شکل گیری و حفظ قدرت های بزرگ در اقتصاد جهانی ایفا کرده. تا به امروز که انرژی و قدرت آن توسط سیاست گذاران در زمینه های حفاظت از منابع طبیعی، مبارزه با تغییرات آب و هوا و حل و فصل به دقت دنبال شده است [۲]. به گونه ای که امروزه انرژی نقش مهمی در رشد و توسعه اقتصادی یک کشور دارد و به عنوان یکی از عوامل بنیادین تولید و رشد اقتصادی مطرح، هم به عنوان ورودی فیزیکی مستقیم در فرآیند تولید و هم به عنوان محرک سرمایه گذاری، فناوری و توسعه زیرساخت ها در تولید، توزیع و مصرف همه کالاها و خدمات استفاده می شود [۵].

مطالعات متعدد حاکی از آن است که بهره برداری از سوخت های فسیلی متداول نظیر زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت، نقش مهمی در رشد اقتصادی کشورها ایفا کرده است. با این وجود، اتکال گسترده به منابع تجدیدناپذیر و مصرف بالای سوخت های فسیلی موجب انتشار مقادیر قابل توجهی دی اکسید کربن در محیط زیست شده و در نتیجه به تشدید پدیده اثر گلخانه ای منجر می شود [۶].

با وجود معایب زیست محیطی، انرژی های تجدیدناپذیر هنوز بخش عمده ای از تقاضای جهانی انرژی را تأمین می کنند، زیرا زیرساخت های تولید و توزیع آن ها گسترده و اقتصادی تر از بسیاری از منابع جایگزین است. با این حال، ادامه مصرف این منابع در بلندمدت پایدار نیست و جایگزینی تدریجی آن ها با انرژی های پاک و سرمایه گذاری در فناوری های نوین، پیش شرط دستیابی به امنیت انرژی و توسعه پایدار است. تحولات اخیر در ساختار جهانی انرژی، رشد سریع ظرفیت های تجدیدپذیر، سرمایه گذاری بزرگ در فناوری های پاک و تغییر در الگوی تقاضا و ... نشان می دهد که نقش انرژی در رشد اقتصادی دیگر مشابه دهه های گذشته نیست. اکنون هم کمیت به معنای دسترسی و تأمین و هم کیفیت به معنای نوع منابع، کارایی و پایداری انرژی بر توسعه و رشد اقتصادی نقش تعیین کننده ای دارد [۷]؛ از این رو امروزه توسعه و تولید انرژی های تجدیدپذیر در نتیجه حساسیت های زیست محیطی، نگرانی از پایداری منابع سوخت های فسیلی و اهمیت تنوع بخشی به منابع تأمین انرژی، بیش از پیش در دستور کار سیاست گذاری کشورهای مختلف قرار گرفته است. سهم منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی جهانی طی سال های اخیر روندی افزایشی داشته است؛ به طوری که از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۲۱، سهم این انرژی ها در سبد مصرف جهانی تقریباً دو برابر شده و به حدود ۲۲ درصد رسیده است [۸]. همچنین پیش بینی می شود تا سال ۲۰۴۰، سهم انرژی های تجدیدپذیر در ترکیب کل انرژی جهان به حدود ۴۵ درصد افزایش یابد. در میان انواع انرژی های تجدیدپذیر، بیشترین توجه به انرژی بادی، خورشیدی و برق آبی معطوف خواهد بود [۹].

در سال های اخیر، ادبیات علمی از تمرکز صرف بر توسعه کمی انرژی های تجدیدپذیر فراتر رفته و مفهوم «انرژی های تجدیدپذیر هوشمند» را به عنوان مرحله ای پیشرفته تر از گذار انرژی مطرح کرده است. در این رویکرد، منابع تجدیدپذیر در قالب یک نظام یکپارچه و داده محور مورد استفاده قرار می گیرند که با بهره گیری از فناوری هایی نظیر شبکه های هوشمند، اینترنت اشیا، کلان داده و هوش مصنوعی، امکان مدیریت همزمان تولید، توزیع و مصرف انرژی را فراهم می سازد [۱۰]. پژوهش ها نشان می دهند که هوشمندسازی انرژی های تجدیدپذیر نقش مهمی در افزایش قابلیت پیش بینی تولید، کاهش نوسانات ناشی از وابستگی به شرایط طبیعی و ارتقای انعطاف پذیری شبکه های انرژی ایفا می کند. از این منظر، بلوغ فناوری های انرژی تجدیدپذیر نه تنها به سطح توسعه فنی آن ها، بلکه به میزان ادغام آن ها با سامانه های هوشمند و دیجیتال وابسته است. بنابراین، گذار از انرژی های تجدیدپذیر سنتی به انرژی های تجدیدپذیر هوشمند را می توان به عنوان یک تحول همزمان فناوریانه، نهادی و مدیریتی در نظر گرفت که نقش تعیین کننده ای در آینده نظام های انرژی و سناریوهای توسعه پایدار ایفا خواهد کرد [۱۱].

۳- انرژی تجدیدپذیر در کشورهای خلیج فارس

با وجود برخورداری کشورهای خلیج فارس از منابع انرژی فراوان، وابستگی شدید به نفت و نیاز به ایجاد اقتصادی پایدار، این کشورها را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. در این زمینه، حرکت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر صرفاً یک گزینه نیست، بلکه یک ضرورت راهبردی محسوب می‌شود. سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، شامل نیروگاه‌های بادی، خورشیدی و سایر منابع پاک، همراه با توسعه شبکه‌های توزیع هوشمند و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، می‌تواند دسترسی به انرژی پایدار را تسهیل کرده و بهره‌وری استفاده از منابع انرژی را افزایش دهد. پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های مدیریت مصرف انرژی در سطح شهری و صنعتی، امکان پایش لحظه‌ای تولید و مصرف و تطبیق تقاضا با عرضه انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کند که این امر به کاهش اتلاف انرژی و افزایش پایداری شبکه کمک می‌کند [۱۲].

افزایش تقاضای جهانی برای انرژی‌های پاک فرصت بی‌نظیری برای کشورهای خلیج فارس فراهم کرده است تا نه تنها جایگاه خود را در بازار جهانی انرژی حفظ کنند، بلکه به رهبران منطقه‌ای و بین‌المللی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل شوند. این روند، علاوه بر تقویت توسعه اقتصادی، اعتبار بین‌المللی و تصویر این کشورها را به عنوان پیشروان اقتصادی آینده‌نگر و مدافعان محیط زیست ارتقا می‌دهد. از این رو، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و استقرار فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی برای کشورهای خلیج فارس نقش حیاتی در تضمین پایداری مالی و رشد اقتصادی بلندمدت ایفا می‌کند [۱۲].

۴- انرژی تجدیدپذیر در ایران

در ایران، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از زمانی اهمیت بیشتری یافت که پژوهش‌ها نشان دادند اتکال صرف به منابع طبیعی، به‌ویژه نفت، اگرچه در کوتاه‌مدت محرک رشد اقتصادی است، اما در بلندمدت لزوماً به توسعه پایدار منجر نمی‌شود [۱۳]. ایران با وجود ذخایر گسترده سوخت‌های فسیلی، از ظرفیت بالقوه قابل توجهی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نیز برخوردار است. از لحاظ تابش خورشیدی، حدود ۹۰ درصد از سطح کشور حداقل ۳۰۰ روز آفتابی در سال دارد و میانگین تابش خورشیدی بین ۴ تا ۵.۵ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در روز است که این ظرفیت برای تولید برق قابل توجه است [۱۴]. افزون بر این، انرژی بادی در مناطق غربی و شمال‌غربی، نیروگاه‌های برق آبی کوچک و متوسط و انرژی زیست‌توده نیز از دیگر منابع تجدیدپذیر مهم کشور هستند [۱۵].

ایران در اسناد بالادستی و برنامه‌های توسعه ملی، تلاش کرده است سهم بیشتری از تولید برق خود را از منابع پاک تأمین کند؛ اقدامی که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش استقلال انرژی کشور را به همراه دارد [۱۶]. برنامه‌های ملی شامل هدف‌گذاری تولید ۵۰۰۰ مگاوات برق خورشیدی و ۳۰۰۰ مگاوات برق بادی تا سال ۲۰۳۰ است و دولت با ارائه مشوق‌های مالی و تسهیلات بانکی در پی جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی برای این پروژه‌ها می‌باشد [۱۷].

با توجه به رشد فناوری‌های هوشمند، توسعه شبکه‌های انرژی هوشمند و سیستم‌های مدیریت تقاضای انرژی می‌تواند چالش‌های ناشی از نوسان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را کاهش داده و امکان بهینه‌سازی مصرف را فراهم کند [۱۸]. علاوه بر این، به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی هوشمند انرژی و فناوری‌های پیشرفته پیش‌بینی تولید برق خورشیدی و بادی، امکان یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر در شبکه ملی برق را افزایش می‌دهد. با وجود این ظرفیت‌ها، سهم واقعی انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی ایران هنوز پایین است و تنها حدود ۷.۵ درصد از تولید برق کشور در سال‌های اخیر از منابع تجدیدپذیر و هسته‌ای تأمین شده است [۱۴]. این شکاف میان ظرفیت بالقوه و عملکرد واقعی، نشان‌دهنده چالش‌های ساختاری، سیاستی و فناوری در بخش انرژی کشور است که توسعه منابع پاک را محدود کرده است [۱۹]. راهکارهای مبتنی بر انرژی هوشمند می‌توانند به کاهش این شکاف و افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کمک کنند و نقش کلیدی در تحقق اهداف پایداری انرژی در ایران ایفا نمایند.

۵- موانع توسعه انرژی تجدیدپذیر

با وجود آنکه سیستم انرژی های تجدیدپذیر بنابر عدم تولید گازهای گلخانه ای یا سایر انتشارات آلاینده بسیار مورد توجه بوده و حتی به جهت پتانسیل بسیار زیاد برای کربن زدایی محیط زیست، شهرت یافته اند و جهان به سرعت در حال اتخاذ جایگزین های انرژی های تجدیدپذیر با سرعت قابل توجهی برای مقابله با مشکلات روزافزون است [۲]؛ توسعه انرژی های تجدیدپذیر در ایران و بسیاری از کشورهای در حال توسعه با مجموعه ای از موانع روبه رو است که بهره برداری کامل از پتانسیل این منابع را محدود می کند. این موانع را می توان به چند دسته کلی تقسیم کرد:

الف) ساختار اقتصادی و قیمت سوخت های فسیلی

در ایران، ساختار اقتصادی مبتنی بر منابع فسیلی و قیمت پایین سوخت های سنتی مانند نفت و گاز باعث شده است هزینه تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در مقایسه با انرژی های فسیلی کمتر جذاب به نظر برسد و انگیزه سرمایه گذاری بخش خصوصی کاهش یابد. همچنین، فقدان چارچوب های قانونی حمایتی و سیاست های تشویقی مشخص، مانع مهم دیگری در توسعه این بخش است [۲۰]؛ [۶].

ب) کمبود زیرساخت و فناوری

زیرساخت های فنی مورد نیاز برای توسعه انرژی های تجدیدپذیر، به ویژه در بخش های برق و شبکه انتقال، در بسیاری از مناطق ایران ناپایدار یا ناقص است. محدودیت در دسترسی به فناوری های نوین، تجهیزات پیشرفته و زنجیره تأمین قوی نیز مانع توسعه این بخش می شود [۲۱]. برای ادغام انرژی های تجدیدپذیر در شبکه های برق موجود، توسعه شبکه های هوشمند و فناوری های پیشرفته مدیریت انرژی ضروری است، اما بسیاری از کشورها هنوز در مسیر پیاده سازی کامل این فناوری ها چالش دارند [۲۲]؛ [۲۳].

پ) سرمایه گذاری اولیه بالا و محدودیت های مالی

هزینه بالای سرمایه گذاری اولیه برای پروژه ها، تجهیزات نوین و زیرساخت های مرتبط یکی از مهم ترین موانع توسعه انرژی های تجدیدپذیر است. در بسیاری از کشورها، به ویژه اقتصادهای در حال توسعه، ابزارهای مالی مناسب برای پشتیبانی از این سرمایه گذاری ها وجود ندارد یا ناکافی است، که موجب کاهش تمایل بخش خصوصی به مشارکت می شود [۲۲].

ت) ناپایداری منابع و ذخیره سازی انرژی

منابع انرژی های تجدیدپذیر مانند خورشید و باد به طور ذاتی متغیر و غیرپایسته هستند. این ناپایداری بدون سیستم های پیشرفته ذخیره سازی می تواند باعث بی ثباتی شبکه و عدم تأمین تقاضای لحظه ای شود، که یکی از چالش های جهانی توسعه انرژی پاک است [۲۲].

ث) چالش‌های اجتماعی و پذیرش عمومی

پذیرش اجتماعی نیز از چالش‌های کلیدی است. عواملی مانند ادراک عمومی، کمبود آگاهی، مقاومت رفتاری و نگرانی‌های زیباشناختی می‌توانند مانع نصب و استفاده از فناوری‌های جدید انرژی‌های پاک شوند و سرعت توسعه را کاهش دهند [۲۲].

ج) چالش‌های زیست‌محیطی و استفاده از زمین

با اینکه انرژی‌های تجدیدپذیر انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند، برخی فناوری‌ها مانند نیروگاه‌های بادی می‌توانند اثرات زیست‌محیطی دیگری ایجاد کنند، از جمله تغییر کاربری زمین، تأثیر بر اکوسیستم‌ها و مهاجرت حیات وحش، که نیازمند ارزیابی‌های محیط‌زیستی دقیق است [۲۲].

چالش‌های نهادی و قانونی

نبود سیاست‌های منسجم و پایدار که سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی را به مشارکت ترغیب کند و عدم هماهنگی بین دستگاه‌های دولتی، از موانع مهم توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح ملی هستند [۲۴].

د) محدودیت‌های سیاسی و بین‌المللی

تحریم‌های بین‌المللی محدودیت‌هایی در دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و سرمایه‌گذاری خارجی ایجاد کرده و سرعت رشد صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر را کاهش داده است [۶].

ه) آگاهی و مشارکت اجتماعی محدود

سطح آگاهی عمومی درباره مزایای انرژی‌های پاک هنوز توسعه نیافته و مشارکت فعال مردم در تولید و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر محدود است. بدون حمایت و مشارکت مردم، بسیاری از پروژه‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها به سختی موفق می‌شوند [۶].

۶- مزایای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند

با وجود موانع توسعه، گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر مزایای قابل توجهی دارد که می‌تواند تحولات ساختاری در نظام انرژی کشور ایجاد کند. این مزایا در ادبیات علمی بارها تأکید شده و شامل جنبه‌های زیست‌محیطی، امنیت انرژی، اقتصادی و اجتماعی می‌شود.

الف) کاهش آلودگی و ارتقای سلامت عمومی

یکی از مهم‌ترین مزایای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا در مقایسه با سوخت‌های فسیلی است. انرژی خورشیدی، بادی و دیگر منابع پاک تقریباً هیچ انتشار گازی ایجاد نمی‌کنند که منجر به بهبود کیفیت هوا و کاهش بیماری‌های تنفسی و قلبی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر با کاهش سطح آلاینده‌ها و بهبود وضعیت محیط‌زیست و سلامت عمومی مرتبط است [۲۵].

ب) تقویت امنیت انرژی و استقلال ملی

توسعه منابع تجدیدپذیر می‌تواند وابستگی کشورها به واردات سوخت فسیلی را کاهش داده و امنیت انرژی ملی را افزایش دهد. منابع قابل تجدید مانند خورشید و باد به‌طور محلی در دسترس هستند و با تنوع‌بخشی به سبد انرژی، کشور را در برابر نوسانات بازار جهانی و بحران‌های ژئوپلیتیکی مقاوم‌تر می‌کند [۲۶].

پ) اشتغال‌زایی و توسعه فناوری

رشد بخش انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور مستقیم به ایجاد فرصت‌های شغلی در مراحل مختلف توسعه، از جمله تولید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات منجر می‌شود. ادبیات علمی نشان داده که سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها می‌تواند اقتصاد محلی و ملی را تقویت کرده و اشتغال سبز بیشتری نسبت به انرژی‌های سنتی ایجاد کند [۲۹].

ت) مزایای اقتصادی بلندمدت

اگرچه سرمایه‌گذاری اولیه در پروژه‌های تجدیدپذیر ممکن است نسبت به نیروگاه‌های فسیلی بالاتر باشد، هزینه‌های عملیاتی و سوختی این منابع بسیار کمتر است و با گذشت زمان، اقتصادی‌تر و رقابتی‌تر می‌شوند. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که نیروگاه‌های خورشیدی و بادی نسبت به نیروگاه‌های حرارتی فسیلی نسبت سود به هزینه بالاتری دارند و هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهند، که به بهبود رفاه اجتماعی و کاهش هزینه‌های بلندمدت منجر می‌شود [۳۰].

ث) مزیت‌های اقلیمی و پتانسیل‌های خاص ایران

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی تجدیدپذیر، به ویژه خورشیدی و بادی دارد. کشورهایی با چنین ظرفیت‌هایی می‌توانند سهم بیشتری از انرژی پاک را تولید کنند، که به حفظ محیط‌زیست و افزایش امنیت و پایداری انرژی کمک می‌کند. ایران در عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی قرار دارد و بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در سال دارد، که شرایط بسیار مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی فراهم می‌آورد [۳۱].

۳.۲. تحلیل جایگاه فعلی بر اساس چرخه گارتنر

چرخه گارتنر به‌عنوان یکی از پرکاربردترین چارچوب‌های تحلیلی در حوزه مدیریت و آینده‌پژوهی فناوری، به‌منظور توصیف مسیر تحول فناوری‌های نوظهور بر اساس تغییرات سطح انتظارات و توجه بازار توسعه یافته است. این مدل، برخلاف رویکردهای صرفاً فنی، تمرکز خود را بر پویایی ادراکات، هیجان رسانه‌ای و رفتار سرمایه‌گذاران نسبت به فناوری‌ها در طول زمان قرار می‌دهد. در این چارچوب، تحول فناوری به‌صورت یک منحنی شامل پنج مرحله متوالی از ظهور اولیه تا بلوغ و بهره‌وری پایدار ترسیم می‌شود [۳۲]؛ [۳۳].

مطابق با این مدل، فناوری‌ها در مرحله ابتدایی یا محرک نوآوری^۱ به‌عنوان نوآوری‌هایی نوظهور معرفی می‌شوند که هنوز به سطح بلوغ فنی یا تجاری نرسیده‌اند، اما توجه اولیه ذی‌نفعان را جلب می‌کنند. با افزایش توجه رسانه‌ای و بزرگ‌نمایی قابلیت‌های بالقوه، فناوری وارد مرحله اوج انتظارات اغراق‌آمیز^۲ می‌شود که در آن انتظارات معمولاً فراتر از توان واقعی فناوری است. در ادامه، با آشکار شدن محدودیت‌ها و چالش‌های اجرایی، سطح انتظارات کاهش یافته و فناوری وارد مرحله فرورفتگی سرخوردگی^۳ می‌شود. پس از این مرحله، در صورت تداوم توسعه و یافتن کاربردهای عملی، فناوری به مرحله شیب روشننگری^۴

¹ Innovation Trigger

² Peak of Inflated Expectations

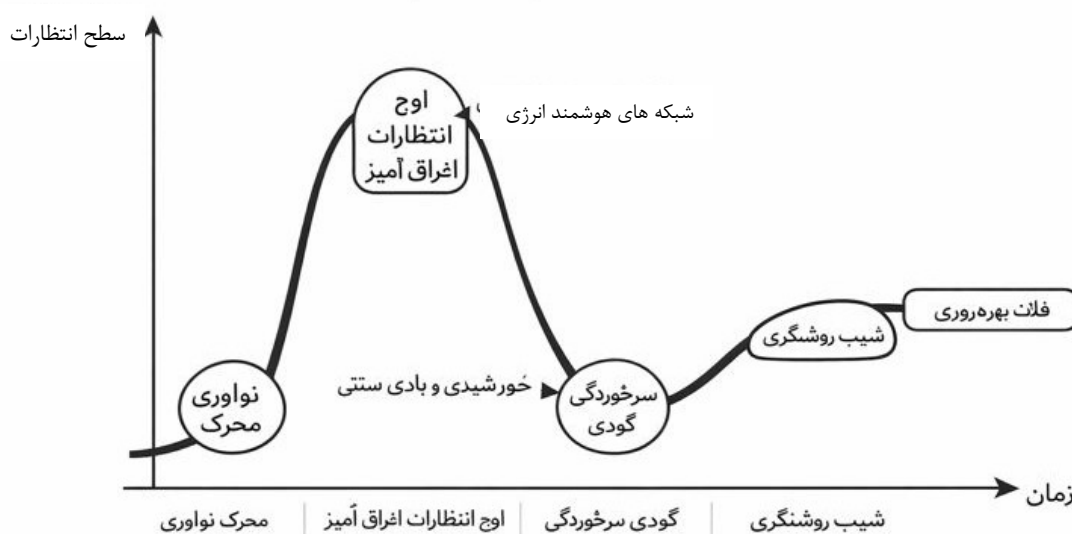
³ Trough of Disillusionment

⁴ Slope of Enlightenment

وارد شده و نهایتاً در صورت پذیرش گسترده، به فلات بهره وری^۵ می‌رسد که نشان‌دهنده بلوغ و بهره‌برداری پایدار در بازار است [۳۲]؛ [۳۴].

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر هوشمند مانند شبکه‌های هوشمند برق با ادغام منابع خورشیدی و بادی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوشمند و فناوری‌های مدیریت تقاضای هوشمند، مسیر بلوغ متفاوتی نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر سنتی دارند [۳۵] مطالعه مروری جامع خود با تحلیل داده‌های تجربی و گزارش‌های رسمی گارتنر نشان می‌دهند که چرخه گارتنر بیش از آنکه یک ابزار پیش‌بینی دقیق باشد، یک چارچوب توصیفی برای تحلیل پویایی «هیجان فناوری» است.

در زمینه انرژی تجدیدپذیر هوشمند، برخی فناوری‌ها ابتدا با افزایش شدید توجه علمی و سرمایه‌گذاری پژوهشی مواجه می‌شوند که می‌توان آن را معادل مرحله «محرک نوآوری» یا حتی «اوج انتظارات» تلقی کرد، ولی به دلیل چالش‌های فناورانه و پیچیدگی‌های ادغام با شبکه‌های موجود، وارد مرحله گودی سرخوردگی می‌شوند، جایی که سرعت توسعه کند شده و انتظارات با واقعیت‌های فنی همسو می‌شود [۳۶]. با این حال، فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر هوشمند که بر سیستم‌های مدیریت انرژی، ذخیره‌سازی پیشرفته، اینترنت اشیاء (IoT) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین تکیه دارند، توانسته‌اند از مرحله شیب روشنگری عبور کنند و وارد مرحله بلوغ اولیه شوند. این فناوری‌ها نشان‌دهنده ادغام موفق انرژی‌های تجدیدپذیر با هوشمندی سیستم‌ها برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود پایداری شبکه است.



نمودار ۱: چرخه گارتنر در انرژی تجدیدپذیر هوشمند

تحلیل چرخه گارتنر در این حوزه می‌تواند سرمایه‌گذاران، سیاست‌گذاران و پژوهشگران را در شناسایی نقاط عطف و اولویت‌های توسعه فناوری راهنمایی کند. بنابراین، به‌کارگیری چرخه گارتنر برای انرژی تجدیدپذیر هوشمند، در کنار مدل‌های دیگر چرخه عمر فناوری و ابزارهای تحلیلی کمی، می‌تواند درک دقیق‌تری از مسیر تحول فناوری، پذیرش بازار و فرصت‌های سرمایه‌گذاری فراهم آورد.

⁵ Plateau of Productivity

۷- تحلیل آینده انرژی تجدیدپذیر

بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، تولید برق از منابع تجدیدپذیر به‌طور پیوسته در حال افزایش است و انتظار می‌رود که سهم آن در تولید جهانی برق تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴۳ درصد برسد، به طوری که انرژی‌های خورشیدی و بادی بیشترین سهم از این رشد را خواهند داشت [۳۷]. این رشد نه تنها در سطح تولید برق مشاهده می‌شود، بلکه سرمایه‌گذاری و نصب ظرفیت‌های جدید نیز در حال افزایش است؛ به طوری که در سال‌های اخیر شاهد افزایش بی‌سابقه ظرفیت نصب‌شده سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هوشمند، شامل شبکه‌های خورشیدی و بادی متصل به شبکه هوشمند و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته بوده‌ایم که نقش بزرگی در تأمین انرژی جدید دارند [۳۸].

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، ظرفیت جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به‌طور چشمگیری افزایش یابد. گزارش‌های علمی حاکی از آن است که ظرفیت تولید انرژی خورشیدی ممکن است تا حدود ۱۸۰۰۰ گیگاوات و ظرفیت باد تا حدود ۸۰۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۵۰ برسد، که نشان‌دهنده روند رو به رشد و پایدار این منابع در آینده انرژی جهانی است. این تغییرات در الگوی تولید انرژی جهانی به معنای کاهش وابستگی به منابع سوخت فسیلی و حرکت به سوی سیستمی پایدارتر و کم‌آلاینده خواهد بود. تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های مدیریت هوشمند انرژی و تحلیل داده‌های تاریخی، می‌توان رشد تقریباً سه‌برابری ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر هوشمند تا سال ۲۰۵۰ را پیش‌بینی کرد، که انرژی خورشیدی و باد سهم عمده‌ای از این رشد خواهند داشت. این نتایج تأکید می‌کنند که سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی بلندمدت می‌تواند مسیر گذار انرژی را به سمت منابع پاک و پایدار تسریع کند [۳۹].

۸- یافته‌ها

تحلیل روند جهانی نشان می‌دهد که انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند به سرعت در حال گسترش هستند و سهم آن‌ها در تولید انرژی جهانی به‌طور پیوسته افزایش یافته است. این منابع نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کنند، بلکه موجب ارتقای کیفیت محیط زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش اثرات منفی بر سلامت عمومی می‌شوند. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در سبد انرژی جهان طی سال‌های اخیر تقریباً دو برابر شده و پیش‌بینی می‌شود که تا چند دهه آینده، سهم آن‌ها از تولید انرژی به میزان قابل توجهی افزایش یابد. این رشد عمدتاً ناشی از سرمایه‌گذاری گسترده، توسعه فناوری‌های نوین و یکپارچه‌سازی سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی، شبکه‌های هوشمند و الگوریتم‌های پیش‌بینی تولید و مصرف است.

در منطقه خلیج فارس، با وجود منابع نفت و گاز فراوان، حرکت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند به دلیل نیاز به تنوع‌بخشی انرژی، کاهش وابستگی به نفت و پاسخ به تقاضای جهانی انرژی پاک، به یک ضرورت تبدیل شده است. کشورها در این منطقه با سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، توسعه شبکه‌های توزیع هوشمند و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته، نه تنها امکان دسترسی پایدار و کارآمد به انرژی را فراهم می‌کنند، بلکه جایگاه منطقه‌ای و بین‌المللی خود را در بازار انرژی ارتقا می‌دهند. این اقدامات نشان‌دهنده تغییر رویکرد از تمرکز صرف بر منابع فسیلی به سمت برنامه‌ریزی بلندمدت، توسعه پایدار انرژی و ادغام فناوری‌های هوشمند با منابع تجدیدپذیر است.

در ایران، با وجود ظرفیت بالقوه بسیار بالا برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند، سهم واقعی این منابع در تولید برق محدود باقی مانده است. با اینکه کشور از تابش خورشیدی گسترده، منابع بادی مناسب، ظرفیت‌های آب کوچک و متوسط و انرژی زیست‌توده برخوردار است، تنها بخش کوچکی از تولید برق کشور از منابع پاک تأمین می‌شود. این محدودیت ناشی از مجموعه‌ای از موانع ساختاری، اقتصادی، فناوری و نهادی است. استفاده از فناوری‌های هوشمند مانند سیستم‌های پیش‌بینی تولید، ذخیره‌سازی انرژی هوشمند و شبکه‌های یکپارچه توزیع، می‌تواند به کاهش این محدودیت‌ها و بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی کمک کند.

بر اساس تحلیل چرخه گارتنر، فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در مراحل مختلف بلوغ قرار دارند. برخی فناوری‌ها مانند سیستم‌های یکپارچه‌سازی منابع برق تجدیدپذیر هوشمند، ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته و مدیریت تقاضای هوشمند، با افزایش توجه علمی و سرمایه‌گذاری در مرحله ابتدایی یا اوج انتظارات قرار دارند، اما به دلیل محدودیت‌های فنی، عملیاتی و اقتصادی وارد مرحله فرورفتگی سرخوردگی می‌شوند. با حل این چالش‌ها و توسعه کاربردهای عملی، فناوری‌ها می‌توانند به مرحله شیب روشن‌گری و نهایتاً فلات بهره‌وری برسند. این تحلیل نشان می‌دهد که مسیر توسعه فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند خطی و یکنواخت نیست و موفقیت آن‌ها وابسته به تعامل عوامل فناورانه، اقتصادی، نهادی و اجتماعی است.

پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که ظرفیت جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند تا سال ۲۰۵۰ به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت و انرژی خورشیدی و بادی سهم عمده‌ای از این رشد را خواهند داشت. این روند منجر به کاهش وابستگی جهانی به سوخت‌های فسیلی، ارتقای امنیت انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و حرکت به سمت سیستم‌های انرژی پایدارتر خواهد شد. مزایای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند نیز آشکار است. این منابع نه تنها به کاهش آلودگی و بهبود سلامت عمومی کمک می‌کنند، بلکه با ایجاد اشتغال در بخش‌های تولید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری، توسعه فناوری، بهینه‌سازی شبکه‌های انرژی و اقتصاد محلی را تقویت می‌کنند. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند با وجود هزینه اولیه بالا، در بلندمدت اقتصادی‌تر و پایدارتر است. موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی ایران، با تابش خورشیدی گسترده و ظرفیت‌های بادی مطلوب، امکان بهره‌برداری گسترده از این منابع را فراهم می‌آورد و می‌تواند به افزایش سهم انرژی پاک هوشمند و پایدار انرژی کشور کمک کند.

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در سطح جهانی و منطقه‌ای روند رو به رشدی دارند، اما تحقق کامل پتانسیل آن‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری هدفمند، توسعه زیرساخت‌ها، ادغام فناوری‌های هوشمند و مدیریت داده‌محور انرژی و پذیرش اجتماعی است.

۹- نتیجه‌گیری

تحلیل وضعیت جهانی و منطقه‌ای انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند نشان می‌دهد که این منابع نقش کلیدی در تحول نظام انرژی و حرکت به سمت توسعه پایدار دارند. رشد قابل توجه ظرفیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند، به ویژه در حوزه‌های خورشیدی و بادی، نشان‌دهنده افزایش توجه جهانی به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی است. کشورهای خلیج فارس، با وجود منابع نفت و گاز فراوان، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و هوشمند را به عنوان یک ضرورت برای تضمین امنیت انرژی و حفظ جایگاه منطقه‌ای و جهانی در بازار انرژی دنبال می‌کنند. این اقدامات نشان می‌دهد که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند تنها یک انتخاب اقتصادی نیست، بلکه یک راهبرد بلندمدت برای دستیابی به پایداری محیط زیستی، مالی و بهره‌وری شبکه است.

در ایران، با وجود ظرفیت بالقوه بسیار بالا برای بهره‌برداری از منابع خورشیدی، بادی، آب و زیست‌توده، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند در تولید برق هنوز محدود است. موانع ساختاری، اقتصادی، فناورانه، نهادی و اجتماعی موجب شده‌اند که توسعه این منابع با چالش‌های جدی مواجه شود. با این حال، برنامه‌ریزی‌های ملی، ارائه مشوق‌های مالی و تمرکز بر توسعه زیرساخت‌ها و فناوری‌های نوین و هوشمندسازی شبکه‌ها و سیستم‌های انرژی می‌تواند روند بهره‌برداری از این منابع را تسریع کند. بهره‌گیری از مدل‌های تحلیلی مانند چرخه گارتنر نیز نشان می‌دهد که مسیر بلوغ فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند پیچیده و غیرخطی است و موفقیت آن‌ها نیازمند هماهنگی بین سرمایه‌گذاری علمی، توسعه فناوری، سیاست‌گذاری و پذیرش اجتماعی است.

مزایای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند فراتر از صرفاً تولید انرژی است. این منابع می‌توانند به کاهش آلودگی هوا، بهبود سلامت عمومی، ایجاد اشتغال سبز، بهینه‌سازی شبکه و مدیریت هوشمند انرژی، تقویت امنیت انرژی ملی و توسعه

فناوری کمک کنند. همچنین، سرمایه‌گذاری بلندمدت در این حوزه، اقتصادی‌تر از انرژی‌های فسیلی است و موجب افزایش پایداری سیستم انرژی در بلندمدت می‌شود. با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی ایران، توسعه انرژی خورشیدی و بادی هوشمند فرصت مناسبی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش سهم انرژی پاک در سبد انرژی کشور فراهم می‌آورد.

به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که تحقق پتانسیل واقعی انرژی‌های تجدیدپذیر هوشمند نیازمند یک رویکرد جامع و هماهنگ است که شامل سرمایه‌گذاری هدفمند، توسعه فناوری و زیرساخت‌ها، ادغام فناوری‌های هوشمند و مدیریت داده‌محور انرژی، حمایت قانونی و نهادی، آموزش و آگاهی عمومی و مدیریت ریسک‌های محیط زیستی می‌شود. حرکت به سوی انرژی پاک و هوشمند، نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک استراتژی اقتصادی و اجتماعی برای تضمین امنیت، استقلال و پایداری انرژی کشور و منطقه است.

مراجع

- [۱] ساعی مقدم، م. ایزی، ر. ناصحی، پ. (۱۳۹۹). تحلیلی بر آینده‌ی انرژی جهان، از تاریکی نفت تا روشنایی انرژی‌های نو مطالعه موردی در زمینه فرصت‌ها و چالش‌های ایران. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۷(۱)، ۸۴-۹۵.
- [۲] سلیمان پور، ک. (۱۴۰۳). بررسی استراتژی ذخیره انرژی تجدیدپذیر و توسعه زیر ساخت، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت، بهینه‌سازی و توسعه زیرساخت‌های انرژی، تهران.
- [3] Steinert, M., & Leifer, L. (2010, July). Scrutinizing Gartner's hype cycle approach. In Picmet 2010 technology management for global economic growth (pp. 1-13). IEEE.
- [۴] کاویانی، ک. عظیم‌زاده آرانی، م. افضلی، ع. طهماسبی بلوک‌آباد، ر. صارمی، م. (۱۴۰۴). بررسی آینده انرژی کشور فرانسه در افق ۲۰۵۰ با تمرکز بر تحلیل روندهای جهانی تأمین انرژی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴(۴)، ۴۶۳-۴۸۶.
- [5] Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. Sustainability, 13(13), 7328.
- [۶] کشکر، س. (۱۴۰۲). شناسایی و تحلیل موانع و فرصت‌های بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در استادیوم‌های فوتبال ایران. مدیریت و توسعه ورزش، ۱۲(۲)، ۱-۲۷.
- [7] Yolcan, O. O. (2023). World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation. Innovation and Green Development, 2(4), 100070.
- [۸] قائد، ا. دهقانی، ع. فتاحی، م. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی ایران. پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی، ۹(۳۵)، ۱۳۷-۱۴۸.
- [۹] اسمعیلی اردکانی، ع. شکری، م. (۱۴۰۱). اقتصاد سیاسی انرژی‌های تجدیدپذیر و سناریوهای آینده ایران در چشم‌انداز گذار انرژی ۲۰۵۰. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۲(۴۵)، ۱۱-۳۹.
- [10] Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. Energy, 137, 556-565.
- [11] Borges, A. K. M., Adams, V. M., Alves, R. R. N., & Oliveira, T. P. R. (2025). Integrating local ecological knowledge into systematic conservation planning for seahorse conservation. Conservation Biology, 39(3), e70027.
- [۱۲] ذیاب سالم، ا. قبادی، س. محمد حسین، ع. دائی کریم زاده، س. (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر سرمایه‌گذاری زیر ساخت منابع تجدیدپذیر، سرمایه انسانی و پایداری محیط زیست بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای نفت خیز حوزه خلیج فارس. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵(۵۸)، ۵۰۴-۵۲۱.
- [۱۳] جعفری، م. شایگان مهر، س. (۱۴۰۰). نابرابری درآمدی و نفرین نفت: مطالعه کشورهای غنی از انرژی نفت. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۷(۷۱)، ۶۷-۱۱۲.
- [14] Abdolahinia, H., Heidarizadeh, M., & Rahmati, I. (2024). Assessing Iran and its neighbors for prospects and challenges: The case of the electrical sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 193, 114190.
- [۱۵] کیان، ع. حسینی، پ. (۱۴۰۱). مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر و رابطه آن با رشد اقتصادی بوسیله مدل هوشمند anfis، نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق، الکترونیک و شبکه‌های هوشمند.
- [۱۶] روح الامینی، م. (۱۳۹۷). انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران وضعیت فعلی و آینده. ماهنامه جامعه شناسی سیاسی ایران، ۱(۴)، ۵۴۶-۵۵۶.
- [17] World Meteorological Organization, International Renewable Energy Agency, & Copernicus Climate Change Service. (2025, March 4). Report: How climate insights drive a more reliable renewable energy transition. World Meteorological Organization. https://wmo.int/news/media-centre/report-how-climate-insights-drive-more-reliable-renewable-energy-transition?utm_source=chatgpt.com

- [18] Kiasari, M., Ghaffari, M., & Aly, H. H. (2024). A comprehensive review of the current status of smart grid technologies for renewable energies integration and future trends: The role of machine learning and energy storage systems. *Energies*, 17(16), 4128.
- [۱۹] محمدنژاد فیروزجایی، ر.، علیزاده ثانی، م.، محسنی کیاسری، م.، سعدآبادی ارانی، ع. (۱۴۰۴). گونه شناسی نوآوری اجتماعی در انرژی تجدیدپذیر ایران. سیاست علم و فناوری، ۱۸ (۱)، ۵۱-۶۸.
- [۲۰] سمیعی نسب، م. (۱۴۰۳). راهبردهای تأمین مالی انرژی‌های تجدیدپذیر کشور در راستای قانون رفع موانع تولید. ماهنامه علمی «امنیت اقتصادی»، ۱۲ (۱)، ۴-۱۴.
- [۲۱] سواری، م.، رزم آور، ف. (۱۴۰۱). شناسایی عوامل بازدارنده پذیرش فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق روستایی شهرستان دشتستان: کاربرد نظریه بنیانی. توسعه محلی (روستائی-شهری)، ۱۴ (۲)، ۴۴۴-۴۶۵.
- [22] Obuseh, E., Eyenubo, J., Alele, J., Okpare, A., & Oghogho, I. (2025). A systematic review of barriers to renewable energy integration and adoption. *Journal of Asian Energy Studies*, 9, 26-45.
- [23] Oryani, B., Koo, Y., Rezania, S., & Shafiee, A. (2021). Barriers to renewable energy technologies penetration: Perspective in Iran. *Renewable Energy*, 174, 971-983.
- [24] Ugwu, M. C., & Adewusi, A. O. (2024). Navigating legal and policy challenges in the energy transition: case studies from the United States and Nigeria. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(4), 506-517.
- [25] Nassar, I. A., Hossam, K., & Abdella, M. M. (2019). Economic and environmental benefits of increasing the renewable energy sources in the power system. *Energy Reports*, 5, 1082-1088.
- [26] Algarni, S., Tirth, V., Alqahtani, T., Alshehry, S., & Kshirsagar, P. (2023). Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development. *Sustainable energy technologies and assessments*, 56, 103098.
- [27] Muqeet, H. A., Liaqat, R., Jamil, M., & Khan, A. A. (2023). A state-of-the-art review of smart energy systems and their management in a smart grid environment. *Energies*, 16(1), 472.
- [۲۸] تورانی، ب.، مرادی، م. (۱۳۹۹). بررسی چالش‌های توسعه اقتصادی و اصلاحات قانونی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر. جامعه‌شناسی سیاسی ایران، ۹ (۱۶)، ۲۵۴۱-۲۵۵۶.
- [29] Ma, B., & Wang, A. (2025). Exploring the role of renewable energy in green job creation and sustainable economic development: An empirical approach. *Energy Strategy Reviews*, 58, 101642.
- [30] Doan, B., Vo, D. H., & Pham, H. (2023). The net economic benefits of power plants: International evidence. *Energy Policy*, 175, 113478.
- [31] Alamdari, P., Nematollahi, O., & Alemrajabi, A. A. (2013). Solar energy potentials in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 778-788.
- [32] Gartner, W. B., & Shane, S. A. (1995). Measuring entrepreneurship over time. *Journal of business Venturing*, 10(4), 283-301.
- [33] Dedehayir, O., & Steinert, M. (2016). The hype cycle model: A review and future directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 108, 28-41.
- [34] Columbres, M. R. C., & Victoriano, J. M. (2024). Cloud Sustainability: An Analysis and Assessment of the Plateau Prediction of 2023 Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, 19(8).
- [35] Van Lente, H., Spitters, C., & Peine, A. (2013). Comparing technological hype cycles: Towards a theory. *Technological forecasting and social change*, 80(8), 1615-1628.
- [36] Kriechbaum, M., Posch, A., & Hauswiesner, A. (2021). Hype cycles during socio-technical transitions: The dynamics of collective expectations about renewable energy in Germany. *Research Policy*, 50(9), 104262.
- [37] International Energy Agency. (2025). *Renewables 2025: Renewable electricity* (Licence: CC BY 4.0). International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-electricity>



**National Conference on Civil Engineering, Design and Construction
Technologies, Energy, Materials and Advanced Machinery**

**Ministry of Science, Research and Technology
East Azarbaijan Science and Technology Park**



- [38] Twidale, S. (2024, May 8). *Renewables provided record 30% of global electricity in 2023, Ember says*. Reuters. https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/renewables-provided-record-30-global-electricity-2023-ember-says-2024-05-07/?utm_source=chatgpt.com
- [39] Magadum, T., Murgod, S., Garg, K., Yadav, V., Mittal, H., & Kushwaha, O. (2025). Renewable energy transition in South America: Predictive analysis of generation capacity by 2050. arXiv preprint arXiv:2503.17771.

An Evidence-Based Assessment of the Maturity of Renewable Energy Technologies and Future Scenarios

Mohammad Amin Adhami ^{1*}, Masoud Barati ²

1. Department of Management, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
2. Department of Management, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Abstract

The transformation of energy systems in recent decades reflects a significant increase in the role of renewable energy in addressing environmental, economic, and energy security challenges. The expansion of renewable energy capacity—particularly solar and wind power—indicates a gradual shift in energy supply patterns from fossil fuels toward clean and sustainable sources. An examination of global and regional trends shows that, although the development of renewable energy has accelerated in many countries, the extent of effective deployment is strongly influenced by technological, institutional, economic, and social factors. In Iran, despite substantial potential, the share of renewable energy in the electricity generation mix remains limited, primarily due to structural, economic, and policy-related constraints. The findings of this study suggest that achieving a sustainable energy future requires a comprehensive approach encompassing targeted investment, infrastructure development, technological advancement, and enhanced social acceptance. The transition toward renewable energy not only contributes to reducing pollutant emissions and improving public health but also plays a critical role in strengthening energy security and promoting sustainable development.

Keywords:

Renewable energy, energy future, sustainable development, energy security, energy transition.