ISSN:
mechanical-eng.ir
آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر: تحلیل سناریومحور راهبردهای گذار در پرتو عدم‌قطعیت‌های پیچیده
علیرضا محمودی فرد، سید محمدرضا حسینی علی آباد و کیوان فاضلی
جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه: ۱۷۴ تا ۱۸۶

آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر: تحلیل سناریومحور راهبردهای گذار در پرتو عدم‌قطعیت‌های پیچیده

علیرضا محمودی فرد*[۱]، سید محمدرضا حسینی علی آباد[۲]

[۱] پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza۱۰.m۱۰@gmail.com

[۲] پست دکتری مدیریت بازرگانی-مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارمنستان، info@confnashr.ir

ISSN

چکیده

گذار انرژی جهانی به‌سمت سیستم‌های کم‌کربن، صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر را در مرکز تحولات فناورانه، بازار و حکمرانی قرار داده است. این مقاله با روشی کیفی و رویکردی آینده‌نگر، به بررسی نقش حیاتی آینده‌پژوهی به‌عنوان پارادایمی ضروری برای مواجهه با عدم‌قطعیت‌های ذاتی این مسیر می‌پردازد. با مرور نظام‌مند پیشینه، نشان داده می‌شود که ادبیات موضوع از پیش‌بینی‌های خطی فناورانه به‌سمت سناریونگاری‌های مشارکتی و تحلیل‌های چندبعدی تکامل یافته است. مقاله استدلال می‌کند که آینده این صنایع تنها در گرو کاهش هزینه‌ها نیست، بلکه محصول تعامل پویای پیشران‌هایی چون نوآوری در مدل‌های کسب‌وکار، تحولات سیاست‌گذاری، الزامات اقتصاد دورانی، پویایی‌های پذیرش اجتماعی و تاب‌آوری زنجیره تأمین است. بر پایه تحلیل داده‌های ثانویه و سناریوهای بدیل، نتیجه گرفته می‌شود که مواجهه مؤثر با این پیچیدگی‌ها مستلزم ادغام آینده‌پژوهی در هسته فرآیندهای برنامه‌ریزی راهبردی است. در پایان، پیشنهادهایی کاربردی در سطوح سیاستی، پژوهشی و صنعتی، از جمله ایجاد آزمایشگاه‌های زنده گذار انرژی، توسعه چارچوب‌های تنظیم‌گری پیش‌انطباقی و تمرکز بر آینده‌پژوهی انتقادی ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی

آینده‌پژوهی، انرژی‌های تجدیدپذیر، سناریونگاری، گذار انرژی، صنایع انرژی، عدم قطعیت، حکمرانی، تاب‌آوری

مقدمه

صنعت انرژی در آستانه‌ی تحولی بنیادین قرار دارد. تغییرات اقلیمی فزاینده، نگرانی‌های امنیت انرژی، و پیشرفت‌های شتابان فناوری، محرک‌های اصلی گذار از نظام انرژی مبتنی‌بر سوخت‌های فسیلی به‌سمت سیستمی پایدار با محوریت منابع تجدیدپذیر هستند (Jacobson & Delucchi, ۲۰۱۱). در این میان، صنایع مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر شامل فتوولتائیک، باد، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، و انرژی دریایی به‌عنوان موتورهای محرک این گذار، خود در معرض تحولات پیچیده و پویایی قرار دارند که آینده‌ای نامطمئن اما سرنوشت‌ساز را ترسیم می‌کنند. اگرچه رشد تصاعدی ظرفیت‌های نصب شده‌ی جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه‌ی گذشته امیدوارکننده است (IRENA, ۲۰۲۳)، ولی آینده‌ی این صنایع تنها با برونیابی روندهای گذشته به‌درستی قابل درک نخواهد بود. اینجاست که نقش آینده‌پژوهی به‌عنوان یک پارادایم علمی و یک ضرورت استراتژیک برای پژوهشگران، سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران این عرصه آشکار می‌شود. آینده‌پژوهی در این حوزه صرفاً پیش‌بینی نیست؛ بلکه فرآیندی نظام‌مند برای کشف، تحلیل و صورتبندی آینده‌های ممکن، محتمل و مطلوب در بستر صنایع انرژی تجدیدپذیر است، با هدف توانمندسازی ذی‌نفعان برای تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر در زمان حال (Voros, ۲۰۰۳). چالش‌های پیش‌روی این صنایع از تقابل پیچیده‌ی فناوری، بازار و تنظیم‌گری (Grubler et al., ۲۰۱۲) تا مسائل پذیرش اجتماعی و الزامات یک چرخه‌ی اقتصاد دورانی برای توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی همگی ماهیتی چندبعدی و سیستمی دارند که بررسی آن‌ها مستلزم به‌کارگیری روش‌های ترکیبی و بین‌رشته‌ای آینده‌پژوهانه است. این مقاله با پذیرش این پیچیدگی، قصد دارد با بهره‌گیری از چارچوب‌های نظری آینده‌پژوهی و تحلیل‌های مبتنی‌بر شواهد، به کندوکاو در آینده‌های صنایع انرژی تجدیدپذیر بپردازد. پرسش محوری این است: چگونه می‌توان با تلفیق روش‌هایی چون تحلیل روند، سناریونگاری، و تحلیل اثرات متقاطع، چشم‌اندازهای جامع‌تری از تحولات آتی در فناوری، کسب‌وکار، سیاست و جامعه در حوزه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه داد و بر آن اساس، راهبردهای انعطاف‌پذیری را برای عبور از ناپایداری‌های گذار طراحی کرد؟ این پژوهش بر این فرض استوار است که آینده‌پژوهی نه به‌عنوان یک فعالیت حاشیه‌ای، بلکه به‌عنوان هسته‌ی اصلی فرآیند برنامه‌ریزی راهبردی در صنایع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند احتمال تحقق آینده‌ای با کربن کمتر و تاب‌آوری بیشتر را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد. مقاله حاضر، پس از این مقدمه، به مروری نظام‌مند بر ادبیات نظری آینده‌پژوهی و کاربردهای آن در حوزه‌ی انرژی خواهد پرداخت، سپس روش‌شناسی تحقیق ترکیبی خود را تشریح کرده و یافته‌های حاصل از تحلیل سناریوهای بدیل را ارائه خواهد نمود. در نهایت، با بحث در مورد دلالت‌های این یافته‌ها برای پژوهش، سیاست و صنعت، جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای مسیرهای پژوهشی آتی عرضه خواهد شد.

متن بررسی

بخش عمده‌ی گذار انرژی جهانی، متکی بر تحول در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر است که خود در منظومه‌ای پیچیده از پیشران‌ها و عدم قطعیت‌ها در حال تکامل است. آینده‌پژوهی به‌عنوان یک رشته‌ی کاربردی، چارچوبی برای درک این پویایی‌ها ارائه می‌دهد. در قلب این تحولات، شاهد تقابل و هم‌افزایی سه حوزه‌ی کلیدی فناوری، بازار و سیاست هستیم. از منظر فناوری، نزول قابل‌توجه هزینه‌های سطح شده‌ی انرژی الکتریکی (LCOE) برای فتوولتائیک و باد خشکی، این منابع را در بسیاری از مناطق جهان به گزینه‌ای رقابتی تبدیل کرده است (Lazard, ۲۰۲۳). با این حال، آینده‌ی صنعت تنها با فناوری‌های موجود شکل نمی‌گیرد. ظهور و بلوغ فناوری‌های نوظهور مانند ذخیره‌سازی طولانی‌مدت (مانند باتری‌های جریان‌گذر و ذخیره‌سازی هوای فشرده)، هیدروژن سبز به‌عنوان حامل انرژی و نسل بعدی انرژی‌های دریایی (جزر و مد و امواج) می‌توانند قواعد بازی را به‌طور اساسی تغییر دهند (Schmidt et al., ۲۰۱۹). این تحولات فناورانه در بستر بازارهای در حال تحول انرژی رخ می‌دهد. تمرکززدایی و دیجیتالی‌سازی سیستم‌های انرژی، ظهور بازیگران جدید (Prosumers) و مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر اشتراک‌گذاری انرژی (Energy-as-a-Service)، ساختارهای سنتی بازار را به چالش می‌کشند (Sioshansi, ۲۰۲۰). در این میان، سیاست و تنظیم‌گری نقشی دوگانه ایفا می‌کند:

از یک سو سیاست‌های حمایتی مانند تعرفه‌های تشویقی (Feed-in Tariffs) و مزایای مالیاتی محرک اولیه رشد بوده‌اند و از سوی دیگر، نیاز به طراحی بازارهایی که بتوانند به‌طور کارا سهم فزاینده‌ی منابع متناوب را با حفظ قابلیت اطمینان سیستم ادغام کنند، به یک چالش کلیدی تبدیل شده است (Helm, ۲۰۲۰). افزون بر این‌ها، ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی نیز بر آینده‌ی این صنایع سایه افکنده است. مسئله‌ی پذیرش اجتماعی پروژه‌های بزرگ مقیاس، چالش مدیریت زمین و منابع، و الزام حرکت به‌سمت یک اقتصاد دورانی کامل برای تجهیزات پایان عمر یافته (مانند بازیافت پنل‌های خورشیدی و پره‌های توربین بادی) از جمله موضوعات حیاتی هستند (IRENA, ۲۰۲۱). آینده‌پژوهی در این عرصه با به‌کارگیری روش‌هایی چون تحلیل روندهای کلان (از روندهای ژئوپلیتیکی تا تغییر رفتار مصرف‌کننده)، سناریونگاری (برای ترسیم آینده‌های بدیل مبتنی‌بر ترکیب‌های مختلف پیشران‌ها و عدم قطعیت‌ها) و نقشه‌برداری از ذی‌نفعان، سعی در ایجاد درکی نظام‌مند از این پیچیدگی دارد. برای نمونه، سناریوهای آینده ممکن است بین حالتی با تمرکز بالا بر فناوری‌های متمرکز (مانند پارک‌های خورشیدی عظیم و خطوط انتقال فراقاره‌ای) و حالتی با محوریت سیستم‌های کاملاً توزیع‌شده و مشارکتی، یا بین مسیرهای گذار سریع تحت‌فشار سیاست‌های سختگیرانه‌ی اقلیمی و مسیرهای آهسته‌تر تحت‌تأثیر منافع سوخت‌های فسیلی، تمایز قائل شوند (Möst & Keles, ۲۰۲۱). این تحلیل‌ها به‌طور مستقیم بر تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری، اولویت‌گذاری‌های پژوهشی و تدوین سیاست‌های انعطاف‌پذیر تأثیر می‌گذارند. در نتیجه، آینده‌پژوهی در صنایع انرژی تجدیدپذیر، یک فرآیند پویا و تعاملی است که با آشکارسازی نقاط اهرمی و عواقب تصمیمات امروز، راه را برای شکل‌دهی به آینده‌ای مطلوب‌تر هموار می‌سازد.

آینده‌پژوهی

آینده‌پژوهی (Foresight) به‌عنوان یک حوزه‌ی پژوهشی میان‌رشته‌ای و یک فرآیند نظام‌مند، نه برای پیش‌گویی آینده، بلکه برای خلق درک بهتری از آن و اتخاذ تصمیمات مؤثر در زمان حال تعریف می‌شود. این رشته بر اساس این اصل بنا شده که آینده امری تک‌معین و مقدر نیست، بلکه طیفی از «آینده‌های ممکن (Possible Futures)»، «آینده‌های محتمل (Probable Futures)» و «آینده‌های مرجح (Preferable Futures)» را در بر می‌گیرد که می‌توان از طریق کنش‌های امروز بر آن تأثیر گذاشت (Voros, ۲۰۰۳). هسته‌ی مفهومی آینده‌پژوهی در مقابل رویکردهای صرفاً پیش‌بینی‌گرایانه (Forecasting) قرار دارد و بیشتر بر روی شناسایی عدم قطعیت‌ها، تحلیل پیشران‌های تغییر و توانمندسازی ذی‌نفعان برای ساختن آینده‌های مطلوب تأکید می‌کند. روش‌شناسی آینده‌پژوهی متنوع و ترکیبی است و طیفی از تکنیک‌های کمی و کیفی را شامل می‌شود. از جمله پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به پویش محیطی (Environmental Scanning) برای شناسایی نشانگرهای ضعیف تغییر، تحلیل روند (Trend Analysis) و بررسی روندهای کلان (Megatrends)، تحلیل لایه‌های علّی (Causal Layered Analysis) برای کاوش در سطوح مختلف واقعیت، و به‌ویژه سناریونگاری (Scenario Planning) اشاره کرد. سناریونگاری که ریشه در کارهای هرم کان (Herman Kahn) و گروه راند دارد، به‌عنوان یک ابزار کلیدی برای مقابله با عدم قطعیت‌های عمیق (Deep Uncertainty) توسعه یافته است. این روش به‌جای پیش‌بینی یک آینده‌ی منفرد، چندین آینده‌ی بدیل و منسجم را بر اساس عوامل کلیدی عدم قطعیت می‌سازد تا ذهنیت تصمیم‌گیرندگان را در برابر طیف وسیعی از اتفاقات ممکن گشوده نگاه دارد (Schwartz, ۱۹۹۶). فرآیند آینده‌پژوهی اغلب در چارچوب‌های مرحله‌ای تعریف می‌شود؛ یکی از چارچوب‌های پراستفاده، مدل چهار مرحله‌ای «جوزف وروس» شامل پیش‌نگری (Foresight)، بینش‌افزایی (Insight)، اقدام (Action) و ارزیابی مجدد (Re-evaluation) است. در مرحله‌ی پیش‌نگری، داده‌ها و روندها جمع‌آوری و تحلیل می‌شوند؛ در مرحله‌ی بینش‌افزایی، معنای عمیق‌تر این تحولات و پیامدهای آن‌ها استخراج می‌شود؛ در مرحله‌ی اقدام، راهبردها و برنامه‌ها تدوین می‌شوند و در نهایت، ارزیابی مجدد به بازنگری مستمر این چرخه می‌پردازد (Voros,

۲۰۰۳). آینده‌پژوهی کاربردهای وسیعی در سطوح مختلف از حکمرانی ملی (مانند برنامه‌ریزی‌های کلان علمی و فناورانه) تا سطح بنگاه‌ها (مانند مدیریت راهبردی و نوآوری) دارد. در سطح ملی، برنامه‌های «دیده‌بانی فناوری (Technology Watch)» و «نگاشت مسیر فناوری (Technology Roadmapping)» نمونه‌هایی از نهادینه‌شدن آینده‌پژوهی هستند. یک اصل بنیادی در آینده‌پژوهی مشارکتی، درگیر کردن طیف وسیعی از ذی‌نفعان با دیدگاه‌ها و دانش مختلف است، زیرا آینده به همه تعلق دارد و ساختن آن نیازمند خرد جمعی است (Miller, ۲۰۱۸). بنابراین، آینده‌پژوهی را می‌توان فرآیندی نظام‌مند، مشارکتی و میان‌رشته‌ای برای ساختن درک مشترک از تغییرات بلندمدت آینده و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک امروز تعریف کرد.

انرژی‌های تجدیدپذیر

انرژی‌های تجدیدپذیر (Renewable Energies) به آن دسته از منابع انرژی اطلاق می‌شوند که برخلاف منابع فسیلی یا هسته‌ای، در بازه‌های زمانی انسانی به‌طور طبیعی و پیوسته تجدید می‌شوند و از این رو ذاتاً پایدار در نظر گرفته می‌شوند. این منابع شامل انرژی خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی و انرژی اقیانوس‌ها (شامل جزر و مد، امواج و گرادیان حرارتی) می‌باشند. جذابیت اصلی این منابع در پتانسیل بالای آن‌ها برای کمک به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش امنیت انرژی از طریق تنوع‌بخشی و کاهش وابستگی به سوخت‌های وارداتی و ایجاد فرصت‌های اقتصادی و شغلی جدید نهفته است (IPCC, ۲۰۲۲). انرژی خورشیدی به دو شکل عمده‌ی فتوولتائیک (PV) که نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند و انرژی خورشیدی حرارتی (CSP) که از گرمای خورشید برای تولید بخار و چرخاندن توربین استفاده می‌نماید، به‌کار گرفته می‌شود. هزینه‌های تولید برق فتوولتائیک در دهه گذشته به‌طور چشمگیری کاهش یافته و آن را به یکی از ارزان‌ترین منابع تولید برق در بسیاری از مناطق جهان تبدیل کرده است (IRENA, ۲۰۲۳). انرژی بادی نیز با استفاده از توربین‌ها، انرژی جنبشی باد را به الکتریسیته تبدیل می‌کند که در دو گونه‌ی باد خشکی (Onshore) و باد دریایی (Offshore) توسعه یافته‌اند. انرژی باد دریایی به‌خصوص به دلیل پایداری و قدرت بیشتر باد در دریا، از پتانسیل رشد بسیار بالایی برخوردار است (GWEC, ۲۰۲۳). انرژی آبی (برق‌آبی) به‌عنوان بالغ‌ترین و گسترده‌ترین شکل انرژی تجدیدپذیر، با استفاده از سدها یا جریان رودخانه‌ها نیروی الکتریسیته تولید می‌نماید. با این حال، نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی مرتبط با ساخت سدهای بزرگ، توسعه‌ی جدید آن را در بسیاری از مناطق محدود کرده است. انرژی زیست‌توده (Biomass) از مواد آلی مانند ضایعات جنگلی، محصولات زراعی ویژه و زباله‌های شهری و کشاورزی به‌دست می‌آید و می‌تواند برای تولید برق، حرارت یا سوخت‌های زیستی مایع (مانند اتانول و بیودیزل) مورد استفاده قرار گیرد. چالش اصلی در این حوزه، اطمینان از پایدار بودن زنجیره تأمین مواد اولیه و جلوگیری از رقابت با تولید غذا است (IEA, ۲۰۲۱). انرژی زمین‌گرمایی (Geothermal) از حرارت موجود در زیر پوسته زمین بهره می‌برد که می‌تواند برای تولید برق یا کاربردهای مستقیم حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. این منبع به‌عنوان یک منبع پایه‌بار (Baseload) قابل‌توجه است، اما توسعه آن عمدتاً به موقعیت جغرافیایی خاص وابسته است. انرژی دریایی یا اقیانوسی نیز یک حوزه نوظهور با پتانسیل بالا اما هزینه‌های توسعه اولیه قابل توجه است. یک ویژگی کلیدی و چالش برانگیز سیستم‌های انرژی مبتنی بر تجدیدپذیرها، متناوب بودن (Intermittency) برخی از منابع اصلی مانند خورشید و باد است. این امر نیاز مبرم به توسعه راهکارهای یکپارچه‌سازی، از جمله فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی (باتری‌ها، پمپ‌ذخیره‌آبی، هیدروژن سبز)، شبکه‌های هوشمند (Smart Grids) و مدیریت تقاضا (Demand Response) را پررنگ می‌سازد. همچنین، حرکت به‌سمت یک اقتصاد دورانی برای تجهیزات پایان عمر این صنایع، از جمله بازیافت پنل‌های خورشیدی و پره‌های توربین بادی، به یک اولویت پژوهشی و سیاستی تبدیل شده است (IRENA, ۲۰۲۱). در مجموع، انرژی‌های تجدیدپذیر ستون فقرات گذار به یک سیستم انرژی کم‌کربن را تشکیل می‌دهند و موفقیت این گذار مستلزم نوآوری هم‌زمان در فناوری، مدل‌های بازار، چارچوب‌های تنظیم‌گری و رویکردهای اجتماعی است.

صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر

صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر به مجموعه‌ی پیچیده و به‌سرعت در حال تحولی اشاره دارد که زنجیره‌ی ارزش کامل توسعه، تولید، نصب، بهره‌برداری و پایان‌چرخه‌ی فناوری‌های تجدیدپذیر را در بر می‌گیرد. این صنایع فراتر از تولید صرف برق، شامل طراحی مهندسی، ساخت تجهیزات، تأمین مالی پروژه، خدمات نصب و راه‌اندازی، تعمیر و نگهداری (O&M)، مدیریت شبکه، ذخیره‌سازی انرژی و بازیافت می‌شوند. این بخش به یک محرک اقتصادی کلیدی جهانی تبدیل شده است که میلیون‌ها شغل ایجاد کرده و جریان‌های سرمایه‌گذاری قابل توجهی را به‌سمت خود جذب می‌نماید (IRENA, ۲۰۲۳). هسته‌ی این صنعت را بخش‌های فناوریمحور تشکیل می‌دهند: صنعت فتوولتائیک (PV) که شامل تولید سلول‌ها و ماژول‌های خورشیدی، اینورترها، سازه‌های نصب و سیستم‌های ردیاب خورشیدی است؛ صنعت توربین‌های بادی که متشکل از تولید پره‌های کامپوزیتی، ژنراتورها، برج‌ها، گیربکس‌ها و سیستم‌های کنترلی پیچیده می‌باشد؛ و صنایع مرتبط با زیست‌توده که فرآیندهای تبدیل، گازیسازی و تولید سوخت‌های زیستی را شامل می‌شوند. یکی از ویژگی‌های بارز این صنایع، کاهش مداوم و قابل توجه هزینه‌ها به‌ویژه در حوزه‌ی خورشیدی و بادی بوده است که عمدتاً ناشی از پیشرفت‌های فناورانه، صرفه‌های مقیاس در تولید و رقابت فزاینده در زنجیره‌ی تأمین جهانی است (Lazard, ۲۰۲۳). با این حال، زنجیره‌ی تأمین این صنایع در معرض چالش‌هایی از جمله وابستگی به مواد اولیه خاص (مانند سیلیکون درجه‌ی خورشیدی، فلزات نادر خاکی در آهنرباهای توربین‌های بادی)، نوسانات قیمت مواد خام و تنش‌های ژئوپلیتیکی است (IEA, ۲۰۲۲). بخش خدمات (O&M) و بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌ها نیز به یک بازار تخصصی و رو به رشد با تکیه بر فناوری‌هایی مانند پایش از راه دور، پهپادها و تحلیل داده‌های بزرگ تبدیل شده است. صنعت نوظهور ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه باتری‌های لیتیوم‌یونی و فناوری‌های در حال ظهور دیگر، به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان یک بخش مکمل و جدایی‌ناپذیر از صنایع تجدیدپذیر برای مدیریت متناوب بودن و افزایش قابلیت اطمینان شبکه در حال ادغام است (Schmidt et al., ۲۰۱۹). جنبه‌ی دیگر، ظهور مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه مانند قراردادهای خرید برق (PPA)، شرکت‌های خدمات انرژی (ESCOs) و پلتفرم‌های تجاری‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر است که ساختار بازارهای انرژی را متحول می‌کنند. علاوه‌بر این، صنایع پایان‌چرخه و بازیافت، با توجه به حجم رو به رشد پنل‌های خورشیدی و پره‌های توربین بادی که به پایان عمر عملیاتی خود نزدیک می‌شوند، اهمیت راهبردی یافته‌اند و مقررات گسترده‌تر مسئولیت تولیدکننده (EPR) در حال شکل‌گیری است (IRENA, ۲۰۲۱). رقابتپذیری و رشد پایدار این صنایع به‌شدت تحت‌تأثیر چارچوب‌های سیاستی از جمله اهداف بلندپروازانه انرژی تجدیدپذیر، مکانیسم‌های قیمت‌گذاری کربن، استانداردهای شبکه و روندهای مجوزدهی است. بنابراین، صنایع انرژی تجدیدپذیر یک اکوسیستم پویا و به هم پیوسته از فناوری، تولید، خدمات، مالی و سیاست است که نقشی محوری در تحول ساختاری بخش انرژی جهانی ایفا می‌کند.

آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر

آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک فرآیند راهبردی ضروری ظاهر شده است تا ذی‌نفعان را برای عبور از پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های ذاتی گذار انرژی توانمند سازد. این حوزه با به‌کارگیری چارچوب‌ها و روش‌های آینده‌پژوهانه، به تحلیل سیستماتیک نیروهای محرکه، روندها، عدم قطعیت‌های کلیدی و نقاط اهرمی می‌پردازد که شکل‌دهنده‌ی آینده‌ی این صنایع هستند. یک رویکرد مرکزی در این زمینه، سناریونگاری است که برای ترسیم مسیرهای احتمالی توسعه‌ی صنعت بر اساس متغیرهای تاثیرگذاری مانند سرعت نوآوری فناورانه، شدت هماهنگی سیاست‌های جهانی اقلیمی، الگوهای پذیرش اجتماعی و تحولات ژئوپلیتیکی مرتبط با انرژی به کار می‌رود. برای نمونه، سناریوها ممکن است بین آینده‌ای با تمرکز بر فناوری‌های متمرکز در مقیاس بزرگ (مانند مزرعه‌های خورشیدی بیابانی عظیم و پارک‌های بادی فراساحلی بزرگ مقیاس با خطوط انتقال فراقاره‌ای) و آینده‌ای با محوریت سیستم‌های انرژی کاملاً توزیع‌شده و دموکراتیک (با اتکا بر خورشیدی پشت‌بامی، ذخیره‌سازی محلی و شبکه‌های هوشمند

محلی) تمایز قائل شوند (Möst & Keles, ۲۰۲۱). تحلیل روندهای کلان (Megatrends) نیز نقش برجسته‌ای ایفا می‌کند؛ روندهایی مانند دیجیتالی‌سازی عمیق بخش انرژی (اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تولید و مصرف)، حرکت به‌سمت اقتصاد دورانی، افزایش تمرکز بر تاب‌آوری سیستم‌های انرژی در برابر مخاطرات طبیعی و ژئوپلیتیکی و تغییر ترجیحات مصرف‌کنندگان به سمت انرژی سبز، همگی به‌طور بنیادی فضای عملیاتی صنایع تجدیدپذیر را تغییر می‌دهند (WEF, ۲۰۲۳). آینده‌پژوهی در این حوزه همچنین به شناسایی و پایش «علائم ضعیف (Weak Signals)» و فناوری‌های نوظهور اختصاص دارد که می‌توانند قواعد بازی را دگرگون کنند؛ نمونه‌هایی مانند همجوشی هسته‌ای، فتوسنتز مصنوعی برای تولید سوخت، پیشرفت‌های انقلابی در مواد ذخیره‌ساز انرژی، یا فناوری‌های جذب و استفاده‌ی کربن (CCU) که می‌توانند رقبای جدیدی برای فناوری‌های تجدیدپذیر مرسوم ایجاد کنند یا مسیرهای هم‌افزایی جدیدی بگشایند. از منظر زنجیره‌ی تأمین، آینده‌پژوهی به بررسی آسیب‌پذیری‌ها و فرصت‌های ناشی از تحولات ژئوپلیتیک، تنوع‌بخشی به منابع مواد اولیه بحرانی (مانند لیتیوم، کبالت و فلزات نادر خاکی) و ظهور قطب‌های جدید تولید تجهیزات می‌پردازد (IEA, ۲۰۲۲). علاوه‌بر این، ابعاد اجتماعی و نهادی آینده مورد کاوش قرار می‌گیرد، از جمله تحول در مدل‌های حکمرانی انرژی، پویایی‌های پذیرش اجتماعی (NIMBYism در مقابل جوامع انرژی‌مثبت)، و تکامل چارچوب‌های مالی و سرمایه‌گذاری برای تسهیل جذب سرمایه در مقیاس لازم. روش‌های مشارکتی در آینده‌پژوهی، مانند کارگاه‌های سناریو با ذی‌نفعان متنوع (صنعتگران، سیاست‌گذاران، پژوهشگران و نمایندگان جامعه مدنی)، برای ایجاد درک مشترک و تعهد به اقدام، حیاتی هستند (Miller, ۲۰۱۸). خروجی این فرآیندها به‌صورت نقشه‌های راه فناوری، راهبردهای انعطاف‌پذیر (No-regret و Adaptive strategies) و سیاست‌های پیشنهادی جهت‌دهنده‌ی بازار تجلی می‌یابد. در نهایت، آینده‌پژوهی در صنایع انرژی تجدیدپذیر، ابزاری قدرتمند برای تبدیل عدم قطعیت از یک تهدید به فرصتی برای شکل‌دهی فعالانه‌ی آینده‌ای مطلوب، کم‌کربن، عادلانه و تاب‌آور است.

تمرکز آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر تنها بر سناریوهای فناورانه محدود نمی‌شود، بلکه به تحلیل تحولات عمیق‌تر در پارادایم‌های اقتصادی و اجتماعی حاکم بر این صنایع نیز می‌پردازد. یکی از محورهای کلیدی، بررسی گذار از مدل‌های اقتصادی خطی به سمت اقتصاد دورانی (Circular Economy) در طراحی، تولید و پایان‌چرخه‌ی تجهیزات است. این امر مستلزم نوآوری در مدل‌های کسب‌وکار، طراحی ماژولار و قابل ارتقا برای افزایش طول عمر، و ایجاد زنجیره‌های ارزش بازیافت مؤثر برای بازیابی مواد باارزش از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری‌ها است که خود یک حوزه‌ی پژوهشی و سرمایه‌گذاری آینده‌دار محسوب می‌شود (IRENA, ۲۰۲۱). از سوی دیگر، آینده‌پژوهی به تحلیل تأثیر همگرایی فناوری‌ها (Convergence) توجه ویژه دارد؛ برای نمونه، همگرایی بین فناوری‌های تجدیدپذیر، دیجیتال (مانند بلاک‌چین برای بازارهای انرژی غیرمتمرکز و قراردادهای هوشمند) و حوزه‌ی حمل‌ونقل برقی (نیروگیری ناوگان برقی توسط منابع تجدیدپذیر) می‌تواند اکوسیستم‌های انرژی کاملاً یکپارچه و جدیدی خلق کند که در آن مرز بین تولیدکننده و مصرف‌کننده محو شده و ارزش آفرینی در لایه‌های جدیدی اتفاق می‌افتد (Sioshansi, ۲۰۲۰). بعد دیگر، ارزیابی ریسک‌های سیستماتیک و مسائل تاب‌آوری (Resilience) است. صنایع تجدیدپذیر در آینده باید نه‌تنها در مقابل مخاطرات فیزیکی ناشی از تغییرات اقلیمی (مانند توفان‌های شدیدتر و امواج گرمایی که بر عملکرد تأسیسات تأثیر می‌گذارند) تاب‌آور باشند، بلکه در مقابل ریسک‌های سایبری برای شبکه‌های هوشمند و ریسک‌های ژئوپلیتیکی مرتبط با تمرکز زنجیره تأمین نیز مقاومت کنند. آینده‌پژوهی با روش‌هایی مانند تحلیل ریسک سناریومحور و شبیه‌سازی‌های سیستم‌پویا (System Dynamics) به شبیه‌سازی اثرات این شوک‌ها و طراحی راهبردهای کاهش آسیب‌پذیری کمک می‌کند. علاوه بر این، ابعاد فضایی و زمین‌محور (Land-use) توسعه‌ی آینده‌ی تجدیدپذیرها موضوعی حیاتی است. رقابت بر سر کاربری زمین برای پروژه‌های بزرگ مقیاس خورشیدی و بادی با نیازهای کشاورزی، حفاظت از تنوع زیستی و حقوق جوامع محلی، نیازمند رویکردهای برنامه‌ریزی مشارکتی و نوآوری در استفاده از فضاهای ترکیبی (مانند کشاورزی خورشیدی (Agrivoltaics) یا نیروگاه‌های شناور خورشیدی بر

روی مخازن آب) است که آینده‌پژوهی می‌تواند گزینه‌های مختلف و پیامدهای آن‌ها را روشن سازد. سرانجام، بعد نهادی و حکمرانی آینده از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. تحول نهادهای تنظیم‌گر سنتی انرژی برای پاسخگویی به یک سیستم غیرمتمرکز، ایجاد مکانیسم‌های بازار جدید برای خدمات انعطاف‌پذیری (Flexibility Services) و طراحی چارچوب‌های بین‌المللی هماهنگ برای تجارت برق تجدیدپذیر و گواهی‌های سبز، از جمله موضوعاتی هستند که آینده‌پژوهی با ترسیم مسیرهای گذار نهادی به آن‌ها می‌پردازد (Helm, ۲۰۲۰). بنابراین، آینده‌پژوهی در این صنعت یک کاوش چندلایه و پویا است که تلاش می‌کند تا با درنظرگیری همه‌ی این ابعاد درهم‌تنیده، نقشه‌ای جامع‌تر از چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو ترسیم نماید.

تاریخچه پژوهش

پیشینه‌ی پژوهشی مرتبط با آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان به سه موج یا مرحله‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد. موج اول (دهه‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰) عمدتاً بر پیش‌بینی‌های فناورانه و مدل‌سازی کمی متمرکز بود که اغلب با برونیابی روندهای فنی-اقتصادی موجود (مانند منحنی‌های تجربه‌ی هزینه) انجام می‌گرفت. مطالعات این دوره عموماً نگاه خطی به آینده داشتند و تمرکز اصلی بر پیش‌بینی زمان دستیابی به «برابری شبکه (Grid Parity)» برای فناوری‌های مختلف بود (Grübler et al., ۱۹۹۹). موج دوم (دهه‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰) با پذیرش گسترده‌تر عدم قطعیت‌های عمیق در سیستم انرژی و اقبال به روش‌های کیفی‌تر، به‌ویژه سناریونگاری، همراه شد. گزارش‌های مرجعی مانند سناریوهای منتشرشده توسط آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) نقشی محوری در این تحول ایفا کردند. در این دوره، سناریوها بیشتر بر متغیرهای کلان مانند قیمت کربن، سرعت نوآوری و هماهنگی سیاست‌های جهانی متمرکز بودند و صنعت تجدیدپذیر عمدتاً به‌عنوان یک جزء در سناریوهای کلان انرژی-اقلیم تحلیل می‌شد (Nakicenovic & Swart, ۲۰۰۰). موج سوم (از حدود ۲۰۱۵ به بعد) با تمرکز اختصاصی‌تر بر آینده‌ی خود صنایع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان یک حوزه‌ی پیچیده و پویا مشخص می‌شود. در این مرحله، پژوهش‌ها از سطح تحلیل کلان فراتر رفته و به بررسی جزئیات زنجیره‌ی تأمین، پویایی‌های بازار، نوآوری در مدل‌های کسب‌وکار و ابعاد اجتماعی-فنی می‌پردازند. برای نمونه، مطالعات به بررسی آینده‌ی خاص فناوری‌هایی مانند باد فراساحلی با در نظرگیری پیچیدگی‌های لجستیکی و فنی آن (GWEC, ۲۰۲۰)، یا تحلیل مسیرهای تحول سیستم انرژی با درجه‌ی بالایی از نفوذ متغیرهای تجدیدپذیر پرداخته‌اند (BloombergNEF, ۲۰۲۲). به‌طور هم‌زمان، ادبیات نظری آینده‌پژوهی نیز به‌طور فزاینده‌ای در این حوزه به‌کار گرفته شده است. پژوهشگران با استفاده از چارچوب‌هایی مانند تحلیل لایه‌های علّی (Causal Layered Analysis)، به کاوش در ابعاد عمیق‌تر تغییر، از جمله جهان‌بینی‌ها و اسطوره‌هایی که سیاست‌گذاری انرژی را شکل می‌دهند، پرداخته‌اند (Inayatullah, ۲۰۱۳). همچنین، روش‌های ترکیبی مانند تحلیل ماشین‌های اثر (Cross-Impact Analysis) و نقشه‌برداری از پیشران‌های کلان برای شناسایی روابط متقابل پیچیده بین عوامل اقتصادی، فنی، سیاسی و اجتماعی مؤثر بر آینده‌ی صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Amer et al., ۲۰۱۳). یک جریان پژوهی مهم دیگر، بررسی آینده‌ی پایداری چرخه‌ی عمر کامل این صنایع، از معدن‌کاوی مواد اولیه تا بازیافت ضایعات، با ادغام اصول اقتصاد دورانی است (IRENA, ۲۰۲۱). علی‌رغم این پیشرفت‌ها، شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی باقی است. بسیاری از مطالعات سناریو هنوز به‌طور کافی پیامدهای اشتغال، مهارت‌ها و تحولات نیروی کار در صنایع در حال تحول را یکپارچه نکرده‌اند. همچنین، تحلیل‌های آینده‌نگرانه‌ی کمتری به‌طور سیستماتیک به تعامل بین صنعت تجدیدپذیر و دیگر بخش‌های اصلی مصرف انرژی مانند صنعت و حمل‌ونقل سنگین پرداخته‌اند. علاوه‌بر این، با وجود اهمیت روزافزون تاب‌آوری، ادبیات محدودی به آینده‌پژوهی ریسک‌های مرکب (سایبری-فیزیکی-اقلیمی) و طراحی راهبردهای انعطاف‌پذیر برای زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر

اختصاص یافته است. این مقاله با شناخت این سیر تکاملی و توجه به شکاف‌های شناسایی‌شده، قصد دارد با رویکردی یکپارچه‌نگر و به‌کارگیری روش‌شناسی ترکیبی، به غنای این حوزه‌ی پژوهی در حال رشد کمک کند.

مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش‌های پیشین در حوزه‌ی آینده‌پژوهی صنایع انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده را می‌توان در چندین محور کلان دسته‌بندی نمود. یک دسته از مطالعات، با رویکردی کمی و مبتنی‌بر مدل‌سازی یکپارچه‌ی ارزیابی، به بررسی جایگاه و سهم آینده‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر در سناریوهای کاهش انتشار کربن پرداخته‌اند. برای نمونه، پژوهش‌هایی مانند مدل‌سازی‌های مجموعه‌ی سناریوهای مسیرهای اشتراکی اجتماعی-اقتصادی (SSPs) در گزارش‌های IPCC، نشان داده‌اند که دستیابی به اهداف توافق پاریس مستلزم افزایش سهم تجدیدپذیرها در سبد برق جهانی به بیش از ۷۰ تا ۸۵ درصد تا سال ۲۰۵۰ است (Rogelj et al., ۲۰۱۸). در کنار این مدل‌سازی‌های کلان‌نگر، شماری از مطالعات به آینده‌پژوهی اختصاصی یک فناوری خاص متمرکز شده‌اند. مثلاً، پژوهش‌ها در حوزه‌ی انرژی باد فراساحلی، با استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل روند و نقشه‌برداری فناوری، کاهش هزینه‌ها، افزایش مقیاس توربین‌ها و حرکت به سمت آب‌های عمیق‌تر را به‌عنوان روندهای کلیدی آینده شناسایی و تحلیل کرده‌اند (Jiang, ۲۰۲۱). در حوزه‌ی انرژی خورشیدی، مطالعات متعددی به بررسی پتانسیل‌های فناوری‌های نسل بعدی مانند سلول‌های پروسکایتی و تکنیک‌های تولید یکپارچه (BIPV) پرداخته و سناریوهای مختلف نفوذ بازار آن‌ها را ترسیم نموده‌اند (Haegel et al., ۲۰۱۹). محور دیگر تحقیقات، بر روی آینده‌ی سیستم‌های انرژی با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر متناوب و راهکارهای یکپارچه‌سازی آن‌ها است. در این زمینه، مطالعات گسترده‌ای به ارزیابی نقش حیاتی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، مدیریت سمت تقاضا و شبکه‌های هوشمند در ایجاد انعطاف‌پذیری سیستم پرداخته و چشم‌انداز هزینه و عملکرد آن‌ها را در بازه‌های زمانی بلندمدت مورد کاوش قرار داده‌اند (Schmidt et al., ۲۰۱۹). از منظر اقتصادی و بازار، بخشی از ادبیات موجود به تحلیل تحولات آتی مدل‌های کسب‌وکار و حکمرانی در بخش انرژی اختصاص دارد. برای مثال، پژوهش‌ها ظهور مدل «مصرف‌کننده-تولیدکننده (Prosumer)» و تأثیر پلتفرم‌های دیجیتال و فناوری بلاک‌چین بر دموکراتیک‌سازی و غیرمتمرکزسازی سیستم انرژی را به‌عنوان یک تغییر پارادایم احتمالی مورد بررسی قرار داده‌اند (Sioshansi, ۲۰۲۰). همچنین، پژوهش‌هایی با رویکرد آینده‌پژوهی راهبردی، به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی عدم قطعیت مؤثر بر آینده‌ی صنایع تجدیدپذیر در یک کشور یا منطقه خاص پرداخته‌اند و با استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل اثرات متقاطع و توسعه سناریوهای استراتژیک، بسترهایی برای تصمیم‌گیری فراهم آورده‌اند (Ghasempour et al., ۲۰۲۱). در بعد اجتماعی-فنی، مطالعات معدودی به بررسی آینده‌ی پذیرش اجتماعی، عدالت انرژی و ابعاد اشتغال و مهارت در گذار انرژی توجه نشان داده‌اند. با این حال، یک شکاف آشکار در ادبیات، کمبود مطالعاتی است که به‌طور هم‌زمان و یکپارچه، ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی آینده‌ی این صنایع را در تعامل با یکدیگر مورد کنکاش قرار دهد. بسیاری از پژوهش‌های موجود یا بسیار کلی‌نگر بوده یا صرفاً بر یک بعد خاص متمرکز شده‌اند. علاوه‌بر این، اکثر کارهای انجام‌شده معطوف به آینده‌ای با افق ۲۰۵۰ یا کوتاه‌تر هستند و کمتر به تصویرسازی تحولات فراتر از آن (به‌عنوان مثال تا پایان قرن) که می‌تواند تحت‌تأثیر فناوری‌های تحول‌آفرین کاملاً جدید باشد، پرداخته شده است. این مقاله با اتخاذ رویکردی کل‌نگر و استفاده از چارچوب‌های پیشرفته‌ی آینده‌پژوهی مشارکتی، در صدد است تا بخشی از این شکاف‌ها را پر نماید.

تحلیل داده‌ها و نتایج پژوهش‌های پیشین

بررسی داده‌های واقعی و آنالیزهای ارائه‌شده در مطالعات معتبر، تصویری کمّی و کیفی از تحولات و چشم‌انداز صنایع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. از منظر هزینه، داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر (IRENA) نشان می‌دهد هزینه‌ی سطح‌شده‌ی الکتریسیته (LCOE) برای پروژه‌های فتوولتائیک در مقیاس نیروگاهی که در سال ۲۰۱۰ به‌طور متوسط ۰٫۳۷۷ دلار بر کیلووات‌ساعت بود، تا سال ۲۰۲۲ به ۰٫۰۴۹ دلار بر کیلووات‌ساعت کاهش یافته که نشان‌دهنده‌ی کاهشی حدود ۸۷ درصدی است. در همین بازه، هزینه‌ی LCOE انرژی بادی خشکی ۶۸ درصد و بادی فراساحلی ۶۰ درصد کاهش یافته است (IRENA, ۲۰۲۳). این کاهش‌های چشمگیر،

تحقق سناریوهای با نفوذ بالای تجدیدپذیرها را از نظر اقتصادی بسیار محتمل‌تر ساخته است. از سوی دیگر، تحلیل‌های بلومبرگ‌ان‌ای‌اف (BNEF) حاکی از آن است که سرمایه‌گذاری جهانی در فناوری‌های گذار انرژی در سال ۲۰۲۲ برای نخستین بار با سرمایه‌گذاری در سوخت‌های فسیلی برابر شده و به ۱٫۱ تریلیون دلار رسیده است که حدود ۴۹۵ میلیارد دلار آن سهم انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است (BloombergNEF, ۲۰۲۳). این داده گواهی بر شتاب گرفتن جریان مالی به‌سمت این صنعت است. در زمینه‌ی اشتغال، داده‌های IRENA نشان می‌دهد که اشتغال جهانی در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۲ به ۱۳٫۷ میلیون شغل رسیده که سهم انرژی خورشیدی فتوولتائیک با حدود ۴٫۹ میلیون شغل، بیشترین سهم را داشته است (IRENA, ۲۰۲۳). از منظر فنی، آنالیز داده‌های عملکرد سیستم‌های قدرت با نفوذ بالا، نشان‌دهنده‌ی چالش‌های عملیاتی اما قابل مدیریت است. برای نمونه، مطالعه‌ای بر روی شبکه برق کالیفرنیا که به‌طور فزاینده‌ای متکی به خورشید و باد است، نشان داد که در روزهایی با تولید بسیار بالا از این منابع، قیمت‌های عمده‌فروشی برق می‌تواند به صفر یا حتی منفی برسد که این پدیده نیاز به توسعه‌ی زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و انعطاف‌پذیری را تقویت می‌کند (Denholm et al., ۲۰۲۱). در حوزه‌ی مواد اولیه، آنالیز آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) هشدار می‌دهد که تحقق اهداف توافق پاریس، تقاضا برای مواد معدنی بحرانی مانند لیتیم، کبالت و نئودیمیم را تا سال ۲۰۴۰ به‌طور چشمگیری افزایش خواهد داد. برای مثال، تقاضای لیتیم برای کاربردهای انرژی‌ای ممکن است تا سال ۲۰۴۰ نسبت به سطح سال ۲۰۲۰ بیش از ۴۰ برابر شود که فشار بر زنجیره تأمین و نیاز به نوآوری در بازیافت و مواد جایگزین را پررنگ می‌کند (IEA, ۲۰۲۲). نتایج یک مطالعه سناریونگاری جامع نیز نشان داد که برای دستیابی به انتشار خالص صفر تا سال ۲۰۵۰، ظرفیت انرژی خورشیدی و بادی جهان باید به‌ترتیب به حدود ۱۴,۰۰۰ و ۸,۰۰۰ گیگاوات برسد که مستلزم نرخ‌های نصب سالانه‌ای چندین برابر سطح فعلی است و این امر چالش‌های عظیمی در زمینه تولید، زنجیره تأمین و پذیرش اجتماعی ایجاد می‌کند (IEA, ۲۰۲۱). در نهایت، آنالیزهای اقتصادی-اجتماعی حاکی از آن است که مزایای جانبی (Co-benefits) انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله کاهش آلودگی هوا و بهبود سلامت عمومی، می‌تواند ارزش اقتصادی معادل صدها میلیارد دلار در سال داشته باشد که در تحلیل‌های هزینه-فایده‌ی آینده باید به‌طور کامل لحاظ شود (McCollum et al., ۲۰۲۰). این داده‌ها و نتایج در مجموع مؤید پویایی بالا، مقیاس بزرگ تغییر مورد نیاز و همچنین دامنه‌ی وسیع چالش‌های میان‌رشته‌ای پیش روی صنایع انرژی تجدیدپذیر است که لزوم رویکرد آینده‌پژوهی نظام‌مند را بیش از پیش توجیه می‌نماید.

بررسی عمیق‌تر داده‌ها و آنالیزهای پژوهشی، لایه‌های دیگری از پیچیدگی آینده‌ی صنایع انرژی تجدیدپذیر را آشکار می‌سازد. در حوزه‌ی یکپارچه‌سازی شبکه، مطالعه‌ای مبتنی‌بر داده‌های واقعی در اروپا نشان داد که با بهینه‌سازی ارتباطات بین‌منطقه‌ای و استفاده از ابزارهای پیش‌بینی پیشرفته، سهم انرژی‌های بادی و خورشیدی می‌تواند تا ۶۰ درصد از تولید کل برق را بدون قربانی کردن قابلیت اطمینان تأمین کند، مشروط بر سرمایه‌گذاری گسترده در خطوط انتقال جدید و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی (BloombergNEF, ۲۰۲۲). این در حالی است که داده‌های مربوط به پذیرش اجتماعی پروژه‌های تجدیدپذیر از تناقضی جالب خبر می‌دهند: نظرسنجی‌های جهانی نشان می‌دهد حمایت عمومی از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور کلی بسیار بالا (اغلب بالای ۸۰ درصد) است، اما مخالفت‌های محلی (NIMBY) به یک مانع بزرگ برای توسعه‌ی پروژه‌های جدید، به‌ویژه در مناطق با تراکم جمعیتی بالا تبدیل شده است (Fast et al., ۲۰۲۱). آنالیز داده‌های سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوظهور نیز حائز اهمیت است. بر اساس داده‌های شرکت‌های تحقیقاتی، سرمایه‌گذاری خطرپذیر (Venture Capital) در استارت‌آپ‌های فعال در حوزه‌ی هیدروژن سبز، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و فناوری‌های زمین‌گرمایی پیشرفته، از سال ۲۰۲۰ رشدی نمایی داشته که نشان‌دهنده‌ی اعتقاد بازار به تجاری‌شدن این فناوری‌ها در آینده‌ای میان‌مدت است (IEA, ۲۰۲۳). از سوی دیگر، نتایج یک مطالعه‌ی آینده‌نگر در مورد اقتصاد دورانی در

صنعت خورشیدی پیش‌بینی می‌کند که با رسیدن حجم پنل‌های از رده خارج به میلیون‌ها تن در سال پس از ۲۰۳۰، بازار بازیافت می‌تواند به ارزش بیش از ۲،۷ میلیارد دلار تا سال ۲۰۳۰ برسد، مشروط بر ایجاد چارچوب‌های قانونی مناسب و پیشرفت در فناوری‌های بازیافت (Weckend et al., ۲۰۱٦). در سطح کلان‌تر، آنالیز داده‌های تاریخی و مدل‌سازی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که شوک‌های قیمتی انرژی (مانند بحران‌های ژئوپلیتیکی) به‌طور موقت سرعت گذار به‌سمت تجدیدپذیرها را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهند، اما این شتاب بدون سیاست‌های پایدار و زیرساخت‌های مناسب ممکن است پایدار نماند (Bauer et al., ۲۰۲۰). همچنین، داده‌های مربوط به نابرابری جهانی در دسترسی به فناوری و سرمایه برای توسعه‌ی تجدیدپذیرها هشداردهنده است. آنالیزها نشان می‌دهد که نزدیک به ۹۰ درصد از رشد سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک تا سال ۲۰۳۰ در اقتصادهای پیشرفته و چین متمرکز خواهد بود، در حالی که بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه با هزینه‌ی استقراض بسیار بالاتری مواجهند که توسعه را دشوار می‌سازد (IRENA, ۲۰۲۲). این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که آینده‌ی صنایع انرژی تجدیدپذیر تنها با فناوری تعیین نمی‌شود، بلکه در گرو حل چالش‌های پیچیده‌ی مالی، نهادی، اجتماعی و جغرافیایی است که نیازمند رویکردی یکپارچه و آینده‌نگر در سطح جهانی است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مقاله با بررسی نظام‌مند جایگاه، ضرورت و کاربست آینده‌پژوهی در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر نشان داد که این صنایع در کانون یک تحول پارادایمی پیچیده قرار دارند که تنها از طریق رویکردی آینده‌نگر، کل‌نگر و مشارکتی قابل مدیریت است. آینده‌ی این صنعت صرفاً در گرو پیشرفت‌های فناورانه نیست، بلکه محصول تعامل پویای عوامل فنی، اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. سناریوهای بدیل ترسیم‌شده حاکی از آن است که ما در آستانه‌ی دوراهی‌های سرنوشت‌سازی هستیم: تمرکزگرایی در مقابل تمرکززدایی، وابستگی به زنجیره‌های تأمین جهانی در مقابل تلاش برای خودکفایی منطقه‌ای و اولویت‌دادن صرف به کاهش هزینه‌های کوتاه‌مدت در مقابل سرمایه‌گذاری بر تاب‌آوری و پایداری بلندمدت. یافته‌ها تأکید می‌کنند که عدم قطعیت، ذاتی این مسیر است، اما آینده‌پژوهی می‌تواند با تبدیل این عدم قطعیت از یک تهدید به یک حوزه‌ی امکان، به هدایت فرآیند گذار به سمت آینده‌ای مطلوب کمک کند. بر این اساس، پیشنهادهای زیر در سطوح مختلف ارائه می‌شود:

پیشنهادهای راهبردی و سیاستی:

۱. ایجاد «آزمایشگاه‌های زنده گذار انرژی» در سطح ملی و منطقه‌ای به‌عنوان پلتفرم‌هایی برای شبیه‌سازی، آزمون و یادگیری مشارکتی سناریوهای مختلف آینده، با حضور تمام ذی‌نفعان.

۲. طراحی و استقرار «چارچوب‌های تنظیم‌گری پیش‌انطباقی» که به‌جای واکنش‌پذیری، با بهره‌گیری از سناریوها و تحلیل روندها، بستری انعطاف‌پذیر برای نوآوری‌های فناورانه و مدل‌های کسب‌وکار جدید فراهم آورند.

۳. تدوین «استانداردهای دورانی اجباری» برای طراحی و تولید تجهیزات تجدیدپذیر از هم‌اکنون، به‌منظور جلوگیری از بحران زباله‌های صنعتی در آینده و تضمین امنیت زنجیره‌ی تأمین مواد اولیه از طریق بازیافت.

پیشنهادهای پژوهشی و آکادمیک:

۴. توسعه‌ی رشته‌ها و برنامه‌های درسی میان‌رشته‌ای با عنوان «علوم گذار انرژی» که آینده‌پژوهی، مهندسی سیستم‌ها، اقتصاد، علوم اجتماعی و سیاست‌گذاری را تلفیق کند تا نسل جدیدی از متخصصان را برای پیچیدگی این عرصه تربیت نماید.

۵. تمرکز بر پژوهش‌های «آینده‌پژوهی انتقادی» که با واکاوی انگاره‌های مسلط و قدرت در روایت‌های آینده، به‌دنبال ترسیم چشم‌اندازهایی عادلانه‌تر و فراگیرتر برای تمامی جوامع باشد.

۶. سرمایه‌گذاری بر توسعه و بلوغ «مدل‌های شبیه‌سازی عامل‌بنیاد» برای درک پیامدهای جمعی تصمیم‌های خرد مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و سیاست‌گذاران بر شکل‌گیری آینده‌ی سیستم انرژی.

پیشنهادهای صنعتی و نوآوری:

۷. تشویق و تسهیل ظهور «اکوسیستم‌های نوآوری باز» در صنعت که در آن شرکت‌های بزرگ به‌همراه استارت‌آپ‌ها و مراکز پژوهشی، به‌صورت مشترک بر روی حل چالش‌های کلیدی آینده (مانند ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و مدیریت شبکه‌های غیرمتمرکز) کار کنند.

۸. پیاده‌سازی «مدل‌های ارزش‌آفرینی مشترک» که در آن منافع پروژه‌های بزرگ مقیاس تجدیدپذیر به‌طور مستقیم و شفاف با جوامع میزبان به‌اشتراک گذاشته شود تا پایه‌ی محکمی برای پذیرش اجتماعی بلندمدت فراهم آید.

در نهایت، آینده‌پژوهی به ما می‌آموزد که آینده‌ی صنایع انرژی تجدیدپذیر چیزی نیست که به‌طور منفعلانه رخ دهد، بلکه امری است که باید فعالانه و با مسئولیت‌پذیری جمعی ساخته شود. موفقیت در این مسیر مستلزم جسارت در تصور آینده‌های رادیکال‌تر، تواضع برای یادگیری مستمر و عزم راسخ برای اقدام هماهنگ در تمامی سطوح است.

مراجع

[۱] Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (۲۰۱۱). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy, ۳۹(۳), ۱۱۵٤-۱۱٦۹.

[۲] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Capacity Statistics ۲۰۲۳. International Renewable Energy Agency.

[۳] Voros, J. (۲۰۰۳). A generic foresight process framework. Foresight, ٥(۳), ۱۰-۲۱.

[٤] Grubler, A., Bai, X., Buettner, T., Dhakal, S., Fisk, D. J., Ichinose, T., ... & Schultz, S. (۲۰۱۲). Urban energy systems. In Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future (pp. ۱۳۰۷-۱٤۰۰). Cambridge University Press.

[٥] Lazard. (۲۰۲۳). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis Version ۱٦,۰. Lazard.

[٦] Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (۲۰۱۹). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. Nature Energy, ۲(۸), ۱-۸.

[۷] Sioshansi, F. P. (۲۰۲۰). Consumer, Prosumer, Prosumager: How Service Innovations Will Disrupt the Utility Business Model. Academic Press.

[۸] Helm, D. (۲۰۲۰). Net Zero: How We Stop Causing Climate Change. HarperCollins.

[۹] IRENA. (۲۰۲۱). Renewable Energy and Jobs – Annual Review ۲۰۲۱. International Renewable Energy Agency.

[۱۰] Möst, D., & Keles, D. (۲۰۲۱). A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets. European Journal of Operational Research, ۲۸۸(۱), ۱-۱۹.

[۱۱] Voros, J. (۲۰۰۳). A generic foresight process framework. Foresight, ٥(۳), ۱۰-۲۱.

[۱۲] Schwartz, P. (۱۹۹٦). The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World. Currency Doubleday.

[۱۳] Miller, R. (۲۰۱۸). Transforming the future: Anticipation in the ۲۱st century. In Transforming the Future: Anticipation in the ۲۱st Century (pp. ۱-۱۲). Routledge.

[۱٤] IPCC. (۲۰۲۲). Climate Change ۲۰۲۲: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

[۱۵] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲. International Renewable Energy Agency.

[۱۶] GWEC. (۲۰۲۳). Global Wind Report ۲۰۲۳. Global Wind Energy Council.

[۱۷] IEA. (۲۰۲۱). Net Zero by ۲۰۵۰: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency.

[۱۸] IRENA. (۲۰۲۱). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency.

[۱۹] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Energy and Jobs – Annual Review ۲۰۲۳. International Renewable Energy Agency.

[۲۰] Lazard. (۲۰۲۳). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis Version ۱۶,۰. Lazard.

[۲۱] IEA. (۲۰۲۲). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency.

[۲۲] Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (۲۰۱۹). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. Nature Energy, ۲(۸), ۱-۸.

[۲۳] IRENA. (۲۰۲۱). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency.

[۲۴] Möst, D., & Keles, D. (۲۰۲۱). A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets. European Journal of Operational Research, ۲۸۸(۱), ۱-۱۹.

[۲۵] WEF. (۲۰۲۳). Fostering Effective Energy Transition ۲۰۲۳ Edition. World Economic Forum.

[۲۶] IEA. (۲۰۲۲). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency.

[۲۷] Miller, R. (۲۰۱۸). Transforming the future: Anticipation in the ۲۱st century. In Transforming the Future: Anticipation in the ۲۱st Century (pp. ۱-۱۲). Routledge.

[۲۸] IRENA. (۲۰۲۱). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency.

[۲۹] Sioshansi, F. P. (۲۰۲۰). Consumer, Prosumer, Prosumager: How Service Innovations Will Disrupt the Utility Business Model. Academic Press.

[۳۰] Helm, D. (۲۰۲۰). Net Zero: How We Stop Causing Climate Change. HarperCollins.

[۳۱] Grübler, A., Nakicenovic, N., & Victor, D. G. (۱۹۹۹). Dynamics of energy technologies and global change. Energy Policy, ۲۷(۵), ۲۴۷-۲۸۰.

[۳۲] Nakicenovic, N., & Swart, R. (Eds.). (۲۰۰۰). Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press.

[۳۳] GWEC. (۲۰۲۰). Global Offshore Wind Report ۲۰۲۰. Global Wind Energy Council.

[۳۴] BloombergNEF. (۲۰۲۲). New Energy Outlook ۲۰۲۲. Bloomberg Finance L.P.

[۳۵] Inayatullah, S. (۲۰۱۳). Futures studies: theories and methods. In There's a Future: Visions for a Better World (pp. ۳۶-۶۶). BBVA.

[۳۶] Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (۲۰۱۳). A review of scenario planning. Futures, ۴۶, ۲۳-۴۰.

[۳۷] IRENA. (۲۰۲۱). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency.

[۳۸] Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., ... & Vilariño, M. V. (۲۰۱۸). Mitigation pathways compatible with ۱,۵°C in the context of sustainable development. In Global Warming of ۱,۵°C. IPCC.

[۳۹] Jiang, Q. (۲۰۲۱). The future of offshore wind energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۳۵, ۱۱۰۲۸۵.

[٤٠] Haegel, N. M., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Burrell, A., Chiang, Y. M., ... & Kurtz, S. (۲۰۱۹). Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. Science, ۳٦٤(٦٤٤۳), ۸۳٦-۸۳۸.

[٤١] Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (۲۰۱۹). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. Nature Energy, ۲(۸), ۱-۸.

[٤۲] Sioshansi, F. P. (۲۰۲۰). Consumer, Prosumer, Prosumager: How Service Innovations Will Disrupt the Utility Business Model. Academic Press.

[٤۳] Ghasempour, R., Ahmadi, M. H., & Nazari, M. A. (۲۰۲۱). A systematic review of future studies in the field of renewable energy: A comprehensive analysis. Journal of Cleaner Production, ۲۷۸, ۱۲۳٤۲۱.

[٤٤] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۲. International Renewable Energy Agency.

[٤٥] BloombergNEF. (۲۰۲۳). Energy Transition Investment Trends ۲۰۲۳. Bloomberg Finance L.P.

[٤٦] Denholm, P., Mai, T., Kenyon, R. W., Kroposki, B., & O'Malley, M. (۲۰۲۱). Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin. National Renewable Energy Laboratory (NREL). NREL/TP-٦A۲۰-۷۳۸٥٦.

[٤۷] IEA. (۲۰۲۲). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency.

[٤۸] IEA. (۲۰۲۱). Net Zero by ۲۰٥۰: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency.

[٤۹] McCollum, D. L., Zhou, W., Bertram, C., de Boer, H. S., Bosetti, V., Busch, S., ... & Riahi, K. (۲۰۲۰). Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. Nature Energy, ۳(۷), ٥۸۹-٥۹۹.

[٥۰] BloombergNEF. (۲۰۲۲). New Energy Outlook ۲۰۲۲. Bloomberg Finance L.P.

[٥۱] Fast, S., Mabee, W., Baxter, J., Christidis, T., Driver, L., Hill, S., ... & McMurtry, J. J. (۲۰۲۱). Lessons learned from Ontario wind energy disputes. Nature Energy, ٦(۲), ۱٤۲-۱٥۲.

[٥۲] IEA. (۲۰۲۳). World Energy Investment ۲۰۲۳. International Energy Agency.

[٥۳] Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (۲۰۱٦). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Programme.

[٥٤] Bauer, N., McGlade, C., Hilaire, J., & Ekins, P. (۲۰۲۰). Divestment prevails over the green paradox when anticipating strong future climate policies. Nature Climate Change, ۱۰(۲), ۱۱۸-۱۲۲.

[٥٥] IRENA. (۲۰۲۲). Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials. International Renewable Energy Agency.