مرکز مطالعات راهبردی و آموزش وزارت کشور

انرژی باد، فناوری‌ها و آینده آن

گزارش دیدبانی | شماره ۵۰ | اسفند ۱۴۰۱ | گروه مطالعات اقتصاد و فناوری

بسم الله الرحمن الرحیم

مرکز مطالعات راهبردی و آموزش وزارت کشور

جمهوری اسلامی ایران
وزارت کشور

نویسنده: زهرا حیدری دارانی

تهیه شده در: گروه مطالعات اقتصاد و فناوری

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۱

گزارش دیدبانی

انرژی باد، فناوری‌ها و آینده آن

در این گزارش می‌خوانید

۱ انرژی باد یکی از سریع‌ترین، بالغ‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در حال رشد است.

۲ باد خشکی و دریایی با سهمی بیش از یک‌سوم، ۳۵ درصد کل نیاز برق را تولید می‌کنند و تا سال ۲۰۵۰ به منبع اصلی تولید برق تبدیل می‌شوند.

۳ انرژی بادی به کاهش ۲۷ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۵۰ کمک می‌کند.

جمهوری اسلامی ایران
وزارت کشور

فهرست

مقدمه ۱

مسیرهای گذار انرژی و انرژی باد ۳

تکامل و آینده بازارهای باد ۴

تکامل صنعت باد ۴

چشم‌انداز باد خشکی تا سال ۲۰۵۰ ..... ۶

چشم‌انداز باد دریایی تا سال ۲۰۵۰ ..... ۹

مزایای اجتماعی‌اقتصادی و سایر مزایای انرژی بادی درگذار انرژی ۱۲

اشتغال در بخش باد و زنجیره ارزش محلی ۱۲

خلق ارزش در سطح محلی ۱۴

ادغام با سایر فناوری‌های کم کربن؛ سیستم‌های ترکیبی ۱۵

تسریع استقرار برق بادی؛ موانع و راه‌حل‌های موجود ۱۶

تولید الکتریسته از باد ۱۸

افزایش بی‌سابقه تولید انرژی از باد در سال ۲۰۲۱ ..... ۱۹

استقرار فناوری ۲۰

نوآوری ۲۲

سیاست‌گذاری ۲۲

همکاری‌های بین‌المللی ۲۳

راهبردهای بخش خصوصی ۲۴

جمع بندی و تحلیل ۲۴

منابع ۲۷

مقدمه

کربن‌زدایی در بخش انرژی و کاهش انتشار کربن برای جلوگیری از تغییرات اقلیمی توسط بسیاری از نهادهای ناظر و سیاست‌گذار بین‌المللی فعال در زمینه انرژی دنبال می‌شود. این نهادها با ترسیم رهنگاشت‌های متفاوت با چشم‌اندازهای گوناگون و گاهی منطبق با توافق‌نامه اقلیمی پاریس اهداف خود را پی می‌گیرند و نتایج آن را در غالب سندها و گزارش‌هایی منتشر می‌کنند. رهنگاشت‌های منتشرشده در واقع نمایانگر مسیرهایی است که از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر هستند و رهیافت‌هایی را برای استقرار فناوری‌های کم‌کربن و حرکت به سمت آینده انرژی پاک و پایدار بررسی و ارائه می‌کنند. مطالعه حاضر به بررسی بینش‌های دو نهاد بین‌المللی یعنی آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر[۱] و آژانس بین‌المللی انرژی[۲] درباره انرژی بادی، فناوری‌های مرتبط با آن و آینده این صنعت می‌پردازد.

آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر دو مسیر توسعه انرژی را تا سال ۲۰۵۰ به عنوان بخشی از نسخه گزارش جهانی خود در سال ۲۰۱۹ در مسیر گذار انرژی منتشر کرده است. اولین مسیر منطبق بر سیاست‌های فعلی «مورد مرجع[۳]» نامیده شده و دومین مسیر، مسیری پاک‌تر است که تاب‌آوری بیشتری در برابر تغییرات اقلیمی دارد و عمدتا مبتنی بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و اقدامات جاه‌طلبانه‌تر برای بهره‌وری انرژی و در عین حال قابل دستیابی است که «رهنگاشت انرژی تجدیدپذیر[۴]» نام گرفته است.

آژانس بین‌المللی انرژی نیز طبق «سناریوی انتشارات صفر خالص خود تا سال ۲۰۵۰[۵]» که سناریویی هنجاری است، به دنبال مسیری برای دستیابی به انتشار خالص صفر دی‌اکسید کربن تا سال ۲۰۵۰ در بخش انرژی در کل جهان است. سناریوهای هر دو نهاد، ناظر به ایجاد محدودیت برای افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه و نزدیک‌تر به ۱.۵ درجه بالاتر از عصر پیشا صنعت است.

در این گزارش دیدبانی برش‌هایی از سناریوهای فوق درباره انرژی بادی، فناوری‌های مرتبط با آن و آینده این صنعت ارائه شده است. طبق این سناریوها انرژی بادی و خورشیدی پیشروترین بخش از تجدیدپذیرها برای دوران گذار به سمت انتشار صفر خالص خواهند بود. در این میان فناوری‌های مختلف بادی تا سال ۲۰۵۰ به منبع اصلی تولید تبدیل می‌شوند. چرا که تجزیه‌وتحلیل سناریوهای مختلف انرژی نشان می‌دهد که اجماع فزاینده‌ای در مورد نقش مهمی که نیروی باد در ترکیب انرژی در دهه‌های آینده ایفا می‌کند، وجود دارد.

---

[۱] International renewable energy agency (IRENA)
[۲] International energy agency (IEA)
[۳] Reference Case
[۴] REmap Case
[۵] Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)

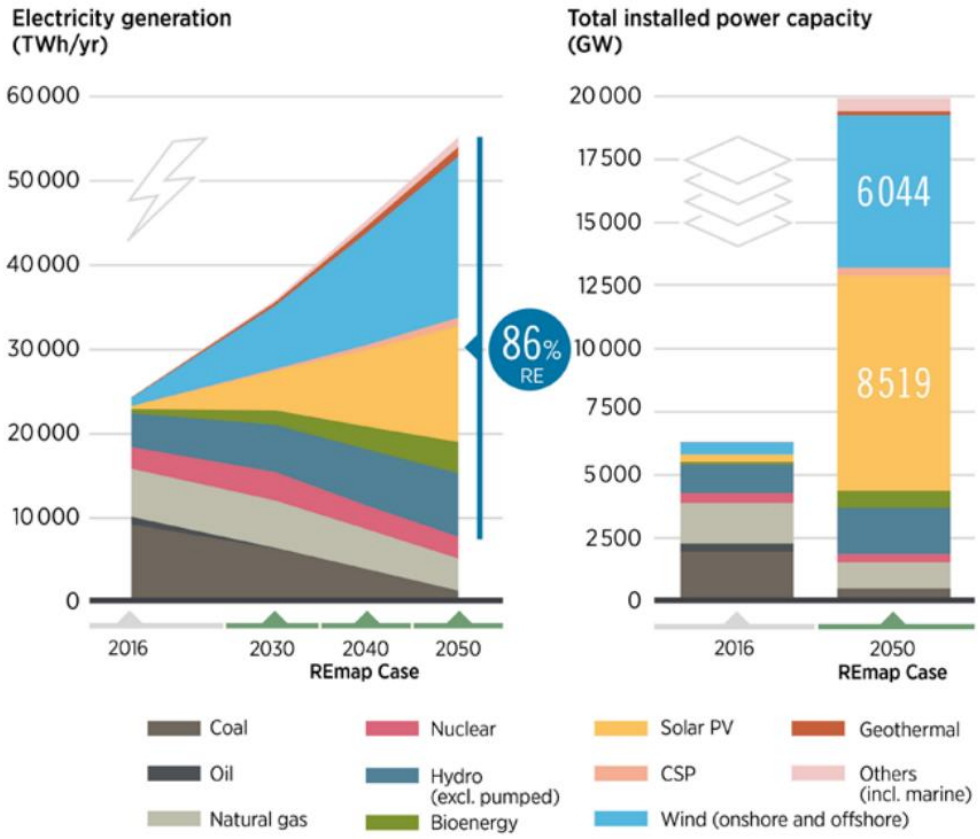
این مطالعه دیدبانی را می‌توان شامل دو بخش در نظر گرفت. اولی گزارشی از بینش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر و شامل عناوین مسیرهای گذار انرژی و انرژی باد، تکامل و آینده بازارهای باد، مزایای اجتماعی‌اقتصادی و سایر مزایای انرژی بادی درگذار انرژی و تسریع استقرار برق بادی، موانع و راه‌حل‌های موجود است. دومین بخش شامل گزارشی از دیدگاه و پیش‌بینی‌های آژانس بین‌المللی انرژی درباره صنعت انرژی بادی شامل عناوین تولید الکتریسته از باد، استقرار فناوری، نوآوری، سیاست‌گذاری، همکاری‌های بین‌المللی، راهبردهای بخش خصوصی و توصیه‌هایی برای سیاست‌گذاران است.

مسیرهای گذار انرژی و انرژی باد

تغییرات اقلیمی به یکی از دغدغه‌های اصلی قرن حاضر تبدیل شده است. توافقنامه پاریس ناظر به تلاش‌هایی برای محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر ۲ درجه سانتیگراد و در حالت ایده آل برای محدود کردن گرمایش به ۱.۵ درجه سانتیگراد در قرن حاضر در مقایسه با سطوح قبل از عصر صنعتی است. برای تحقق اهداف اقلیمی توافق پاریس، تحول عمیق در چشم‌انداز انرژی جهانی ضروری است. چنین تحولی با استقرار سریع فناوری‌های کم‌کربن که جایگزین تولید و مصرف سوخت‌های فسیلی متعارف می‌شود امکان‌پذیر است.

بنابراین با توجه به افزایش تقاضای جهانی انرژی از جمله برق، افزایش مقیاس برق از انرژی‌های تجدیدپذیر برای کربن‌زدایی سیستم انرژی جهان بسیار مهم است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی بادی و خورشیدی مسیر گذار انرژی در بخش برق را در سطح جهانی هدایت خواهند کرد.

انرژی بادی بیش از یک سوم کل تقاضای برق را تا سال ۲۰۵۰ تامین خواهد کرد (شکل ۱) و به خوبی با سناریوهای گذار انرژی موسسات مختلف مطابقت دارد و به وضوح اهمیت افزایش سهم تولید برق بادی را به منظور کربن‌زدایی سیستم انرژی در سه دوره بعدی نشان می‌دهد. این امر نشان دهنده افزایش ۹ برابری سهم انرژی بادی در کل تولید تا سال ۲۰۵۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۶ است. با این حال، در زمینه کل ظرفیت نصب شده تا سال ۲۰۵۰، به افزایش ظرفیت بسیار بیشتری برای فوتوولتائیک خورشیدی (۸۵۱۹ گیگاوات) در مقایسه با باد (۶۰۴۴ گیگاوات) نیاز است.



شکل ۱. باد بزرگترین منبع تولید خواهد بود که تا سال ۲۰۵۰ بیش از یک سوم کل نیازهای تولید برق را تامین می‌کند.

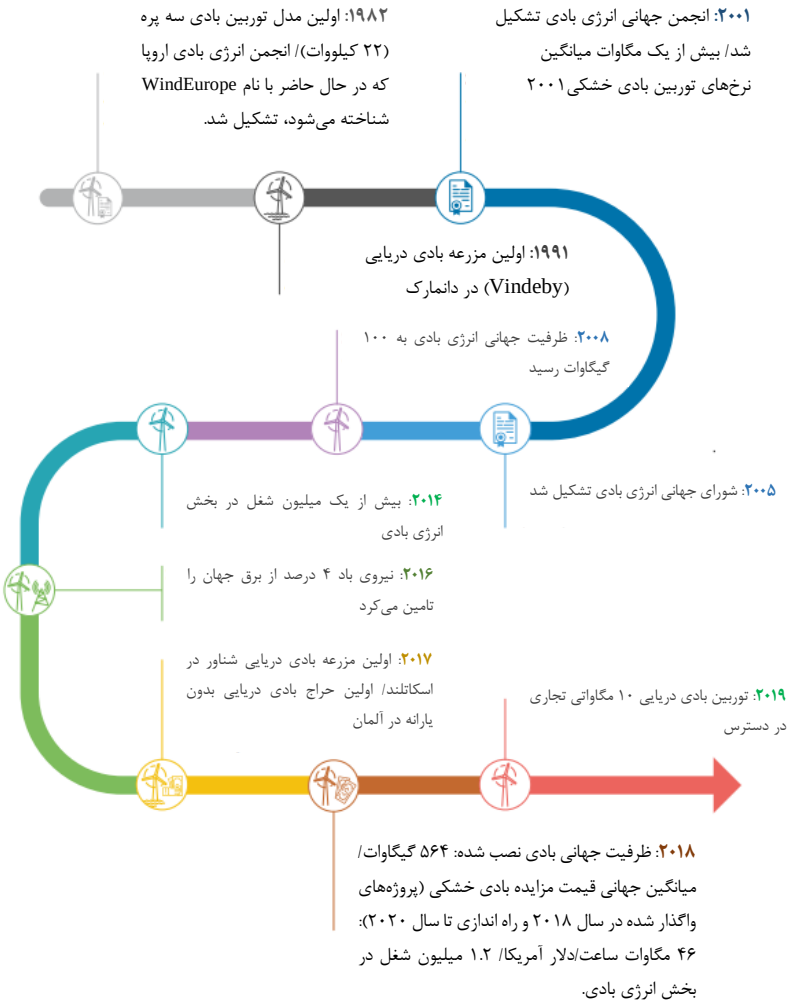
تکامل و آینده بازارهای باد

تکامل صنعت باد

نگرانی‌های فزاینده در مورد تغییرات اقلیمی، اثرات آلودگی هوا بر سلامتی، امنیت انرژی و دسترسی به انرژی همراه با بی‌ثباتی قیمت نفت در دهه‌های اخیر، به پیدایش نیاز به تولید و استفاده از گزینه‌های جایگزین فناوری کم‌کربن مانند انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شده است. انرژی باد در دهه‌های اخیر یک فناوری تجدیدپذیر پیشگام بوده است. از نظر مجموع ظرفیت نصب شده، نیروی باد با بیش از نیم تراوات نصب شده در سراسر جهان تا پایان سال ۲۰۱۸، پس از نیروگاه برق‌آبی، پیشروترین فناوری انرژی تجدیدپذیر است. همراه با انرژی خورشیدی، باد نیز بر کل ظرفیت‌های تجدیدپذیر افزوده است، با حدود ۴۳ گیگاوات ظرفیت بادی در جهان در سال ۲۰۱۸.

تکامل صنعت باد چشمگیر بوده است و در چهار دهه اخیر چندین نقطه عطف در تأسیسات، پیشرفت‌های فناورانه و کاهش هزینه‌ها همراه با ایجاد انجمن‌های کلیدی انرژی بادی به دست آمده است (شکل ۲).

انرژی بادی در دهه‌های آینده گزینه‌ای کلیدی برای تولید انرژی تجدیدپذیر باقی خواهد ماند. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۹ نقش برجسته انرژی باد در تغییر چشم انداز انرژی جهانی تا سال ۲۰۵۰ را روشن می‌کند.



شکل ۲. مروری بر نقاط عطف کلیدی صنعت باد از سال ۱۹۸۲.

استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۱۰ شتاب گرفته است و به سطوحی بی‌سابقه رسیده و در بسیاری از مناطق از ظرفیت‌های برق متعارف سالانه پیشی گرفته است. در میان تمام فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی، پس از نیروگاه برق‌آبی، برای چندین دهه بر صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر تسلط داشته است. در پایان سال ۲۰۱۸، ظرفیت تجمعی نصب شده جهانی نیروگاه بادی خشکی به ۵۴۲ گیگاوات رسید.

چشم‌انداز باد خشکی تا سال ۲۰۵۰

نیروی باد از سال ۲۰۰۰ با میانگین نرخ رشد مرکب سالانه[۱] بیش از ۲۱ درصد افزایش یافته است. با توجه به در دسترس بودن منابع فراوان، پتانسیل بزرگ بازار و رقابت در هزینه، انتظار می‌رود باد خشکی[۲] رشد کلی انرژی‌های تجدیدپذیر را در چندین منطقه در دهه آینده افزایش دهد.

برای سه دهه آینده، تأسیسات نیروی بادی خشکی باید میانگین نرخ رشد مرکب سالانه بیش از ۷ درصد داشته باشد (شکل ۳). این بدان معناست که مجموع ظرفیت نصب شده باد خشکی تا سال ۲۰۳۰ بیش از سه برابر (به ۱۷۸۷ گیگاوات) و تقریبا ده برابر تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد، نزدیک به ۵۰۴۴ گیگاوات در مقایسه با ۵۴۲ گیگاوات در سال ۲۰۱۸. این امر امکان‌سنجی و سهولت افزایش تأسیسات بادی خشکی را در سه دهه آینده با ادامه سرعت تاریخی نشان می‌دهد.

علاوه بر این، طبق برآورد کمیته فنی انجمن جهانی انرژی بادی[۳]، ظرفیت نصب شده جهانی بادی خشکی ۵۰۴۴ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ تنها کسری (۵.۳ درصد) از پتانسیل جهانی منابع بادی حداقل ۹۵۰۰۰ گیگاواتی را نشان می‌دهد. کل مساحت زمین مورد نیاز در جهان برای نصب ۵۰۴۴ گیگاوات در خشکی تا سال ۲۰۵۰ بین ۱۰۰۸۸۰۰ کیلومتر مربع (به اندازه اتیوپی) و ۱۶۶۴۵۲۰ کیلومتر مربع (تقریبا به وسعت ایران) است. در طول سال‌های اولیه استقرار نیروی بادی، اروپا عامل اصلی تأسیسات بادی در جهان بوده است. در سال ۲۰۱۰، این منطقه ۴۷ درصد از تأسیسات خشکی جهانی را به خود اختصاص داده است. از سال ۲۰۱۰، استقرار سریع باد در مناطق دیگر، به ویژه چین با نرخ رشد ترکیبی سالیانه حدود ۲۷ درصد مشاهده شده است. تا سال ۲۰۱۸، چین از اروپا پیشی گرفت و به بزرگ‌ترین بازار باد خشکی با نزدیک به یک‌سوم ظرفیت نصب شده جهانی تبدیل شد. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۸ از نظر تامین مالی ظرفیت جدید بادی رکورددار بود، با تقریبا ۱۶.۷ گیگاوات پروژه‌های آینده انرژی بادی که مشمول تصمیم برای سرمایه‌گذاری نهایی شدند. تقریبا ۲۹.۴ میلیارد دلار در مزارع بادی جدید در سال ۲۰۱۸ سرمایه‌گذاری شده که باد خشکی به طور متوسط ۱.۵۴ میلیون دلار در هر مگاوات و باد دریایی[۴] ۲.۵۷ میلیون دلار در هر مگاوات بوده است.

---

[۱] Compound annual growth rate (CAGR)

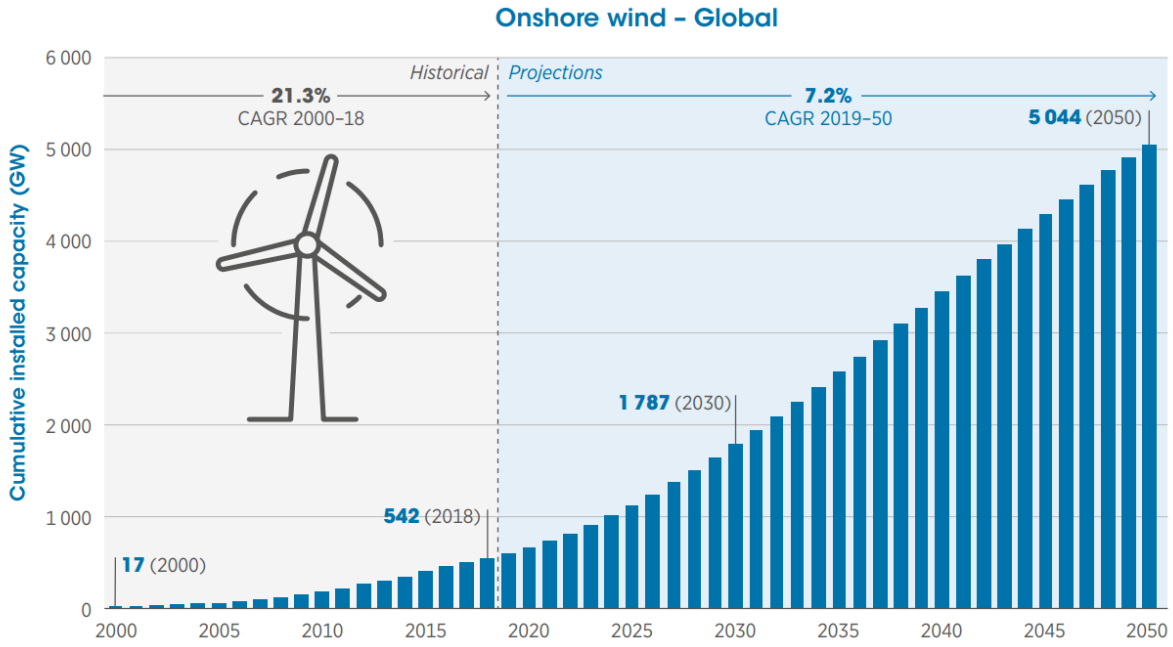
[۲] Onshore wind

باد خشکی؛ انرژی باد خشکی، نیرویی است که توسط توربین‌های بادی مستقر در خشکی و با حرکت طبیعی هوا تولید می‌شود.

[۳] World Wind Energy Association (WWEA)

[۴] Offshore wind

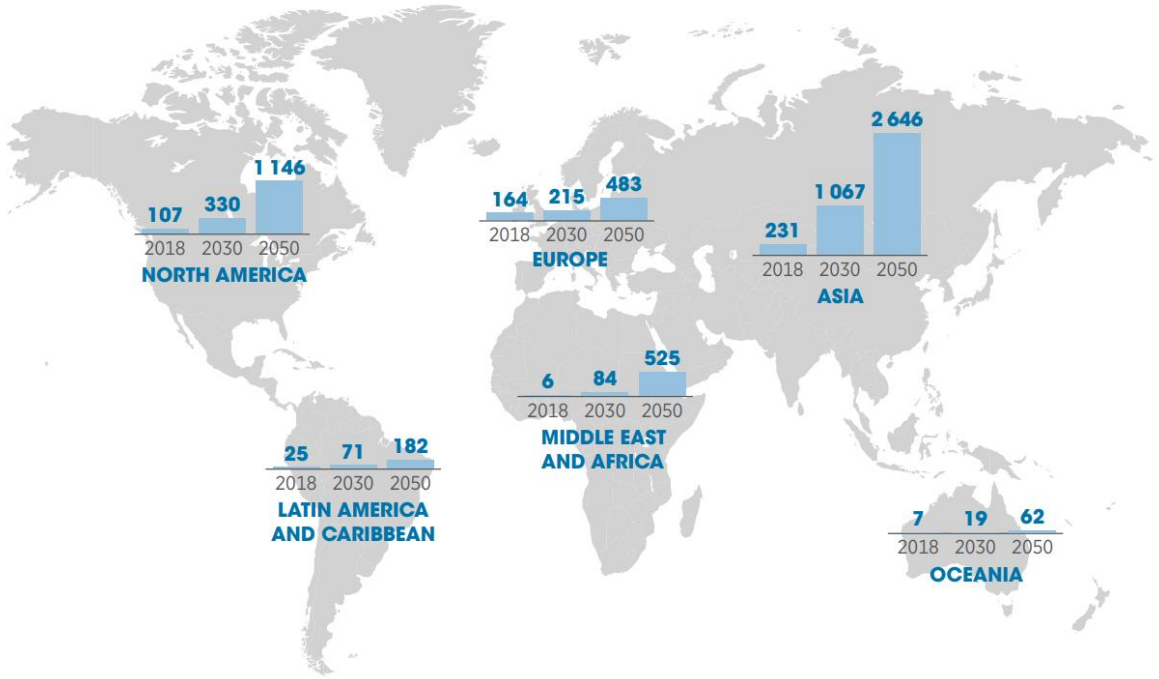
باد دریایی یا فراساحلی؛ انرژی باد دریایی نیرویی است که از وزش باد در دریا تولید می‌شود.



شکل ۳. در میان مناطق جهان، آسیا برای تسلط بر تأسیسات جهانی فوتوولتائیک خورشیدی در سناریوی رهنگاشت آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر و پس از آن آمریکای شمالی و اروپا آماده هستند.

آسیا و عمدتا چین (با بیش از ۲۰۰۰ گیگاوات) و هند (با بیش از ۳۰۰ گیگاوات) همچنان پیشتاز تاسیسات جهانی نیروگاه بادی خشکی هستند و این منطقه بیش از نیمی (۲۶۵۶ گیگاوات) از کل ظرفیت جهانی را تا سال ۲۰۵۰ به خود اختصاص خواهد داد (شکل ۴). پس از آسیا، استقرار نیروگاه بادی خشکی در آمریکای شمالی (عمدتا ایالات متحده با بیش از ۸۵۰ گیگاوات) چشمگیر خواهد بود، جایی که ظرفیت نصب شده بیش از ۱۰ برابر سطح سال ۲۰۱۸ خواهد بود و تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۱۱۵۰ گیگاوات خواهد رسید. همچنین آفریقا یک بازار کلیدی برای استقرار سریع باد خشکی در سه دهه آینده خواهد بود. یافتن راهی پایدار برای برآوردن نیازهای رو به رشد انرژی یک چالش اصلی توسعه برای این قاره است. با توجه به پتانسیل غنی منابع تجدیدپذیر از جمله باد، تغییر عمده از اتکا به منابع انرژی سوخت فسیلی و افزایش سریع سهم تجدیدپذیرها در ترکیب انرژی برای این قاره بسیار مهم است. به این ترتیب، اولویت دادن به استقرار سریع پروژه‌های بادی خشکی در میان سایر پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر از هم اکنون منجر به مجموع ظرفیت نصب شده بادی خشکی بیش از ۵۰۰ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ خواهد شد.

ظرفیت‌های نصب شده بادی خشکی (گیگاوات)



شکل ۴. آسیا تا سال ۲۰۵۰ بر تأسیسات بادی خشکی جهان تسلط خواهد داشت و به دنبال آن آمریکای شمالی و اروپا قرار خواهند گرفت.

ظرفیت سالانه بادی خشکی از ابتدای این قرن به تدریج افزایش یافته است، البته با کاهش اولیه در سال ۲۰۱۰ و به دنبال آن افزایش نوسانی ظرفیت سالانه تا پایان سال ۲۰۱۸. با پیشرفت‌های مداوم فناوری و کاهش هزینه‌ها، همراه با سیاست‌های درست و اقدامات حمایتی، بازار باد خشکی در سه دهه آینده به سرعت رشد خواهد کرد. مجموع افزایش ظرفیت باد خشکی باید تا سال ۲۰۳۰ بیش از سه برابر (نزدیک به ۱۵۰ گیگاوات در سال) و بیش از چهار برابر تا سال ۲۰۵۰ (بیش از ۲۰۰ گیگاوات در سال) افزایش یابد. البته یک کاهش جزئی در افزایش ظرفیت جدید از سال ۲۰۴۰ مشاهده می‌شود که به دلایل زیادی از جمله در دسترس بودن زمین، افزایش استقرار بادهای دریایی و همچنین کمک به رشد سایر فناوری‌های تجدیدپذیر (از جمله پروژه‌های ترکیبی) نسبت داده می‌شود. تجزیه‌وتحلیل در این گزارش «ظرفیت جایگزین» را فقط به عنوان ظرفیت نصب شده یا پروژه‌هایی که به پایان عمر فنی نزدیک می‌شود، در نظر می‌گیرد.

همراه با رشد افزایش ظرفیت خالص بادی طی سه دهه آینده، یکی دیگر از مسائل کلیدی جایگزینی توربین‌های بادی است که به پایان عمر فنی خود نزدیک می‌شوند و مسئله دیگر تقویت مجدد پروژه‌های موجود برای افزایش طول عمر عملیاتی آنها خواهد بود. نگهداری و ارتقای سطح سیستم، از جمله جایگزینی

قطعات قدیمی با فناوری‌های پیشرفته می‌تواند به افزایش مزایای اجتماعی‌اقتصادی حاصل از نصب اولیه کمک کند. تاکنون هیچ محرک نظارتی یا سیاسی برای تقویت مجدد وجود نداشته است. برخی از توربین‌ها می‌توانند سال‌های بیشتری دوام بیاورند و تنها در برخی بازارها جایگزینی آنها از نظر اقتصادی جذاب است (به عنوان مثال، از طریق اعتبار مالیاتی تولید در ایالات متحده). تقویت مجدد همچنین استفاده از پیشرفته‌ترین توربین‌ها را در مکان‌هایی که بهترین منابع بادی خشکی را دارند (به عنوان مثال مزرعه بادی دلابل[1] در انگلیس) ممکن می‌سازد (IRENA, 2019).

چشم‌انداز باد دریایی تا سال ۲۰۵۰

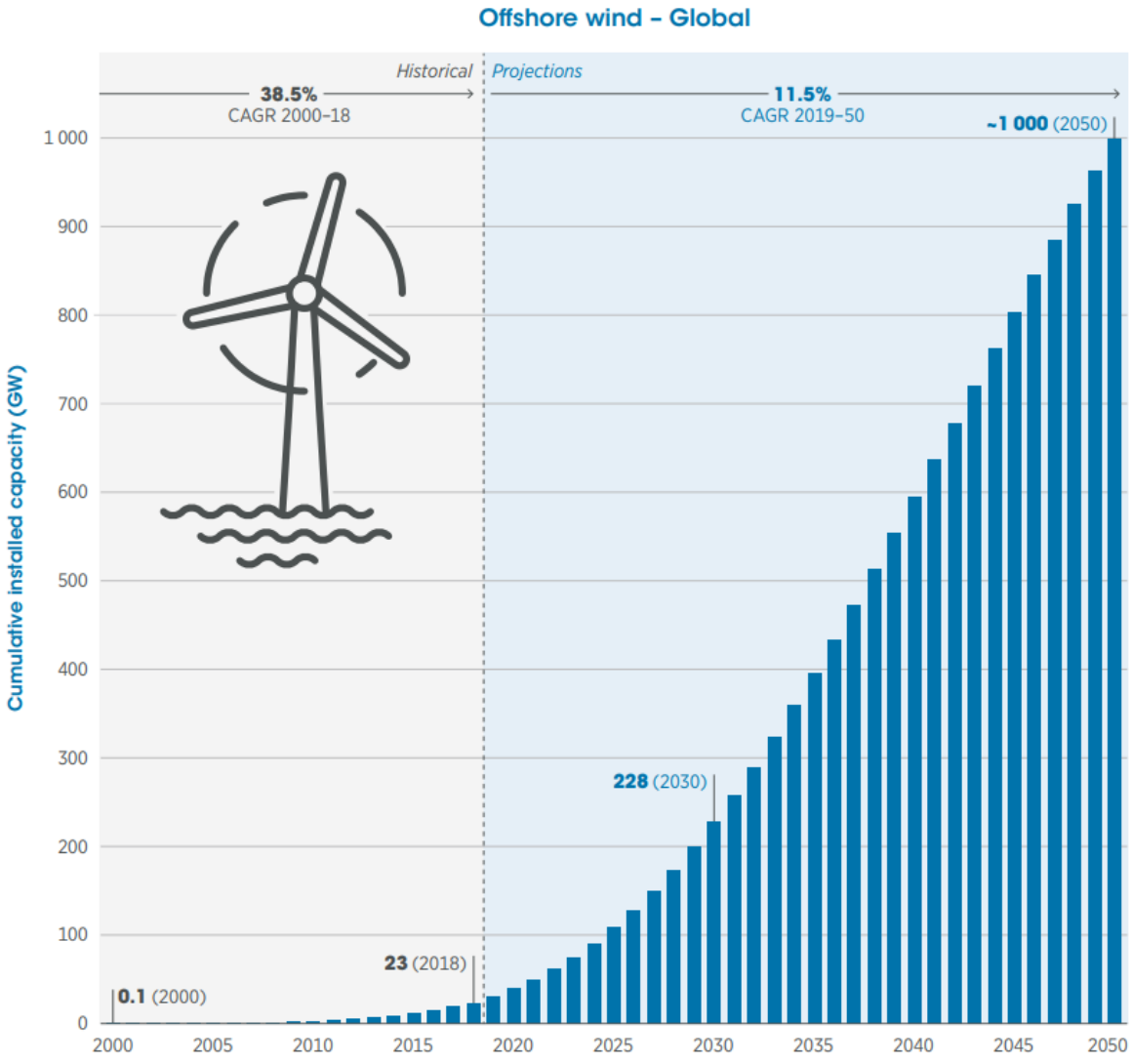
فناوری باد دریایی به کشورها اجازه می‌دهد تا از منابع بادی معمولا تندتر و گاهی ملایم‌تر در دریا بهره‌برداری کنند و در عین حال به پروژه‌هایی نزدیک به مناطق پرجمعیت ساحلی دست یابند. این امر باعث می‌شود که باد دریایی، افزوده مهمی به مجموعه فناوری‌های کم‌کربن موجود برای کربن‌زدایی در بخش انرژی برای بسیاری از کشورها به حساب بیاید. انرژی بادی دریایی یکی از فناوری‌های نوظهور تجدیدپذیر است که در کمتر از ده سال اخیر به بلوغ رسیده است؛ زیرا پیشرفت سریع فناوری، کارایی زنجیره تامین و هم‌افزایی لجستیکی در بازارهای نزدیک به هم در اروپا شاهد کاهش سریع هزینه‌ها بوده است. باد دریایی با تحریک سیاست‌ها و مشوق‌های مالی، به سرعت در حال رشد در بازارهای جدید است؛ زیرا جایگزینی مکمل برای برخی از چالش‌های استقرار بادی خشکی است که عمدتا با توجه به محدودیت‌های زمینی، استقرار باد خشکی را در برخی مکان‌ها چالش برانگیزتر می‌کند (مانند اروپا) .

بازار بادی دریایی در طی سه دهه آینده رشد قابل‌توجهی خواهد داشت؛ زیرا ظرفیت نصب شده بادی دریایی نسبت به ۲۳ گیگاوات در سال ۲۰۱۸ تقریباً ده برابر خواهد شد و به ۲۲۸ گیگاوات در سال ۲۰۳۰ و نزدیک به ۱۰۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۵۰ (شکل ۵) خواهد رسید. باد دریایی تقریبا ۱۷ درصد از کل ظرفیت بادی نصب شده جهانی (یعنی ۶۰۴۴ گیگاوات) را در سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد. این نشان دهنده میانگین ۱۱.۵ درصدی نرخ رشد ترکیبی سالیانه برای سه دهه آینده است که بسیار پایین‌تر از میانگین تاریخی ۳۸.۵ درصدی بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ است و نشان‌دهنده امکان‌سنجی و سهولت افزایش مقیاس تأسیسات بادی دریایی است.

رشد نزدیک به ده برابری ظرفیت‌های بادی دریایی تا سال ۲۰۳۰ با گزارش شورای جهانی انرژی بادی در سال ۲۰۱۹ بازار بادی دریایی مطابقت دارد که تخمین می‌زند صنعت بادی دریایی بیش از ۲۰۰ گیگاوات رشد خواهد کرد.

[1] Delabole

در حال حاضر ۹۰ درصد از ظرفیت جهانی بادی نصب شده در دریا در دریای شمال و اقیانوس اطلس مجاور راه اندازی و بهره‌برداری می‌شود. در سال ۲۰۱۸، تقریبا ۴.۵ گیگاوات به ظرفیت جدید بادی دریایی اضافه شد که بیشتر آن در چین (نزدیک به ۳۷ درصد از کل) متمرکز شده بود و بیشتر رشد ظرفیت در انگلیس (۲۹ درصد) و آلمان (۲۲ درصد) بود. استقرار بادی دریایی قرار است با پروژه‌هایی که در سال‌های آینده توسعه می‌یابند، به آمریکای شمالی و اقیانوسیه نیز گسترش یابد.

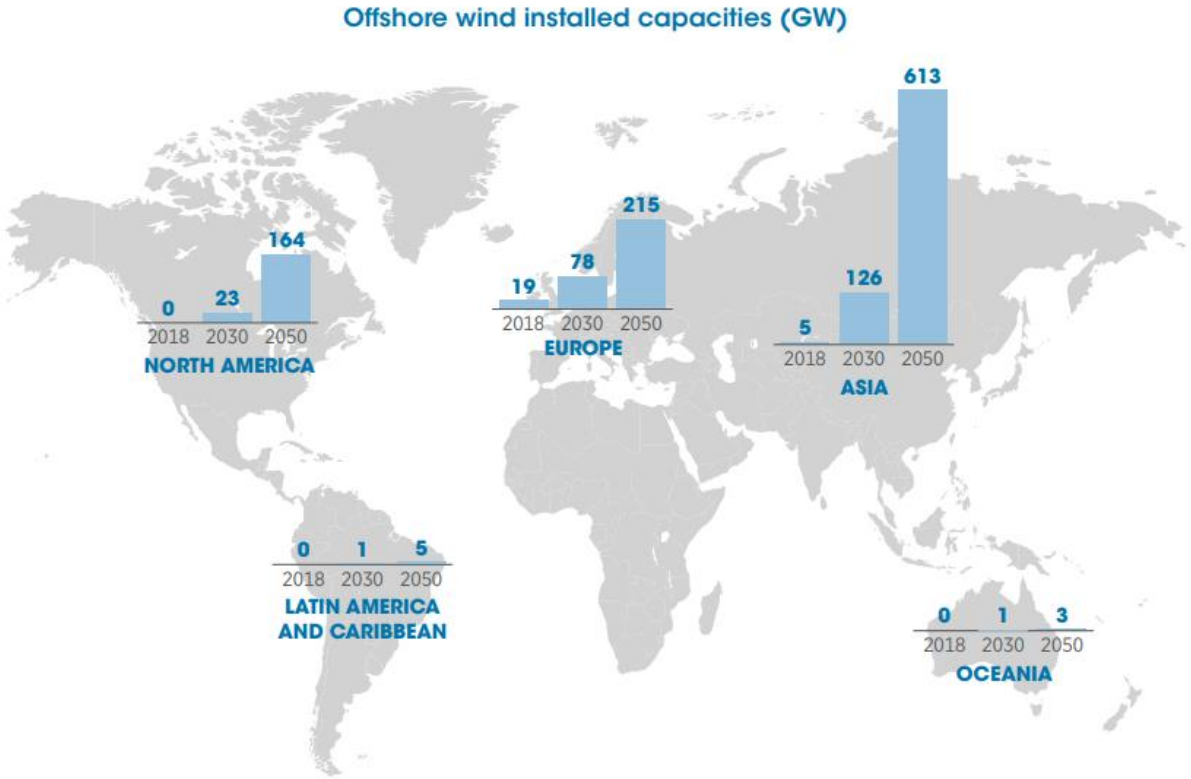


شکل ۵. استقرار نیروی بادی دریایی به تدریج تا سال ۲۰۵۰ به ۱۰۰۰ گیگاوات کل ظرفیت نصب‌شده افزایش خواهد یافت.

با گذر زمان، تغییر چشمگیری در استقرار بادی دریایی در آب‌های آسیایی (بیشتر در چین، هند، چین تایپه، جمهوری کره، ژاپن، اندونزی، فیلیپین و ویتنام) در سه دهه آینده اتفاق خواهد افتاد. آسیا در نهایت بر تأسیسات بادی دریایی جهانی با ظرفیت کل بیش از ۱۰۰ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و ۶۰۰ گیگاوات تا سال

۲۰۵۰ تسلط خواهد داشت (شکل ۶). در آسیا، استقرار قابل توجه باد دریایی در چین رخ خواهد داد، جایی که ظرفیت نصب شده تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۵۶ گیگاوات و تا سال ۲۰۵۰ به ۳۸۲ گیگاوات خواهد رسید. در واقع چین بر تأسیسات بادی دریایی تسلط خواهد داشت و در کمتر از دو دهه آینده از اروپا پیشی خواهد گرفت.

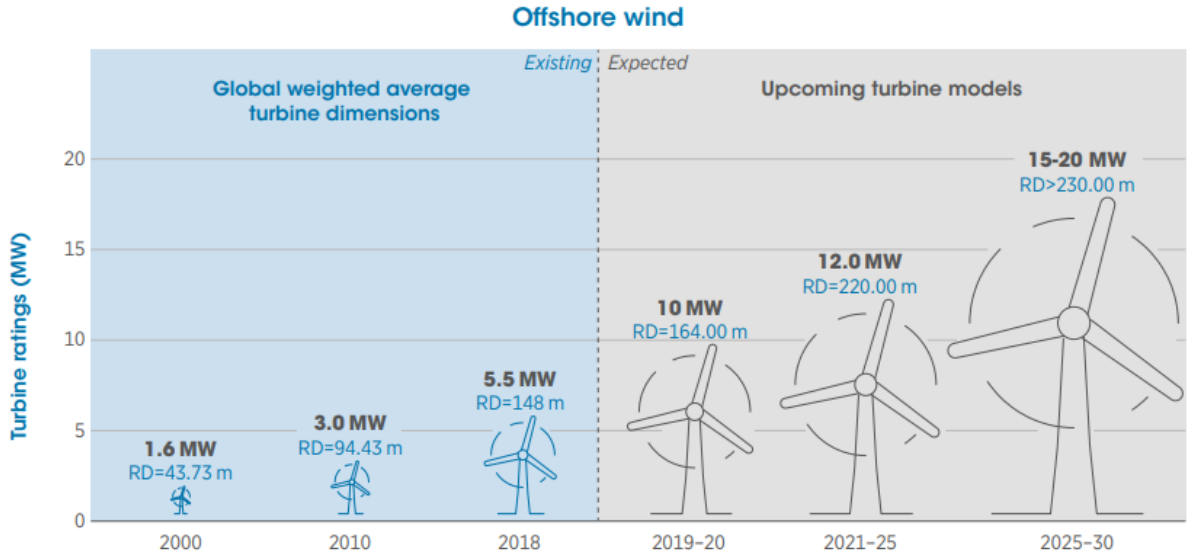
اروپا به مدت یک دهه یا بیشتر به تسلط بر تأسیسات بادی دریایی ادامه خواهد داد و مجموع ظرفیت بادی دریایی با افزایش چهار برابری به ۷۸ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و بیش از یازده برابری به ۲۱۵ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ در مقایسه با ۱۹ گیگاوات در سال ۲۰۱۸ خواهد رسید. پس از آسیا و اروپا، آمریکای شمالی یکی دیگر از بازارهای نوظهور باد دریایی خواهد بود. در ایالات متحده، ظرفیت نصب شده بادی دریایی با شدت بیشتری رشد خواهد کرد، از کمتر از ۱ گیگاوات امروز به تقریبا ۲۳ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و ۱۶۴ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰.



شکل ۶. آسیا تا سال ۲۰۵۰ بر تأسیسات بادی دریایی جهان مسلط خواهد شد و پس از آن اروپا و آمریکای شمالی قرار خواهند گرفت.

توسعه در فناوری‌های تیغه و کنترل، به ویژه، توسعه توربین‌های بزرگتر و قابل‌اعتمادتر با درجه‌بندی ظرفیت بالاتر را ممکن می‌سازد. اندازه توربین‌ها در دهه‌های اخیر به سرعت افزایش یافته است (شکل ۷). تا سال

۲۰۱۸، توربین‌های بادی دریایی با میانگین ظرفیت اسمی ۵.۵ مگاوات با قطر روتور[۱] حدود ۱۵۰ متر بودند. اندازه متوسط توربین‌های بادی دریایی در کمتر از دو دهه به میزان ۳.۴ افزایش یافته است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ به ظرفیت خروجی ۱۵ تا ۲۰ مگاوات برسد. (IRENA, 2019).



شکل ۷. افزایش اندازه متوسط توربین‌های بادی دریایی تا ۲۰۳۰

مزایای اجتماعی‌اقتصادی و سایر مزایای انرژی بادی درگذار انرژی

اشتغال در بخش باد و زنجیره ارزش محلی

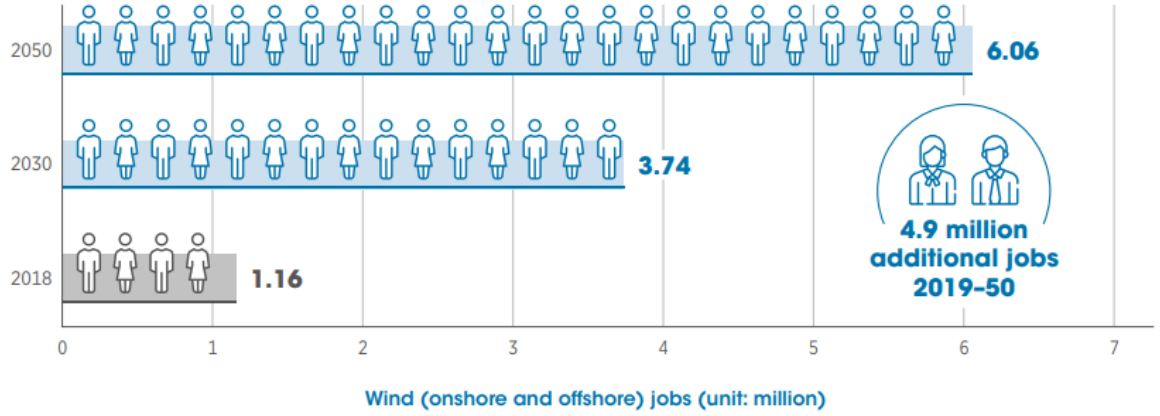
فرصت‌های شغلی نکته‌ای کلیدی در برنامه‌ریزی برای رشد اقتصاد کم‌کربن است. بسیاری از دولت‌ها توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را در درجه اول برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به اهداف بین‌المللی آب‌وهوا و همچنین برای دستیابی به منافع اقتصادی‌اجتماعی گسترده‌تر در اولویت قرار داده‌اند.

در مجموع در سال ۲۰۱۸، در صنایع بادی خشکی و دریایی ۱.۱۶ میلیون نفر در سراسر جهان مشغول به کار شدند. البته ناگفته نماند که مشاغل مرتبط با صنایع انرژی بادی در تعداد اندکی از کشورها وجود دارد. آسیا تقریبا نیمی از اشتغال جهانی با باد (۶۲۰۰۰۰ شغل) را به خود اختصاص داده است و پس از آن اروپا (۲۸ درصد) و آمریکای شمالی (۱۰ درصد) قرار دارند. در سطح کشور، چین با ۴۴ درصد اشتغال جهانی بادی (۵۱۰۰۰۰ شغل) در سال ۲۰۱۸، همچنان رهبر جهانی در تأسیسات بادی بوده است. آلمان با ۱۴۰۸۰۰ شغل

[۱] Rotor

بادی در رتبه دوم قرار داشته و پس از آن ایالات متحده آمریکا با رشد ۸ درصدی اشتغال در باد به عدد ۱۱۴۰۰۰ شغل تا پایان سال ۲۰۱۸ رسیده است.

آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر بر مبنای رهنگاشت انرژی‌های تجدیدپذیر خود و بر اساس مدل‌سازی پیامدهای اجتماعی‌اقتصادی در آن، تخمین می‌زند که اشتغال در صنعت بادی به روند افزایشی خود ادامه دهد و تا سال ۲۰۳۰ از ۳.۷ میلیون شغل و تا سال ۲۰۵۰ از ۶ میلیون شغل فراتر رود (شکل ۸). از بیش از ۶ میلیون شغل تا سال ۲۰۵۰، ۵ میلیون شغل در بخش باد خشکی و بقیه مشاغل در بخش باد دریایی (۱ میلیون) خواهد بود (IRENA, 2019).



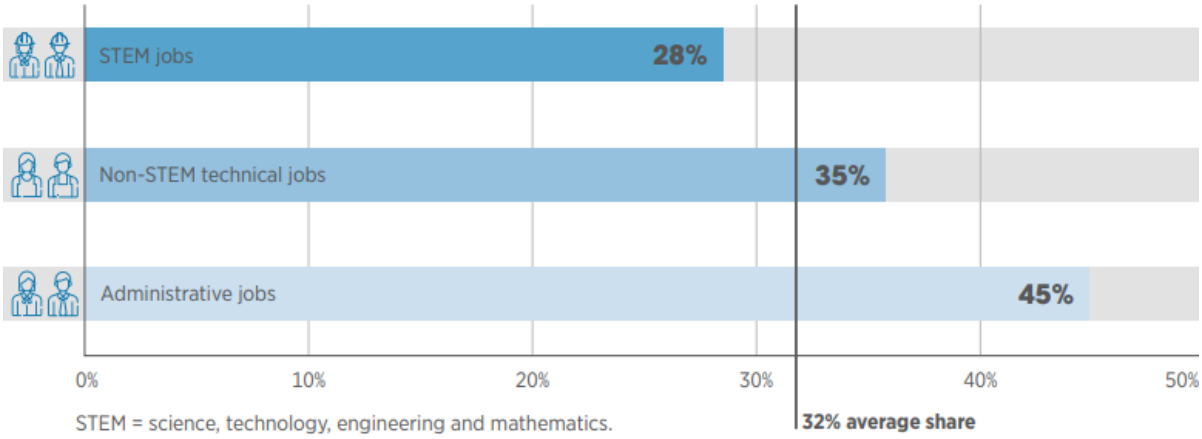
شکل ۸. صنایع بادی خشکی ودریایی تا سال ۲۰۳۰ بیش از ۳.۷ میلیون نفر و تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۶ میلیون نفر را استخدام خواهند کرد (IRENA, 2019).

با گذار به آینده‌ای با انرژی‌های تجدیدپذیر هم فرصت‌های شغلی جدید ایجاد می‌شود و هم به طور بالقوه امکان حفظ تخصص‌های موجود در صنعت سوخت‌های فسیلی، به ویژه برای پیشرفت‌های فناوری تجدیدپذیر مانند باد دریایی فراهم می‌شود. برای مثال، تخصص کارگران و تکنسین‌ها در ساخت سازه‌های پشتیبانی برای سایت‌های نفت و گاز دریایی می‌تواند به طور بالقوه برای ساخت زیربناها و ایستگاه‌های فرعی برای توربین‌های بادی دریایی مورد استفاده قرار گیرد. صنعت انرژی بادی نیازمند مجموعه‌ای رو به رشد از مهارت‌ها از جمله مهارت‌های فنی، تجاری، اداری، اقتصادی و حقوقی است. بنابراین، گسترش دامنه استعدادها، علاوه بر ملاحظات برابری و عدالت جنسیتی بیشتر، دلیلی عملگرایانه برای افزایش مشارکت زنان در انرژی‌های تجدیدپذیر است. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر همراه با «برنامه زنان در رهبری جهانی باد[۱]» (که به طور مشترک توسط «شبکه جهانی زنان برای گذار انرژی[۲]» و «شورای جهانی انرژی بادی[۳]» سازماندهی

[۱] Women in Wind Global Leadership Program
[۲] Global Women 's Network for the Energy Transition (GWNET) and GWEC
[۳] Global Wind Energy Council (GWEC)

شده است)، نظرسنجی جهانی جنسیت صنعت باد[۱] را برای جمع‌آوری بینش و بازخورد برای ارئه تخمین‌ها و تجزیه‌وتحلیل نمایندگی و نقش زنان در صنعت باد در سراسر جهان راه‌اندازی کرده‌اند.

آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر با تشخیص شکاف در داده‌های تفکیک جنسیتی برای بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، در سال ۲۰۱۹ گزارشی مستقل در مورد جنسیت ارائه کرد که شامل اطلاعات به روز از سراسر جهان و همچنین نتایج یک نظرسنجی جهانی انجام شده توسط این آژانس با پشتیبانی از «شبکه جهانی زنان برای گذار انرژی» و شبکه سیاست‌گذاری انرژی تجدیدپذیر برای قرن بیست‌ویک[۲] بود. این نظرسنجی از مشارکت حدود ۱۵۰۰ زن، مرد و سازمان در ۱۴۴ کشور بهره برد. نتایج نظرسنجی نشان می‌دهد که این بخش تعداد بیشتری از زنان (۳۵ درصد) را در مقایسه با حوزه انرژی متعارف (۲۲ درصد) استخدام می‌کند (IRENA, 2019).



شکل ۹. زنان در مشاغل فنی و اداری در بخش انرژی

در حالی که این سهم برای نیروی کار در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر است، آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر قصد دارد تعداد زنان شاغل در بخش باد را تخمین بزند. علاوه بر این، آژانس در حال کار بر روی تحلیل جدیدی از بعد جنسیتی تأثیرات اشتغال در میان جوامع محلی روستایی است که تحت تأثیر توسعه پروژه انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ قرار دارند. این مطالعه داده‌های اولیه را از پروژه‌های خورشیدی و بادی که در سراسر جنوب صحرای آفریقا در حال توسعه هستند جمع آوری می‌کند (IRENA, 2019).

خلق ارزش در سطح محلی

در بخش خلق ارزش در سطح محلی، پروژه‌های بادی فرصت‌های فراوانی را ایجاد می‌کنند؛ چرا که صنایع محلی در تولید انرژی بادی پتانسیل ایجاد شغل و توسعه تولید محلی را دارند. به این ترتیب که در هر بخش

[۱] Global Gender Survey of the Wind Industry
[۲] Renewable Energy Policy Network for the 21st (REN21)

از زنجیره ارزش می‌توان فرصت‌هایی برای ایجاد ارزش داخلی در قالب مشاغل و تولید داخلی برای بنگاه‌های اقتصادی فعال را در کشورها ایجاد کرد. در مورد مشارکت صنعت داخلی در توسعه مزرعه بادی خشکی، جنبه‌های کلیدی مانند نیروی کار، مواد و تجهیزات مورد نیاز هر بخش از زنجیره ارزش باید تحلیل شود. بر این اساس می‌توان فرصت‌هایی را برای استفاده از بازارهای کار محلی و صنایع موجود برای بیشینه‌سازی زنجیره ارزش داخلی شناسایی کرد. پویایی بازار منطقه‌ای و جهانی نیز به شدت بر تصمیم برای پیگیری توسعه صنعت داخلی تأثیر می‌گذارد.

اجزای اصلی یک مزرعه بادی عبارت‌اند از؛ زیربنا، ایستگاه فرعی، بخش‌هایی از توربین، پره‌ها، برج و سیستم نظارت و کنترل. دستاوردهای اقتصادی-اجتماعی را از نظر درآمد محلی و مشاغل می‌توان با استفاده از اهرم اقتصادی موجود در بازارهای زنجیره تامین داخلی به حداکثر رساند. آموزش کافی برای ایجاد زنجیره‌های تامین محلی قوی بسیار مهم است. برای مثال، بیشینه‌سازی ارزش آفرینی ناشی از توسعه صنعت بادی در بخش داخلی، مستلزم استفاده از ظرفیت‌ها در صنایعی مانند فولاد و فایبرگلاس است. برای یک تأسیسات باد خشکی در سطح معمولی ۵۰ مگاواتی، تقریبا ۲۳۰۰۰ تن بتن برای پایه‌ها و نزدیک به ۶۰۰۰ تن فولاد و آهن برای توربین‌ها و زیربناها مورد نیاز است. الزامات گسترش تأسیسات باد دریایی نیز مشابه است. ساخت اجزای اصلی یک توربین بادی به تجهیزات تخصصی و همچنین ماشین آلات جوشکاری، بالابر و رنگ آمیزی نیاز دارد که در صنایع دیگر مانند ساختمان‌سازی و هوانوردی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیربناها همچنین نیازمند استفاده از تجهیزات تخصصی از جمله ماشین آلات نورد، حفاری و جوش هستند. برای جابه‌جایی این سازه‌های بزرگ به کشتی‌ها و جرثقیل‌های خاصی نیاز است. بررسی این الزامات بینش‌هایی را در مورد قابلیت‌های صنعتی که باید مورد استفاده قرار گیرند ارائه می‌کند. در مجموع ۱۴۴۰۰۰ نفر/روز برای توسعه یک پروژه ۵۰ مگاواتی بادی خشکی مورد نیاز است. نیاز به نیروی کار در بخش عملیات و نگهداری (۴۳ درصد از کل) و پس از آن ساخت و نصب (۳۰ درصد) و تولید (۱۷ درصد) بالاترین میزان است. برای باد دریایی، اکثر نیازهای نیروی کار (در مجموع ۲.۱ میلیون نفر در روز برای یک مزرعه ۵۰۰ مگاواتی) در بخش تولید و تدارکات است. تأسیسات تولیدی موجود برای باد خشکی می‌تواند نیازهای بخش دریایی را برآورده کند؛ زیرا بسیاری از اجزا با هم قابل مقایسه هستند. همچنین هم افزایی قابل‌توجهی بین صنعت نفت و گاز دریایی و بخش باد دریایی وجود دارد (IRENA, 2019).

ادغام با سایر فناوری‌های کم کربن؛ سیستم‌های ترکیبی

برای غلبه بر مسئله تناوب ناشی از ماهیت متغیر انرژی باد و حفظ قابلیت اطمینان و عملکرد مستمر سیستم قدرت در مواقع کمبود منابع، یک راه‌حل ترکیب سیستم‌های بادی با سایر منابع تولید تجدیدپذیر مانند فوتوولتائیک خورشیدی، فناوری‌های آبی یا ذخیره‌سازی یا با فناوری‌های نوظهور مانند هیدروژن است. در

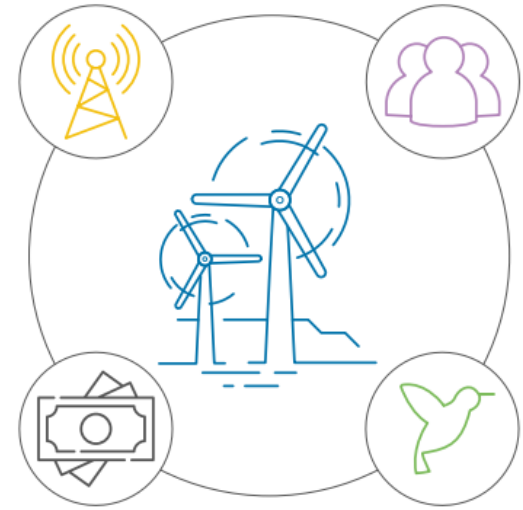
سال ۲۰۱۲، اولین پروژه ترکیبی جهان که ترکیب ۱۰۰ مگاوات باد و ۴۰ مگاوات تولید فوتوولتائیک خورشیدی به همراه یک واحد ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی لیتیوم یونی ۳۶ مگاواتی بود، توسط دو شرکت فعال در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر[۱] در چین در ژنگ‌بِی[۲] در استان هبی[۳] نصب شد. در سال ۲۰۱۷، تامین‌کننده انرژی باد به‌نام وستاس[۴] شروع یک پروژه ترکیبی در مقیاس بزرگ را اعلام کرد که ترکیبی از ۴۳.۲ مگاوات باد و ۱۵ مگاوات تولید خورشیدی به همراه یک واحد ظرفیت ذخیره‌سازی باتری ۲ مگاواتی است. انتظار می‌رود بازار جهانی ترکیبی خورشیدی‌بادی[۵] از بیش از ۰.۸۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۸ به بیش از ۱.۵ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۵ رشد کند که منعکس کننده نرخ رشد ترکیبی سالیانه تقریبا ۸.۵ درصدی در این دوره هفت ساله است. چین بازار اصلی سیستم‌های ترکیبی خورشیدی‌بادی در سال ۲۰۱۸ بود و انتظار می‌رود در دهه‌های آینده به این تسلط ادامه دهد. کشورهای دیگری نیز مانند کشورهای اتحادیه اروپا، هند و آمریکا پروژه‌های ترکیبی مختلفی را مستقر کرده‌اند و می‌توان انتظار افزایش مداوم چنین پروژه‌هایی را داشت، به ویژه به عنوان راه‌حلی مکمل برای حل مسائل یکپارچه‌سازی یا ادغام شبکه (IRENA, 2019).

تسریع استقرار برق بادی؛ موانع و راه‌حل‌های موجود

گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر به وضوح اشاره می‌کند که انرژی باد یکی از فناوری‌های تجدیدپذیر کلیدی است که برای تحقق گذار جهانی انرژی در راستای اهداف آب‌وهوایی پاریس مورد نیاز است. این فناوری اکنون در دسترس است، می‌تواند به سرعت در مقیاس بزرگ به کار گرفته شود و مقرون به صرفه است (به ویژه در خشکی). با وجود حرکت قوی، پروژه‌های انرژی بادی همچنان با محدودیت‌های جدی مواجه هستند که مانع توسعه و تجاری‌سازی بیشتر آن‌ها می‌شود.

به طور کلی، منابع انرژی تجدیدپذیر با درجات مختلف تحت تاثیر مشکلات ناشی از مشخصات پروژه، زمینه‌های جغرافیایی و سطوح بلوغ متفاوت قرار می‌گیرند. برای نیروگاه بادی، موانع موجود در مقیاس‌های مختلف (فناوری، اقتصادی، اجتماعی-سیاسی و زیست‌محیطی) می‌تواند مانع استقرار ظرفیت‌های بادی در سه دهه آینده شود (شکل ۱۰). کاهش فوری این موانع، از طریق طیف وسیعی از سیاست‌های حمایتی و اقدامات اجرایی، برای تقویت استقرار در آینده حیاتی است.

[۱] State Grid Corporation and Build Your Dreams (BYD)
[۲] Zhangbei
[۳] Hebei
[۴] Vestas
[۵] Global hybrid solar - wind market



شکل ۱۰. موانع موجود در بخش انرژی بادی

در حالی که گذار انرژی می‌تواند مزایای کلی اجتماعی-اقتصادی را در سطح جهانی به ارمغان بیاورد، نگاهی عمیق‌تر به سطح منطقه‌ای نشان می‌دهد که چگونه منافع (و هزینه‌های) تحول بر بخش‌های مختلف جهان تأثیر متفاوتی خواهد داشت. این تفاوت‌ها عمدتا به این دلیل است؛ ۱. کشورهایی که نقاط شروع متفاوتی برای گذار انرژی دارند؛ ۲. گستردگی، نقاط قوت و تنوع زنجیره‌های تامین؛ ۳. میزان وابستگی اقتصادها به سوخت‌های فسیلی؛ ۴. سطوح مختلف جاه‌طلبی ملی و ابزار اجرا. مهار اثرات منطقه‌ای و کشوری گذار انرژی به چارچوب سیاستی بستگی دارد که در دو جبهه عمل می‌کند. این چارچوب باید استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر را هم برای کاهش مصرف انرژی و هم برای افزایش دسترسی به انرژی ترویج کند. به طور همزمان، استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر باید در سیاست‌های گسترده‌تری گنجانده شود که انرژی را به کاتالیزور رشد اقتصادی، فراگیر و پایدار تبدیل کند. چنین چارچوب سیاستی که متضمن «گذار عادلانه» است دارای سه رکن است؛ سیاست‌های استقرار، سیاست‌های یکپارچه‌سازی و سیاست‌های توانمندسازی. این مجموعه از سیاست‌ها باید با هم گذار انرژی عادلانه و فراگیر را تضمین کنند که عمدتا برای غلبه بر همه موانع موجود (سیاست، بازار و اقتصادی، فناوری، نظارت، سیاسی و اجتماعی) در نظر گرفته می‌شوند.

سیاست‌های استقرار

- تعیین اهداف بلندمدت، شفاف و پایدار برای جذب سرمایه‌گذاری در انرژی باد
- ایجاد ثبات بلندمدت برای ابزارهای سیاستی
- تطبیق سیاست‌ها با شرایط متغیر بازار

- در نظر گرفتن هزینه‌های تامین مالی برای دو هدف؛ اول، راهبردهای استقرار مقرون به صرفه برای کربن‌زدایی از فرایند تولید برق و دوم، به عنوان بخشی از سیاست‌های تجدیدپذیر به منظور کاهش موانع مرتبط با رشد سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر
- ساده‌سازی فرآیند صدور مجوز با هدف جلوگیری از ساخت و ساز طولانی‌تر، اندازه پروژه، ریسک‌های بازار و ریسک‌های عملیاتی

سیاست‌های یکپارچه‌سازی

- اتخاذ رویکرد سیستمی و مرتبط کردن نوآوری‌ها در فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، طراحی بازار، مدل‌های تجاری و عملیات سیستم
- حمایت از استقرار منابع انرژی توزیع‌شده
- بهبود زیرساخت‌های موجود همراه با ساخت یک شبکه فشار قوی یا سوپرشبکه برای انتقال برق به منطقه دیگر و جلوگیری از قطع استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
- کاهش عدم قطعیت تولید باد از طریق پیش‌بینی‌های پیشرفته آب‌وهوا
- درگیر کردن جوامع محلی از مراحل اولیه توسعه مزرعه بادی و ترویج الگوهای مالکیت اجتماع
- ترویج راهبردهای تحقیق‌وتوسعه

سیاست‌های توانمندسازی

- ارتقای آگاهی مصرف‌کننده
- ایجاد امکان سرمایه‌گذاری عمومی هدفمند برای حمایت از درک ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد مشاغل و قابلیت‌های بیشتر
- تقویت و بیشینه‌سازی ارزش ایجادشده از توسعه ملی صنعت بادی
- بسیج جریان‌های درآمدی از طریق قیمت‌گذاری کربن
- استقرار ابتکارات و برنامه‌های مالی پایدار برای گسترش فضای مالی و تقویت تنوع بخشی برای تامین مالی فرآیند انتقال انرژی در میان مدت و بلند مدت
- پشتیبانی از مهارت‌ها و توسعه زنجیره تامین به منظور امکان تجاری سازی فناوری باد

تولید الکتریسته از باد

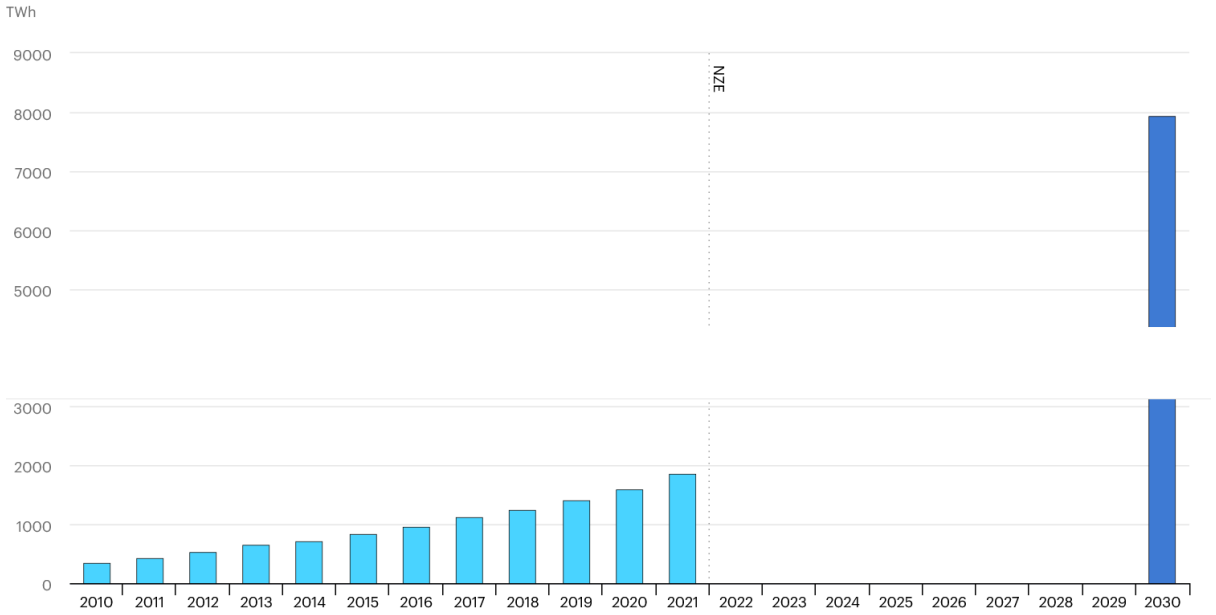
در ادامه گزارش آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۲۲ درباره تولید الکتریسته از باد و فناوری‌های مرتبط با آن ارائه می‌شود که بیانگر زوایای دیگری از استفاده از انرژی بادی است.

انتظار می‌رود که تأسیسات بادی سالانه جهانی در سال ۲۰۲۷ با افزایش ۵۰ درصدی به بیش از ۳۰ گیگاوات افزایش یابد که با حمایت سیاست‌گذاری در اتحادیه اروپا، ایالات متحده و چین پیش می‌رود. بر این اساس، رشد ظرفیت بادی دریایی ۲۰ درصد بیشتر است و چین در این زمینه بیشترین ادعا را دارد (IEA, 2022).

سال ۲۰۲۱ تولید برق بادی به میزان ۲۷۳ تراوات ساعت (افزایش ۱۷ درصدی) افزایش یافت. این رشد ۵۵ درصد بیشتر از رشدی بود که در سال ۲۰۲۰ به دست آمد و بالاترین میزان در بین تمام فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر بود. چنین توسعه سریعی به لطف افزایش بی‌سابقه در افزایش ظرفیت بادی امکان‌پذیر شد که در سال ۲۰۲۰ به ۱۱۳ گیگاوات رسید، در حالی که تنها ۵۹ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ بود. با این حال، برای دستیابی به سناریوی انتشار صفر خالص تا سال ۲۰۵۰، که بر مبنای تولید برق بادی تقریبا ۷۹۰۰ تراوات ساعت در سال ۲۰۳۰ است، لازم است میانگین ظرفیت سالانه افزوده شده تقریبا به ۲۵۰ گیگاوات افزایش یابد که بیش از دو برابر رشد رکورد سال ۲۰۲۰ است. تلاش‌های بسیار بیشتری برای دستیابی به این سطح از رشد پایدار ظرفیت مورد نیاز است و مهم‌ترین زمینه‌های بهبود، تسهیل صدور مجوز برای تولید انرژی از باد خشکی و کاهش هزینه برای باد دریایی است (IEA, 2022).

افزایش بی‌سابقه تولید انرژی از باد در سال ۲۰۲۱

تولید باد در سال ۲۰۲۱ به میزان بی‌سابقه‌ای افزایش یافته است؛ اما برای رسیدن به هدف سناریوی خالص صفر به رشد سریع‌تری نیز نیاز است. میزان برق تولید شده توسط باد در سال ۲۰۲۱ تقریبا ۲۷۳ تراوات ساعت افزایش یافته است (افزایش ۱۷ درصد) که ۴۵ درصد رشد بیشتر از آن مقداری است که در سال ۲۰۲۰ به دست آمد. به این ترتیب باد بزرگ‌ترین فناوری تولید برق است. باد همچنان به عنوان پیشرو در فناوری تجدیدپذیر غیرآبی باقی می‌ماند و در سال ۲۰۲۱ حدود ۱۸۷۰ تراوات ساعت الکتریسیته تولید می‌کند که این خود تقریبا به اندازه تمام انرژی‌ای است که سایر فناوری‌ها در مجموع تولید کرده‌اند.



شکل ۱۱. تولید برق بادی در سناریوی خالص صفر، ۲۰۱۰ تا۲۰۳۰

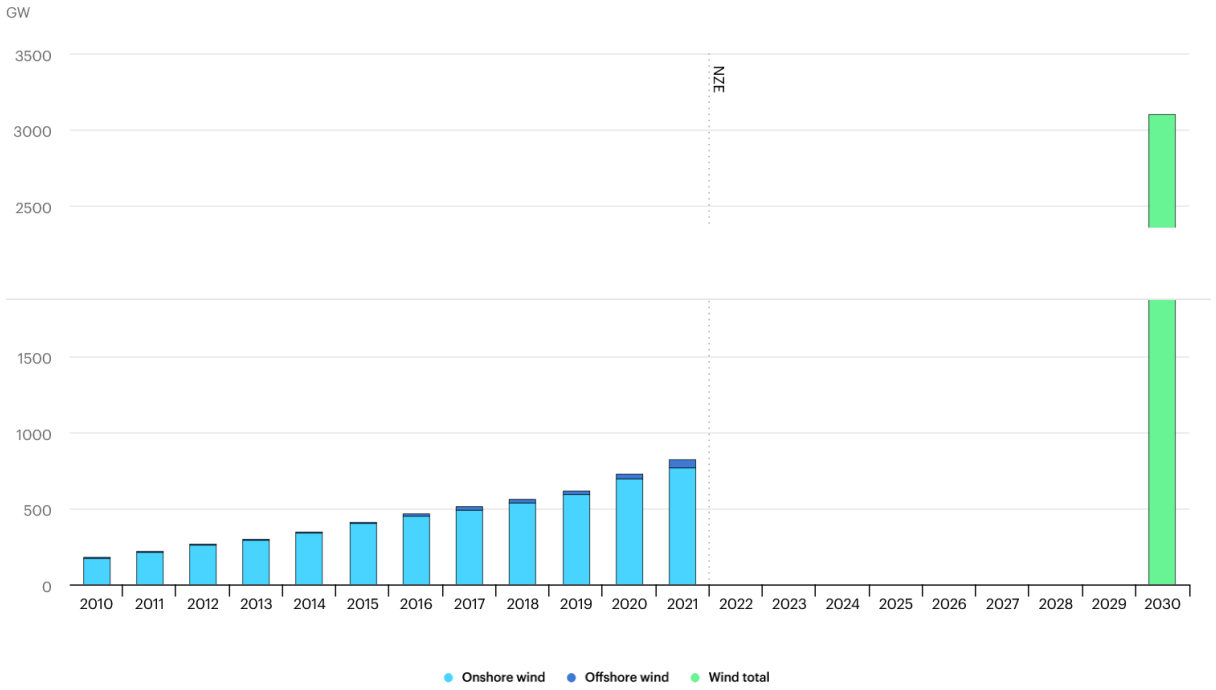
تقریبا ۷۰ درصد رشد تولید بادی در سال ۲۰۲۱ توسط چین انجام شده و پس از آن ایالات متحده با ۱۴ درصد و برزیل با ۷ درصد قرار دارند. اتحادیه اروپا علیرغم رشد نزدیک به رکورد ظرفیت در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱، شاهد کاهش ۳ درصدی تولید برق بادی در سال ۲۰۲۱ به دلیل دوره‌های غیرمعمول و طولانی ناشی از شرایط کمبود باد بود. در سطح جهانی، رکورد رشد تولید به لطف افزایش ۹۰ درصدی در رشد ظرفیت در سال ۲۰۲۰ امکان‌پذیر شد که به ۱۱۳ گیگاوات رسید که ناشی از ضرب‌الاجل‌های سیاست در چین و ایالات متحده بود. با این حال، در سال ۲۰۲۱، افزایش باد در چین یک‌سوم و در ایالات متحده به میزان یک‌چهارم کاهش یافت که تا حدی با رشد سریع‌تر در سایر نقاط جهان جبران شد و در نتیجه رشد ظرفیت کلی به ۹۴ گیگاوات رسید.

همسویی با سطح تولید برق بادی در سناریوی صفر خالص در حدود ۷۹۰۰ تراوات ساعت در سال ۲۰۳۰ مستلزم افزایش متوسط تقریباً ۱۸ درصدی در سال در طی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۰ است. پس از اضافه شدن ظرفیت فوق‌العاده بالا در سال‌های ۲۰۲۰ و۲۰۲۱، انتظار می‌رود که استقرار تأسیسات بادی در سال‌های آینده تثبیت شود و نیاز به تلاش‌های قوی برای رسیدن به مسیر سناریوی خالص صفر را برجسته کند (IEA, 2022).

استقرار فناوری

فناوری باد خشکی همچنان پیشران رشد ظرفیت تولید انرژی از باد است؛ اما انتظار می‌رود که باد دریایی سهم خود را از تولید انرژی در سال‌های آینده افزایش دهد.

در سال ۲۰۲۱، از مجموع ۸۳۰ گیگاوات ظرفیت بادی نصب شده، ۹۳ درصد سیستم‌های خشکی و ۷ درصد باقیمانده نیروگاه‌های بادی دریایی بودند. باد خشکی یک فناوری توسعه یافته است که در ۱۱۵ کشور در سراسر جهان وجود دارد، در حالی که باد دریایی در مرحله اولیه گسترش است و ظرفیت آن تنها در ۱۹ کشور وجود دارد. با این حال، انتظار می‌رود که در سال‌های آینده، با توجه به توسعه یا برنامه‌ریزی کشورهای بیشتری برای توسعه اولین مزارع بادی دریایی، دسترسی به آن افزایش یابد.



شکل ۱۲. ظرفیت نیروی باد در سناریوی صفر خالص، ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰

در سال ۲۰۲۱ حدود ۲۲ درصد از رشد کل ظرفیت بادی ۹۴ گیگاواتی را فناوری باد دریایی تشکیل داده است که بالاترین میزان در تاریخ و سه برابر میانگین پنج سال گذشته است. چنین سهم بالایی ناشی از ترکیب رکورد افزایش ظرفیت باد دریایی در چین اتفاق افتاده است که دلیل ۸۰ درصد رشد تولید انرژی از باد دریایی و کاهش رشد جهانی تولید انرژی از باد خشکی بود. در حالی که انتظار می‌رود نرخ افزایش ظرفیت بادی خشکی در سال‌های آینده ثابت بماند، سیستم‌های باد دریایی قرار است در بازارهای موجود خود مانند اتحادیه اروپا و چین و همچنین ورود به کشورهای جدید مانند ایالات متحده، چین تایپه و ژاپن سرعت بیشتری بگیرند.

دستیابی به تولید سالانه برق بادی حدود ۸۰۰۰ تراوات ساعت در سال ۲۰۳۰، همانطور که در سناریوی خالص صفر پیش‌بینی شده است، به حمایت بیشتر از مزارع باد خشکی و دریایی نیاز دارد. تلاش‌ها باید بر تسهیل صدور مجوز، حمایت از شناسایی مکان‌های مناسب، کاهش هزینه‌ها و کاهش زمان‌بندی توسعه پروژه متمرکز شود (IEA, 2022).

نوآوری

توسعه فناوری انرژی بادی بر افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها تمرکز دارد. از یک طرف در مورد باد خشکی، نوآوری بر افزایش بهره‌وری فناوری متمرکز است، به ویژه در مناطقی با شرایط باد کم با توسعه توربین‌هایی با پره‌ها و برج‌های بلندتر. با این حال، ارتفاع بیشینه توربین‌های بادی خشکی اغلب به مناطق خاصی محدود می‌شود. به دلایل محیطی و پذیرش عمومی، که دامنه نوآوری‌های ممکن را محدود می‌کند.

از طرف دیگر، در بخش باد دریایی، چنین محدودیتی در اندازه توربین وجود ندارد. بنابراین نوآوری بر روی طراحی توربین‌های بزرگ‌تر متمرکز شده است که امکان کاهش هزینه کلی تولید برق را فراهم می‌کند. به موازات آن، توسعه توربین‌های بادی دریایی شناور با قیمت رقابتی و ایمن در حال تسریع است. مزارع بادی شناور می‌توانند پتانسیل وسیعی برای مناطق اقیانوسی با عمق آب زیاد را برای توربین‌های ثابت ایجاد کنند و می‌توانند ابزاری حیاتی برای گذار انرژی برای کشورهایی مانند ژاپن، کره، پرتغال، فرانسه و سواحل غربی ایالات متحده باشند (IEA, 2022).

سیاست‌گذاری

حمایت از سیاست همچنان محرک اصلی استقرار نیروی بادی است. حمایت از سیاست، محرک اصلی استقرار تأسیسات بادی در اکثر کشورهای جهان است. انواع مختلفی از سیاست‌ها باعث رشد ظرفیت می‌شوند، از جمله مزایده‌ها، تعرفه‌های خوراک، قراردادهای متفاوت و استانداردهای مجموعه انرژی‌های تجدیدپذیر. تغییرات مهم سیاستی و اهداف موثر بر رشد تولید انرژی بادی که در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ اجرا شده، عبارت‌اند از؛

- چین چهاردهمین برنامه پنج ساله خود را در ژوئن ۲۰۲۲ منتشر کرد که شامل یک هدف بلندپروازانه ۳۳ درصدی از تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۵ است (نسبت به حدود ۲۹ درصد در سال ۲۰۲۱) که شامل هدف ۱۸ درصدی برای فناوری‌های بادی و خورشیدی می‌شود.
- در آگوست ۲۰۲۲، دولت فدرال ایالات متحده قانون کاهش تورم را معرفی کرد، قانونی که به طور قابل‌توجهی حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر را در ۱۰ سال آینده از طریق اعتبارات مالیاتی و سایر اقدامات گسترش می‌دهد.
- در ژوئیه ۲۰۲۱، کمیسیون اروپا پیشنهاد کرد که انرژی‌های تجدیدپذیر برای سال ۲۰۳۰ از ۳۲ درصد به ۴۰ درصد افزایش یابد. هدف پیشنهادی در می۲۰۲۲ به ۴۵ درصد افزایش یافت. بسیاری از کشورهای اروپایی قبلا مکانیسم‌های حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر خود را گسترش داده‌اند. برای

تسریع رشد ظرفیت با توجه به اهداف ۲۰۳۰ و در پاسخ به بحران انرژی ناشی از تهاجم روسیه به اوکراین.

- در جریان بیست‌وششمین کنفرانس تغییر اقلیم سازمان ملل متحد[۱] که در نوامبر ۲۰۲۱ در گلاسکو برگزار شد، هند اهداف جدید ۲۰۳۰ را ۵۰۰ گیگاوات از کل ظرفیت غیرفسیلی و ۵۰ درصد سهم تولید برق تجدیدپذیر (بیش از دو برابر سهم ۲۲ درصدی در سال ۲۰۲۰) و همچنین دستیابی به انتشار صفر خالص تا سال ۲۰۷۰ اعلام کرد (IEA, 2022).

جدول ۱. سیاست‌های حمایتی

خط مشی	کشور	سال	وضعیت	حوزه اجرایی
ابتکار انرژی پاک روستایی و حمایت از گذار انرژی روستایی[۲]	ایالات متحده	۲۰۲۳	در حال اجرا	ملی
بسته کاهش تورم ۲[۳]	اتریش	۲۰۲۲	در حال اجرا	ملی
"طرح سرمایه گذاری فرانسه ۲۰۳۰" – سرمایه گذاری در نوآوری در انرژی‌های تجدیدپذیر[۴]	فرانسه	۲۰۲۲	در حال اجرا	ملی
وام سبز برای حمایت از پروژه‌های نیروگاه بادی خشکی[۵]	لهستان	۲۰۲۲	در حال اجرا	ملی
بودجه ملی اصلاح شده ۲۰۲۱-۲۰۲۲: سرمایه گذاری در انرژی[۶]	نروژ	۲۰۲۲	در حال اجرا	ملی
سرمایه‌گذاری برای باد دریایی شناور	انگلیس	۲۰۲۲	اعلام شده	ملی

همکاری‌های بین‌المللی

انرژی بادی بخشی از همه برنامه‌های اصلی همکاری انرژی تجدیدپذیر است. فراتر از ابتکارات جهانی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر که شامل باد می‌شود، سازمان‌های بین‌المللی متعدد، برنامه‌های همکاری، گروه‌ها و ابتکارات با هدف تسریع رشد انرژی بادی در سراسر جهان وجود دارد. از جمله برنامه همکاری فناوری سیستم‌های انرژی بادی آژانس بین‌المللی انرژی که یک پلت فرم اطلاعاتی برای دولت‌های شرکت کننده و

[۱] 26th UN Climate Change Conference of the Parties (COP26)
[۲] Rural Clean Energy Initiative & Support to rural energy transition
[۳] Inflation Relief Package 2
[۴] "France 2030 investment Plan"- Investment in renewable energy innovation France
[۵] Green Loan to support onshore wind farm projects
[۶] Revised national budget 2021-2022: Energy investments

رهبران صنعت در زمینه تلاش‌های مشترک تحقیق‌وتوسعه برای کاهش هزینه فناوری‌های انرژی بادی، افزایش انعطاف‌پذیری سیستم انتقال و قدرت و افزایش پذیرش اجتماعی پروژه‌های انرژی باد را فراهم می‌کند (IEA, 2022).

راهبردهای بخش خصوصی

فعالیت بخش خصوصی به عنوان یک محرک ساده برای استقرار انرژی بادی باقی می‌ماند. فعالیت اصلی بخش خصوصی در استقرار نیروی بادی انعقاد قراردادهای خرید برق شرکتی[1]، امضای قراردادهای مستقیم با اپراتورهای نیروگاه بادی برای خرید برق تولیدی آن‌ها است. در سال ۲۰۲۰ مزارع بادی سهم ۲۵ درصدی از کل ظرفیت تجدیدپذیر قرارداد شده در قراردادهای خرید برق شرکتی را به خود اختصاص دادند (IEA, 2022).

جمع بندی و تحلیل

در این مطالعه دیدبانی، بینش کلی برگرفته از دو گزارش منتشرشده توسط دو سازمان معتبر بین‌المللی یعنی آژانس بین‌المللی انرژی و آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر در زمینه تولید انرژی از باد و فناوری‌ها و آینده آن به تفصیل بیان شد. این گزارش‌ها در راستای کربن‌زدایی در بخش انرژی و کاهش انتشار کربن برای جلوگیری از تغییرات اقلیمی توسط این نهادهای بین‌المللی فعال در زمینه انرژی دنبال می‌شود. در این راستا ترسیم رهنگاشت‌های فناوری انرژی و با چشم‌اندازهای گوناگون و منطبق با توافق‌نامه اقلیمی پاریس مبنای حرکت پژوهشی و مطالعاتی آن‌هاست و مقیاسی برای سنجش حرکت کشورهای مختلف در مسیر گذار انرژی است. رهنگاشت‌های منتشرشده در واقع نمایان‌گر مسیرهایی است که از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر هستند و رهیافت‌هایی را برای استقرار فناوری‌های کم‌کربن و حرکت به سمت آینده انرژی پاک و پایدار بررسی و ارائه می‌کنند.

طبق سناریوهای هر دو نهاد، انرژی بادی و خورشیدی پیشروترین بخش از تجدیدپذیرها برای دوران گذار به سمت انتشار صفر خالص خواهند بود. در این میان باد خشکی و دریایی با سهمی بیش از یک‌سوم کل نیاز برق را تولید می‌کنند و تا سال ۲۰۵۰ به منبع اصلی تولید برق تبدیل می‌شوند.

تجزیه‌وتحلیل این سناریوها نشان می‌دهد که نقش مهم نیروی باد در ترکیب انرژی در دهه‌های آینده انکارناپذیر است. بیشترین سهم باد را می‌توان در مورد سناریوی رهنگاشت تجدیدپذیر آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر مشاهده کرد که باد را به عنوان منبع اصلی فناوری تجدیدپذیر ضروری برای کربن‌زدایی

[1] Corporate Power Purchase Agreements (PPAs)

بخش برق قرار می‌دهد و تا سال ۲۰۵۰ حدود ۸۶ درصد از کل تولید برق تجدیدپذیر را از این بخش در نظر می‌گیرد (با توجه به این که تولید برق از باد در سال ۲۰۲۱ تقریبا به اندازه تمام الکتریسته‌ای است که سایر فناوری‌ها در مجموع تولید کرده‌اند). اضافه بر این، طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی همسو با سطح تولید برق بادی در سناریوی صفر خالص و طبق گزارشاتی که بر پیشرو بودن فناوری بادی در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ تاکید دارد، انتظار می‌رود که استقرار تأسیسات بادی در سال‌های آینده تثبیت شود.

علاوه بر این موارد، آسیا و عمدتا چین در مقام اول و پس از آن هند همچنان پیشتاز تأسیسات جهانی نیروگاه بادی خشکی هستند و بیش از نیمی از کل ظرفیت جهانی را تا سال ۲۰۵۰ به خود اختصاص خواهند داد. پس از آسیا، استقرار نیروگاه بادی خشکی در آمریکای شمالی (عمدتا ایالات متحده) چشمگیر خواهد بود. همچنین آفریقا یک بازار کلیدی برای استقرار سریع باد خشکی در سه دهه آینده خواهد بود.

در سال ۲۰۱۸، بیشترین ظرفیت جدید بادی دریایی در چین متمرکز شده و بیشتر رشد ظرفیت در انگلیس و آلمان بود. استقرار بادی دریایی در آمریکای شمالی و اقیانوسیه نیز گسترش خواهد یافت. با گذر زمان، تغییر چشمگیری در استقرار بادی دریایی در آب‌های آسیایی (بیشتر در چین، هند، چین تایپه، جمهوری کره، ژاپن، اندونزی، فیلیپین و ویتنام) در سه دهه آینده اتفاق خواهد افتاد و آسیا در نهایت بر تأسیسات بادی دریایی جهانی تا سال ۲۰۵۰ تسلط خواهد داشت. در واقع چین بر تأسیسات بادی دریایی تسلط خواهد داشت و در کمتر از دو دهه آینده از اروپا پیشی خواهد گرفت. اما اروپا به مدت یک دهه یا بیشتر به تسلط بر تأسیسات بادی دریایی ادامه خواهد داد. پس از آسیا و اروپا، آمریکای شمالی به ویژه ایالات متحده یکی دیگر از بازارهای نوظهور باد دریایی خواهد بود.

قابل ذکر است که جنگ روسیه و اوکراین، پیشرانی برای تسریع پیشرفت فناوری‌های تجدیدپذیر از جمله صنعت بادی در منطقه اروپا خواهد بود. ناگفته نماند که در میان تمام گزینه‌های فناوری کم‌کربن، نیروی باد به کاهش عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ کمک می‌کند. این امر عمدتا به دلیل استقرار گسترده نیروی بادی است که جایگزین منابع تولید برق متعارف می‌شود. همچنین استفاده از منابع فراوان با بهترین راه‌حل‌های فناورانه در مناطق مختلف و بهره‌مندی از کاهش شدید هزینه‌ها، برق‌رسانی قابل‌توجه و استفاده نهایی در کاربردهای حمل و نقل و گرما از دلایل دیگر این امر است.

در پایان برای مطالعه اثر پیشرفت‌های جهانی در فناوری‌های صنعت باد بر وضعیت ایران لازم است شرایط فعلی ایران در این صنعت مورد مداقه قرار گیرد. بر اساس آنچه در ادبیات جغرافیایی آمده، ایران بر روی کمربند بادی واقع شده است. با این حال، ظرفیت بادی نصب شده در ایران حدود ۳۰۰ مگاوات است که در مقایسه با ظرفیت جهانی حدود ۶۵۱ گیگاواتی تا سال ۲۰۲۱ بسیار ناچیز است. طبق پژوهش‌های علمی، در سراسر ایران، پتانسیل بسیار زیادی برای انرژی بادی از منظر فنی وجود دارد. در حالی که در حال حاضر سیاست‌های جذابی برای ایجاد انگیزه در توسعه انرژی بادی در ایران اعمال شده است، به دلیل کاهش شدید

ارزش ریال ایران بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰، نرخ خوراک[۱] برای انرژی بادی به حدود ۳ سنت در هر کیلووات ساعت کاهش یافته است. همچنین حداقل ۱۲ سنت به ازای هر کیلووات ساعت برای تقویت سرمایه‌گذاری‌های صنعت انرژی بادی ایران مورد نیاز است. با توجه به فضای مالی بسیار تنگ دولت ایران به دلیل تحریم‌ها و در نتیجه کاهش صادرات نفت، تنها ۲.۱۴ درصد از یارانه‌های بیهوده سوخت‌های فسیلی ایران برای تأمین ۱۲ سنت در هر کیلووات ساعت برای انرژی بادی کافی است، تا ۵ درصد کل تقاضای برق کشور را تامین کند (Mirnezami & Mohseni Cheraghlou, 2022). همچنین بر مبنای برخی پژوهش‌ها بسیاری از مناطق دور از مرکز در ایران پتانسیل بالایی در تولید برق بادی دارند برای مثال جزایر ایرانی واقع در خلیج فارس (مانند جزایر خارگ، سیری و ابوموسی) شرایط جذابی برای توسعه صنعت بادی دارند (Majidi Nezhad et al., 2022) که با انجام پژوهش بر روی این واقعیت لازم است مناطقی از این دست شناسایی شوند.

از طرف دیگر انباشت دانش و تخصص کارگران و تکنسین‌های ایرانی در حوزه سایت‌های نفت و گاز دریایی در کشور در طول سالیان گذشته، می‌تواند به طور بالقوه برای ساخت زیربنا و ایستگاه‌های توربین‌های بادی دریایی مورد استفاده قرار گیرد. بنابر آنچه بیان شد، پتانسیل بالایی از جهت توسعه زیرساخت و تخصص نیروی انسانی برای استقرار و گسترش انرژی بادی وجود دارد.

بنابر گزارش‌های منتشرشده توسط سازمان‌های انرژی بین‌المللی رویکرد آینده‌محور کشورهای اروپایی به بحران انرژی ناشی از جنگ میان روسیه و اوکراین که با آغوش باز نسبت به بحران انرژی پیش رو همراه بوده است، موجب می شود تا اروپا در اوج بحران تامین انرژی، زیرساختهای حوزه انرژی خود را ترمیم کرده و منابع جدید را جایگزین کند. چنین رویکردی در مدیریت منابع توسط جمهوری اسلامی ایران امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

[۱] Feed-in tariff (FIT)

منابع

IRENA, International renewable energy agency (2019). FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.

IEA, International energy agency, (2022). Wind Electricity, Technology deep dive https://www.iea.org/reports/wind-electricity

Majidi Nezhad, M., Neshat, M., Piras, G., & Astiaso Garcia, D. (2022). Sites exploring prioritisation of offshore wind energy potential and mapping for wind farms installation: Iranian islands case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168*, 1 .۱۲۷۹۱ https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112791

Mirnezami, S. R., & Mohseni Cheraghlou, A. (2022). Wind Power in Iran: Technical, Policy, and Financial Aspects for Better Energy Resource Management. *Energies, 15*(9), 3230 .

گزارش دیدبانی

انرژی باد، فناوری‌ها و آینده آن

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۱

شناسه یکتا: ETG-SMSD-1073

جمهوری اسلامی ایران
وزارت کشور

مرکز مطالعات راهبردی و آموزش وزارت کشور