

برونداد تخصصی انرژی‌های تجدیدپذیر



RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2022



HIGHLIGHTS

In 2022, the global weighted average cost of electricity from newly commissioned utility-scale solar photovoltaics (PV), onshore wind, concentrating solar power (CSP), bioenergy and geothermal all fell. This was despite rising materials and equipment costs.

China was the key driver of the global decline in costs for solar PV and onshore wind, with other markets experiencing a much more heterogeneous set of outcomes that saw cost increases in many major markets.

For newly commissioned onshore wind projects, the global weighted-average levelised cost of electricity (LCOE) fell by 5% between 2021 and 2022, from USD 0.035/kWh to USD 0.033/kWh. For utility-scale solar PV projects, the global weighted-average LCOE decreased by 3% year-on-year in 2022, to USD 0.049/kWh. For offshore wind, the cost of electricity of new projects increased by 2%, in comparison to 2021, rising from USD 0.079/kWh to USD 0.081/kWh in 2022.

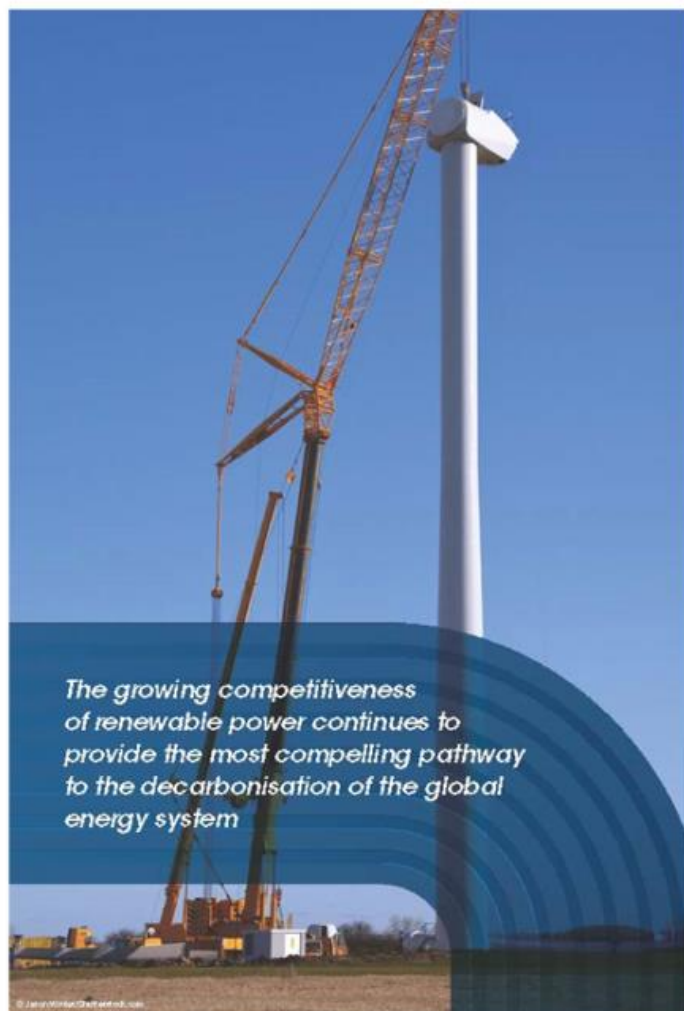
The fossil fuel price crisis of 2022 was a telling reminder of the powerful economic benefits that renewable power can provide in terms of energy security. In 2022, the renewable power deployed globally since 2000 saved an estimated USD 521 billion in fuel costs in the electricity sector.

Due to soaring fossil fuel prices, the 2021-2022 period saw one of the largest improvements in the competitiveness of renewable power in the last two decades. Looking at the trend since 2010:

- In 2010, the global weighted-average LCOE of onshore wind was 95% higher than the lowest fossil fuel-fired cost; in 2022, the global weighted-average LCOE of new onshore wind projects was 52% lower than the cheapest fossil fuel-fired solutions.
- Even this improvement was surpassed by that of solar PV, however. This renewable power source was 710% more expensive than the cheapest fossil fuel-fired solution in 2010; however, driven by a spectacular decline in costs, it cost 29% less than the cheapest fossil fuel-fired solution in 2022.

Table H.1 Total installed cost, capacity factor and LCOE trends by technology, 2010 and 2022

	Total installed costs			Capacity factor			Levelised cost of electricity		
	(2022 USD/kW)			%			(2022 USD/kWh)		
	2010	2022	Percent change	2010	2022	Percent change	2010	2022	Percent change
Bioenergy	2 904	2 162	-26%	72	72	1%	0.082	0.061	-25%
Geothermal	2 904	3 438	20%	87	83	-2%	0.053	0.056	6%
Hydropower	1 407	2 881	105%	44	46	4%	0.042	0.061	47%
Solar PV	5 124	876	-83%	14	17	23%	0.445	0.049	-89%
CSP	10 082	4 274	-58%	30	36	19%	0.380	0.118	-69%
Onshore wind	2 179	1 274	-42%	27	37	35%	0.107	0.033	-69%
Offshore wind	5 217	3 461	-34%	38	42	10%	0.197	0.081	-59%



The growing competitiveness of renewable power continues to provide the most compelling pathway to the decarbonisation of the global energy system



برونداد تخصصی

انرژی‌های تجدیدپذیر

عنوان پروژه: رصد فن‌آوری به‌منظور شناخت جدیدترین دستاوردها و فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر

ویژه نامه تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا

کارفرما: سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا)

پژوهشگر: پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه انرژی‌های تجدیدپذیر

پژوهشکده پشتیبان: پژوهشکده انرژی و محیط‌زیست

مدیر پروژه: مهندس ثریا رستمی

مجری پروژه: دکتر سید ابوالفضل موسوی ترشیزی

ناظر پژوهشگاه: دکتر محمد چمنی

ناظر کارفرما: دکتر اکبر شعبانی‌کیا

همکاران این گزارش:

مهندس ثریا رستمی - مهندس سارا جوکار

شماره ۱۶-ویژه نامه شهریورماه ۱۴۰۳

۵.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی‌های تجدیدپذیر طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۱۲.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی فتوولتائیک طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۲۷.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی CSP طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۳۸.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه‌های بادی طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۵۱.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۶۱.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه‌های زیست‌توده طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲
۷۱.....	تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی زمین‌گرمایی طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲

تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی‌های تجدیدپذیر طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی هزینه برق حاصل از نیروگاه‌های فتوولتائیک، بادی خشکی، متمرکزکننده خورشیدی^۱، زیست‌توده و زمین‌گرمایی همگی کاهش یافتند. نکته قابل توجه اینکه این امر علیرغم افزایش هزینه مواد و تجهیزات رخ داده است. کشور چین عامل اصلی کاهش جهانی در هزینه نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی می‌باشد درحالی که سایر بازارها مجموعه بسیار ناهمگون‌تری از تغییرات را تجربه کردند:

- برای پروژه‌های بادی خشکی که به‌تازگی راه‌اندازی شده‌اند، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده برق^۲ بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲، حدود ۵ درصد (از ۰.۰۳۵ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت) کاهش یافته است.
- برای پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی^۳، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال قبل ۳ درصد کاهش یافت و به ۰.۰۴۹ دلار در کیلووات ساعت رسید.
- برای نیروگاه‌های بادی دریایی، هزینه برق پروژه‌های جدید در مقایسه با سال ۲۰۲۱، ۲ درصد افزایش یافته و از ۰.۰۷۹ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۸۱ دلار در کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است.

¹ Concentrating Solar Power (CSP)

² Levelised Cost of Electricity (LCOE)

³ Utility scale

❖ نگاهی به روند قیمت‌ها از سال ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۲۲

در سال ۲۰۱۰، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی باد خشکی ۹۵ درصد بالاتر از کمترین هزینه برق تولیدی سوخت فسیلی بود اما در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی پروژه‌های جدید بادی خشکی ۵۲ درصد کمتر از ارزان‌ترین برق تولیدی سوخت فسیلی بود. فتوولتائیک خورشیدی در سال ۲۰۱۰ نیز ۷۱۰ درصد گران‌تر از ارزان‌ترین برق تولیدی فسیلی بود. درحالی‌که، به دلیل کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها، در سال ۲۰۲۲ هزینه آن ۲۹ درصد کمتر از ارزان‌ترین برق تولیدی فسیلی شده است. در ادامه جدول زیر پارامترهای هزینه‌ای نیروگاه‌ها را به تفکیک نشان می‌دهد.

مجموع هزینه احداث، ضریب ظرفیت و روند هزینه تراز شده انرژی بر اساس فناوری، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

	Total installed costs			Capacity factor			Levelised cost of electricity		
	(2022 USD/kW)			(%)			(2022 USD/kWh)		
	2010	2022	Percent change	2010	2022	Percent change	2010	2022	Percent change
Bioenergy	2 904	2 162	-26%	72	72	1%	0.082	0.061	-25%
Geothermal	2 904	3 478	20%	87	85	-2%	0.053	0.056	6%
Hydropower	1 407	2 881	105%	44	46	4%	0.042	0.061	47%
Solar PV	5 124	876	-83%	14	17	23%	0.445	0.049	-89%
CSP	10 082	4 274	-58%	30	36	19%	0.380	0.118	-69%
Onshore wind	2 179	1 274	-42%	27	37	35%	0.107	0.033	-69%
Offshore wind	5 217	3 461	-34%	38	42	10%	0.197	0.081	-59%

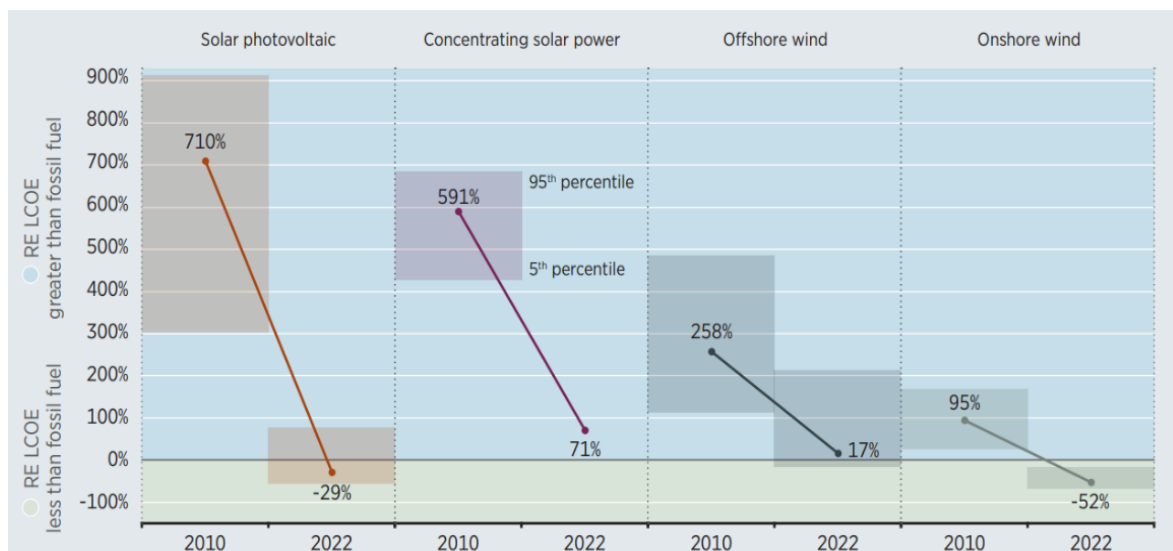
بنابراین، علیرغم وجود تورم برخی هزینه‌ها، رقابت‌پذیری انرژی تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۲ به طرز چشم‌گیری بهبود یافته است. پس از دهه‌ها کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد در فناوری‌های خورشیدی و بادی، مزایای اقتصادی تولید برق تجدیدپذیر، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی آن، اکنون قابل قبول است. درواقع، به دلیل افزایش شدید قیمت سوخت‌های فسیلی، دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ شاهد یکی از بزرگ‌ترین پیشرفت‌ها در رقابت‌پذیری انرژی‌های تجدیدپذیر در دو دهه گذشته بوده است. درحالی‌که اکثر بازارها، به‌استثنای چین، شاهد افزایش قیمت تجهیزات برای ماژول‌های فتوولتائیک خورشیدی و توربین‌های بادی بوده‌اند؛ در سال ۲۰۲۱، از ۲۰ کشوری که ایرینا^۴ داده‌های دقیقی برای آن‌ها دارد، ۹ کشور شاهد رقابت‌پذیری^۵ فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی^۶ خود بودند که هزینه تراز شده برق برای آن‌ها بیش از میانگین وزنی جهانی آن سال بهبود داشته است. در سال ۲۰۲۲، هشت کشور شاهد این پیشرفت بودند.

^۴ IRENA

^۵ ایرنا معیار رقابت‌پذیری ۲۰ کشور را محاسبه کرده است. این معیار بر اساس میانگین وزنی هزینه سوخت‌های فسیلی جدید است که از داده‌های هزینه سرمایه (capital cost data) در پروژه‌ها و قیمت‌های (country-specific fossil gas and coal fuel marker prices) برای تولید برق محاسبه می‌شود. متریک رقابت‌پذیری، میانگین وزنی هزینه برق تراز شده سوخت فسیلی (LCOE) را از LCOE انرژی تجدیدپذیر کم می‌کند، بنابراین مقادیر منفی نشان‌دهنده LCOE انرژی تجدیدپذیر کمتر از سوخت‌های فسیلی است.

^۶ Utility Scale

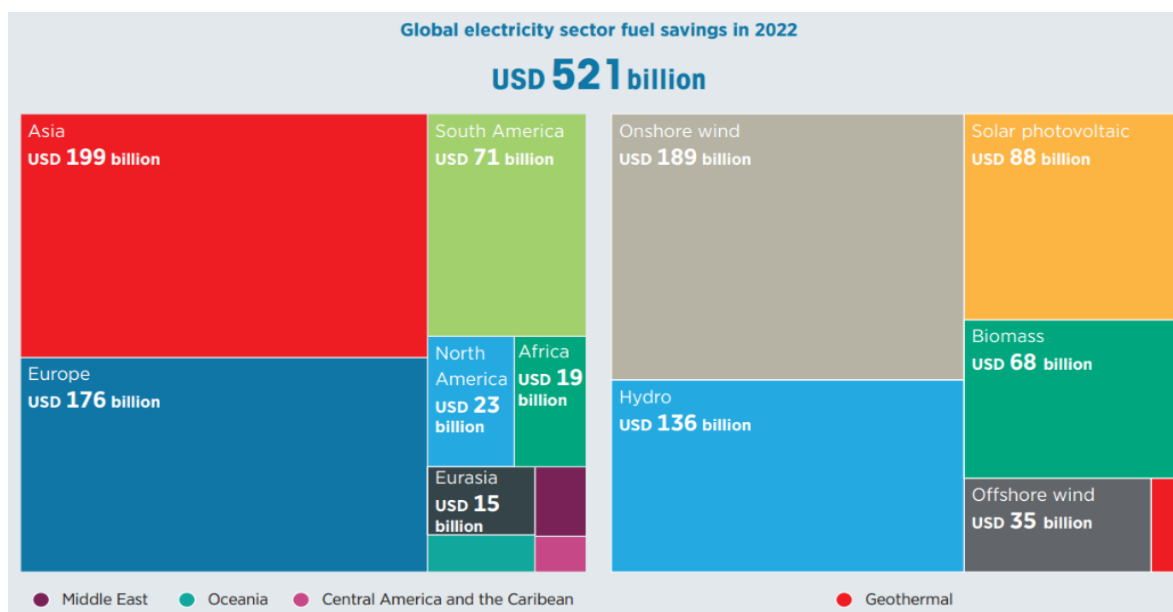
- برای انرژی باد خشکی، وضعیت قابل توجه‌تر بود. در دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۲، از ۲۰ کشوری که برای باد خشکی مورد بررسی قرار گرفتند، ۱۵ کشور بیشترین پیشرفت مطلق خود را در رقابت‌پذیری تجربه کردند. در سال ۲۰۱۰، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی باد خشکی ۰.۱۰۷ دلار در هر کیلووات ساعت بود. این میزان ۹۵ درصد بیشتر از کمترین هزینه برق تولیدی سوخت فسیلی ۰.۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت بود. تا سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی پروژه‌های بادی خشکی جدید ۰.۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت بود که ۵۲ درصد کمتر از ارزان‌ترین گزینه برق تولیدی سوخت فسیلی بود که به ۰.۰۶۹ دلار در کیلووات ساعت افزایش یافته بود. به طور خلاصه می‌توان گفت، برای پروژه‌های بادی خشکی، بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، هزینه متوسط وزنی جهانی برق ۶۹ درصد کاهش یافت و از ۰.۱۰۷ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت رسید. کاهش هزینه برای پروژه‌های باد خشکی به دلیل دو عامل کلیدی رخ داد: کاهش هزینه توربین بادی و افزایش ضریب ظرفیت ناشی از پیشرفت‌های فناوری توربین. قیمت توربین‌های بادی در خارج از چین بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ بین ۳۹ تا ۵۵ درصد کاهش یافت و این کاهش در چین تقریباً دوسوم (۶۴ درصد) بود. ضریب ظرفیت میانگین وزنی جهانی برای پروژه‌های تازه راه‌اندازی شده از ۲۷ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۳۹ درصد برای پروژه‌هایی که در سال ۲۰۲۱ راه‌اندازی شده بودند، افزایش یافت. این میانگین وزنی جهانی پس از آن در سال ۲۰۲۲ به ۳۷ درصد کاهش یافت، زیرا سهم احداث جدید توسط چین افزایش یافت که به دلیل مکان‌های ضعیف‌تر منابع بادی این کشور بود.
 - در همان دوره (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲)، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی باد فراساحلی از ۲۵۸ درصد گران‌تر از ارزان‌ترین گزینه برق تولیدی سوخت فسیلی، به ۱۷ درصد گران‌تر تبدیل شد؛ زیرا هزینه از ۰.۱۹۷ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۸۱ دلار در کیلووات ساعت کاهش یافت.
 - انرژی متمرکز خورشیدی (CSP) شاهد کاهش میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی از ۵۹۱ درصد بالاتر از ارزان‌ترین گزینه برق تولیدی سوخت فسیلی در سال ۲۰۱۰ به ۷۱ درصد در سال ۲۰۲۲ بود.
 - فتوولتائیک خورشیدی، این منبع انرژی تجدیدپذیر دارای میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی ۰.۴۴۵ دلار در کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ بود که ۷۱۰ درصد گران‌تر از ارزان‌ترین گزینه برق تولیدی سوخت فسیلی است. تا سال ۲۰۲۲، با کاهش چشمگیر هزینه‌ها (۰.۰۴۹ دلار در کیلووات ساعت) میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی فتوولتائیک خورشیدی ۲۹ درصد کمتر از ارزان‌ترین گزینه برق تولیدی سوخت فسیلی شد.
- درواقع، با افزایش هزینه‌های تولید برق با سوخت فسیلی در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۲، عمدتاً به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، حدود ۸۶ درصد معادل ۱۸۷ گیگاوات پروژه‌های تولید برق تجدیدپذیر در مقیاس کاربردی که در سال ۲۰۲۲ راه‌اندازی شده‌اند، هزینه‌های برق کمتر از میانگین وزنی هزینه برق تولیدی سوخت فسیلی بر اساس کشور یا منطقه در پی داشتند. این رقم ۸ درصد بیشتر از ۱۷۴ گیگاوات برآورد شده برای سال ۲۰۲۱ است. به‌طور کلی، بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، ۱۱۲۰ گیگاوات تولید برق تجدیدپذیر با هزینه تراز شده انرژی کمتر از میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی سوخت فسیلی براساس کشور/منطقه احداث شد.



تغییر در رقابت‌پذیری انرژی خورشیدی و بادی به تفکیک کشورها بر اساس میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ برق تجدیدپذیر مزایای امنیت انرژی را فراهم می‌کند.

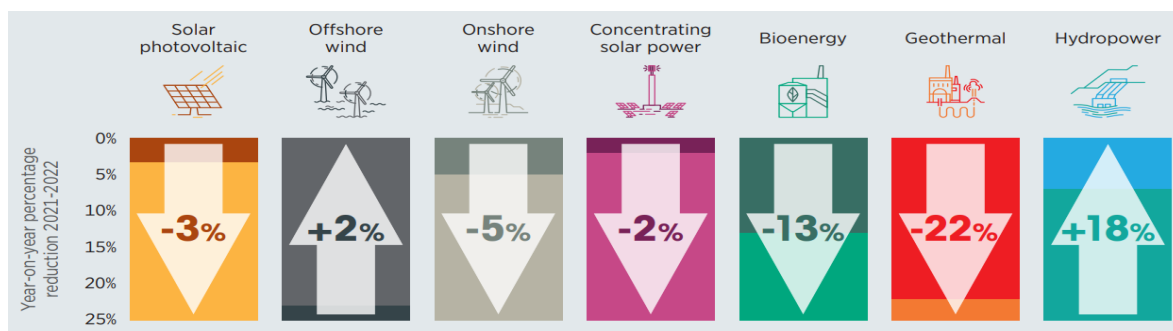
بحران قیمت سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۲۲ یادآور مزایای اقتصادی قدرتمندی بود که انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند از نظر امنیت انرژی فراهم کنند. در واقع، در این سال، مزایای امنیت انرژی در انرژی‌های تجدیدپذیر به طور گسترده «کشف مجدد» شد. در سال ۲۰۲۲، انرژی تجدیدپذیر که از سال ۲۰۰۰ در سطح جهان به کار گرفته شدند، حدود ۵۲۱ میلیارد دلار در هزینه سوخت، تنها در بخش برق صرفه‌جویی کرد. این رقم در اروپا ۱۷۶ میلیارد دلار بود. علاوه بر این، این امکان وجود دارد که ساخت انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۱۰ احتمالاً قاره اروپا را از یک بحران اقتصادی تمام‌عیار نجات دهد، زیرا در غیاب تولید برق تجدیدپذیر، هزینه‌های مستقیم اقتصادی ناشی از افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی بسیار بالاتر بود.



صرفه‌جویی در هزینه سوخت فسیلی جهانی در بخش برق در سال ۲۰۲۲ ناشی از انرژی تجدیدپذیر افزوده شده نسبت به سال ۲۰۰۰

❖ تغییرات قیمتی سال ۲۰۲۲ نسبت به ۲۰۲۱

- در خصوص نیروگاه‌های بادی در خشکی در سال ۲۰۲۲، چین بار دیگر بزرگ‌ترین بازار برای افزایش ظرفیت جدید را از آن خود کرد و سهم آن از احداث جدید جهانی از ۴۱ درصد به ۵۰ درصد بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ افزایش یافت. اگر چین حذف می‌شد، منحنی میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی برای باد خشکی برای این دوره ثابت می‌ماند.



هزینه تراز شده انرژی جهانی از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر جدید در مقیاس کاربردی، ۲۰۲۱-۲۰۲۲

- برای پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی جدید در مقیاس کاربردی، از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی ۳ درصد کاهش یافت و به ۰.۰۴۹ دلار در کیلووات ساعت رسید. این امر ناشی از کاهش ۴ درصدی میانگین وزنی جهانی هزینه احداث برای این فناوری است. این میزان از ۹۱۷ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۱ به ۸۷۶ دلار در کیلووات برای پروژه‌های راه‌اندازی شده در سال ۲۰۲۲ کاهش یافت. به‌طور کلی، تجربه فتوولتائیک خورشیدی در سال ۲۰۲۲ ترکیبی بود و بازارهای مختلف در جهات مختلف حرکت کردند. تجربه کاهش هزینه تراز شده انرژی در سال ۲۰۲۲ کمتر از ۱۳ درصد نسبت به سال ۲۰۲۱ بود، زیرا ۱۱ بازار از ۲۰ بازار برتر فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی که ایرنا اطلاعات دقیقی برای آن‌ها دارد، مجموع هزینه احداث خود را به‌صورت واقعی افزایش دادند. برخی از این افزایش‌ها قابل‌توجه بودند: برای مثال در فرانسه و آلمان ۳۴ درصد افزایش رخ داد، درحالی‌که یونان شاهد افزایش هزینه‌های تخمینی ۵۱ درصدی بود که ناشی از افزایش قیمت‌های مازول فتوولتائیک و تجهیزات در پایان سال ۲۰۲۱ و تا سال ۲۰۲۲ بود. برخی از این تغییرات نشان‌دهنده تغییرات طبیعی در هزینه‌های پروژه‌های انفرادی است، اما واضح است که تورم هزینه تجهیزات و نیروی کار تأثیر قابل‌توجهی بر برخی از بازارها داشته است. طی این سال‌ها هزینه برق فتوولتائیک خورشیدی نیز کاهش یافت و این امر به این دلیل بود که چین هزینه‌های کمتری نسبت به بیشتر بازارها داشت و سهم آن از احداث فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس جهانی از ۳۸ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۴۵ درصد در سال ۲۰۲۲ رسید.
- بازار بادی فراساحلی ۸.۹ گیگاوات ظرفیت جدید در سال ۲۰۲۲ اضافه کرد. بدون در نظر گرفتن توسعه بی‌سابقه در سال ۲۰۲۱ به دلیل افزایش ۲۱ گیگاوات در چین، این رکورد بسیار مهم و قابل‌توجه بود. در واقع، در سال ۲۰۲۲، کاهش سهم چین در افزایش ظرفیت‌های جدید و راه‌اندازی پروژه‌ها در بازارهای جدید، باعث شد میانگین وزنی جهانی هزینه برق پروژه‌های جدید در مقایسه با سال ۲۰۲۱، ۲ درصد افزایش یابد و از ۰.۰۷۹ دلار در

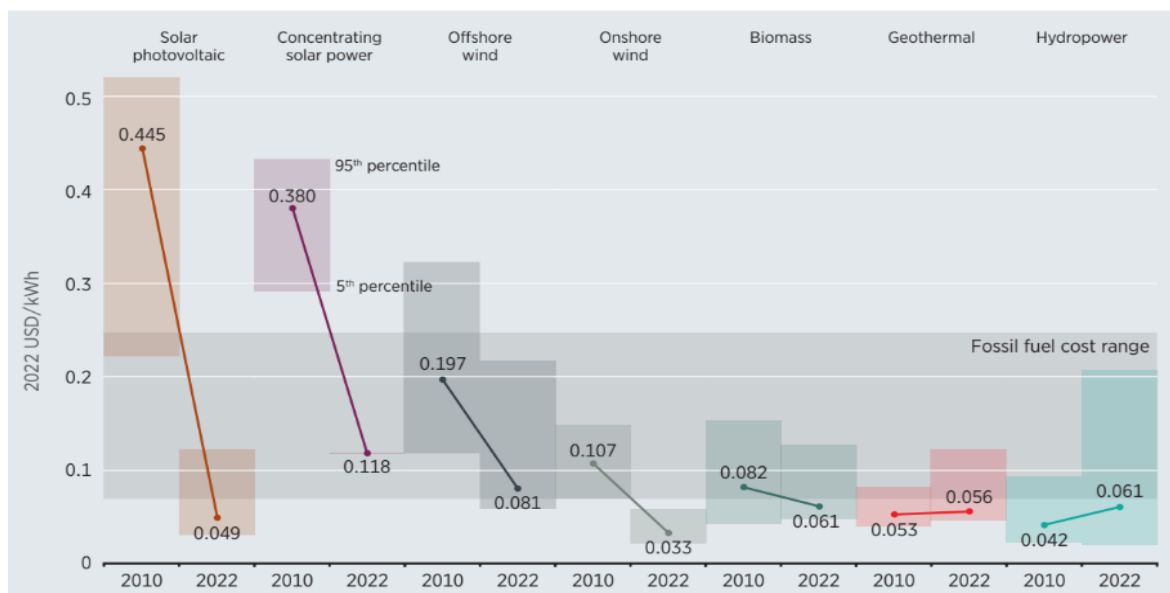
- کیلووات ساعت به ۰.۰۸۱ دلار در کیلووات ساعت برسد. افزایش میانگین وزنی جهانی هزینه‌های احداث (از ۳۰۵۲ دلار به ازای هر کیلووات در سال ۲۰۲۱ به ۳۴۶۱ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۲) تا حدی با افزایش ضرایب ظرفیت پروژه‌های تازه راه‌اندازی شده از ۳۹ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۴۲ درصد در سال ۲۰۲۲ جبران شد.
- برای انرژی زیست‌توده تازه راه‌اندازی شده در پروژه‌های برق، میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی جهانی بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ به میزان ۱۳ درصد کاهش یافت و از ۰.۰۷۱ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت رسید. این اتفاق زمانی رخ داد که سهم پروژه‌های جدید و کم‌هزینه راه‌اندازی شده در چین و برزیل در سال ۲۰۲۲ افزایش یافت.
- برای پروژه‌های انرژی زمین‌گرمایی، بین سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی جهانی از ده پروژه راه‌اندازی شده، ۲۲ درصد کاهش یافت و به ۰.۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت رسید.
- پروژه‌های برق‌آبی که به‌تازگی راه‌اندازی شده‌اند، شاهد افزایش ۱۸ درصدی میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی بین سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ بوده‌اند. این میزان از ۰.۰۵۲ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت رسید. در سال ۲۰۲۲، تعدادی از پروژه‌هایی که با تأخیرهای قابل‌توجهی مواجه بودند و هزینه‌های بیش‌ازحدی متحمل شده بودند، به طور جزئی یا کامل به بهره‌برداری رسیدند. در نتیجه، میانگین وزنی جهانی هزینه احداث پروژه‌های نیروگاه برق‌آبی جدید از ۲۲۹۹ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۱ به ۲۸۸۱ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۲ افزایش یافت که معادل افزایش ۲۵ درصدی است.

❖ کاهش قیمت قابل‌توجه انرژی خورشیدی و بادی بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

- تجربه دو سال گذشته، درک سهامداران را از انتظارات قیمت در بازارهای سوخت فسیلی تغییر داده است، درحالی‌که آسیب‌پذیری کشورهای وابسته به سوخت‌های فسیلی برای تولید برق را نیز نشان می‌دهد. با این حال، حتی قبل از بحران قیمت سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۲۲، انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از سوخت‌های فسیلی رقابت‌پذیر بودند.
- در سال ۲۰۱۰، چین و اروپا شاهد پروژه‌های باد دریایی تازه راه‌اندازی شده با میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی به ترتیب ۰.۱۸۹ دلار در کیلووات ساعت و ۰.۱۹۸ دلار در کیلووات ساعت بودند. در سال ۲۰۲۱، پروژه‌های اروپایی تازه راه‌اندازی شده دارای میانگین وزنی ۰.۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت بودند که کمتر از هزینه ۰.۰۸۳ دلار در کیلووات ساعت در چین در آن سال بود. در سال ۲۰۲۲، با تکمیل طیف وسیعی از پروژه‌های گران‌تر، از جمله در بازارهای جدید، میانگین وزنی هزینه تراز شده انرژی در اروپا به ۰.۰۷۴ دلار در کیلووات ساعت افزایش یافت. با این حال، هزینه تراز شده انرژی اروپا همچنان حدود ۴ درصد کمتر از پروژه‌های چینی تکمیل‌شده در سال ۲۰۲۲ (با میانگین وزنی ۰.۰۷۷ دلار در کیلووات ساعت) بود.
 - احداث CSP همچنان ناامیدکننده است، زیرا کمتر از ۰.۱ گیگاوات در سال ۲۰۲۲ اضافه شد و ظرفیت تجمعی جهانی در پایان سال ۲۰۲۲ به ۶.۵ گیگاوات رسید. برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، هزینه میانگین وزنی جهانی پروژه‌های CSP تازه راه‌اندازی شده از ۰.۳۸ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۱۱۸ دلار در کیلووات ساعت کاهش یافت (کاهش ۶۹ درصدی). علیرغم نوسانات سالانه، هزینه تراز شده انرژی متمرکز خورشیدی بین سال‌های

۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ به سرعت کاهش یافته است. از سال ۲۰۲۰، با راه‌اندازی پروژه‌هایی که یا به تعویق افتادند یا شامل طرح‌های جدید بودند، میانگین وزنی جهانی هزینه برق ناشی از این فناوری ثابت مانده است. CSP با توجه به کاهش هزینه‌های قابل توجهی که تنها با ۶.۵ گیگاوات احداث تجمعی مدیریت کرده است، از حمایت سیاستی اضافی بهره‌مند خواهد شد.

- انرژی زیست‌توده برای پروژه‌های نیروگاهی در طول دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰ در میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی خود شاهد نوسانات مشخصی بود. در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی زیست‌توده ۰.۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت، ۱۳ درصد کمتر از مقدار سال ۲۰۲۱ و یک‌چهارم کمتر از مقدار سال ۲۰۱۰ (۰.۰۸۲ دلار در کیلووات ساعت) بود.
- برای پروژه‌های زمین‌گرمایی، میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲، ۲۲ درصد کاهش یافت و به ۰.۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت رسید. این میزان ۶ درصد بیشتر از سال ۲۰۱۰، اما در محدوده ۰.۰۵۳ دلار در کیلووات ساعت تا ۰.۰۹۱ دلار در کیلووات ساعت بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ مشاهده شد.
- پروژه‌های نیروگاه برق‌آبی تازه راه‌اندازی شده، بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، شاهد ۴۷ درصد افزایش میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده انرژی بوده و از ۰.۰۴۲ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت رسیده‌اند. با وجود اینکه میانگین وزنی هزینه‌های جهانی در آن سال ۱۸ درصد افزایش یافته بود، همچنان از ارزان‌ترین گزینه برق با سوخت فسیلی در سال ۲۰۲۲ کمتر بود. افزایش در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۱ ناشی از راه‌اندازی تعدادی از پروژه‌ها (به‌ویژه در کانادا) بود که هزینه‌های بسیار قابل توجهی داشتند.



هزینه تراز شده انرژی جهانی از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر تازه راه‌اندازی شده در مقیاس کاربردی، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲

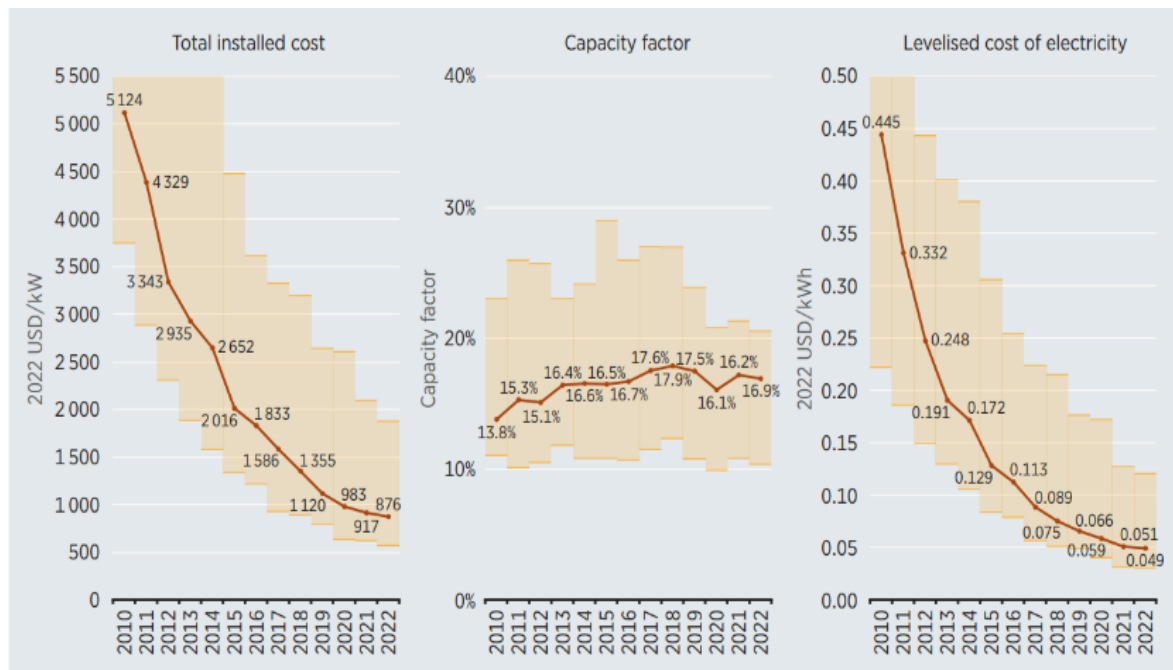
منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی فتوولتائیک طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



تا پایان سال ۲۰۲۲، بیش از ۱۰۴۷ گیگاوات سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در سطح جهانی نصب شده است. این میزان نشان‌دهنده رشد تقریباً ۲۶ برابری این فناوری از سال ۲۰۱۰ است. تنها در سال ۲۰۲۲، سیستم‌های جدید با مجموع ظرفیت حدود ۱۹۱ گیگاوات به بهره‌برداری رسیدند که این مقدار ۳۶ درصد بیشتر از سال ۲۰۲۱ و نشان‌دهنده بیشترین افزایش سالانه در ظرفیت نصب‌شده از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ است. این افزایش ظرفیت جدید، بالاترین میزان در میان تمام فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در آن سال بود و این وضعیت از سال ۲۰۱۶ برای فتوولتائیک خورشیدی برقرار است.

از سال ۲۰۱۳، آسیا در نصب فتوولتائیک‌های خورشیدی پیشرو بوده است. با ادامه این روند، آسیا حدود ۵۹ درصد از تمامی نصب‌های جدید جهان را به خود اختصاص داد. سهم آسیا از نصب‌های جدید در سال ۲۰۲۱ حدود ۵۳ درصد و در سال ۲۰۲۰ حدود ۶۰ درصد بوده است. در سال ۲۰۲۲، چین نقش عمده‌ای در رشد این منطقه داشت و حدود ۷۷ درصد از تمامی نصب‌های جدید آسیایی (و حدود ۴۵ درصد از نصب‌های جهانی) را به خود اختصاص داد. در مجموع، آسیا در سال ۲۰۲۲ به میزان ۱۱۲ گیگاوات رشد داشت (در مقایسه با ۷۵ گیگاوات در سال ۲۰۲۱) و افزایش ظرفیت عمده‌ای در چین (۸۶ گیگاوات) و هند (۱۳.۵ گیگاوات) صورت گرفت. ژاپن نیز ۴۶ گیگاوات به ظرفیت خود افزود که کمی بیشتر از سال ۲۰۲۱ بود. بازارهای قدیمی خارج از آسیا نیز به رشد خود ادامه دادند و به مقیاس بزرگ‌تری دست یافتند. ایالات متحده در سال ۲۰۲۲ حدود ۱۷.۶ گیگاوات، برزیل ۹.۹ گیگاوات و هلند و آلمان به ترتیب ۷.۷ و ۷.۲ گیگاوات ظرفیت خورشیدی اضافه کردند.



میانگین جهانی وزنی هزینه‌های کل نصب، فاکتور ظرفیت و هزینه تراز شده تولید برق فتوولتائیک در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ هزینه‌های احداث

روند کاهش هزینه‌های ماژول‌های فتوولتائیک خورشیدی از عوامل مهم بهبود رقابت‌پذیری این فناوری بوده است و این فناوری بالاترین نرخ یادگیری^۷ را در میان تمامی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر نشان داده است. از دسامبر ۲۰۰۹ تا دسامبر ۲۰۲۲، قیمت ماژول‌های سیلیکونی کریستالی در اروپا بسته به نوع ماژول، بین ۸۸ تا ۹۴ درصد کاهش یافته و میانگین وزنی کاهش هزینه در این بازه زمانی حدود ۹۱ درصد بوده است. در دسامبر ۲۰۲۲، ماژول‌های معمولی^۸ به قیمت ۰.۳۳ دلار به ازای هر وات فروخته می‌شدند. با این حال، طیف گسترده‌ای از هزینه‌ها بسته به نوع فناوری ماژول متفاوت است. هزینه‌ها از ۰.۲۲ دلار به ازای هر وات برای ماژول‌های با هزینه کمتر تا ۰.۴۴ دلار به ازای هر وات برای ماژول‌های با بازده بالا متغیر بوده‌اند که حد پایین این محدوده هزینه ۲ درصد بیشتر از دسامبر ۲۰۲۱ و حد بالا ۸ درصد کمتر از دسامبر ۲۰۲۱ بود.

ماژول‌های فیلم نازک^۹ که در سال ۲۰۲۲ حدود ۵ درصد از بازار را به خود اختصاص دادند، در دسامبر ۲۰۲۲ با قیمت ۰.۲۳ دلار به ازای هر وات فروخته شدند. هزینه ماژول‌های کریستالی دوجبهی^{۱۰} نیز در همین مدت ۵ درصد افزایش یافت. فروش ماژول‌های کریستالی دوجبهی در دسامبر ۲۰۲۰، ۳۹ درصد بیشتر از ماژول‌های تک‌وجهی معمولی بود. این اختلاف هزینه در دسامبر ۲۰۲۱ بدون تغییر باقی ماند اما در دسامبر ۲۰۲۲ به ۲۳ درصد کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که هزینه‌های ماژول دوجبهی بیشتر تحت تأثیر نوع معماری سلول‌های استفاده‌شده برای

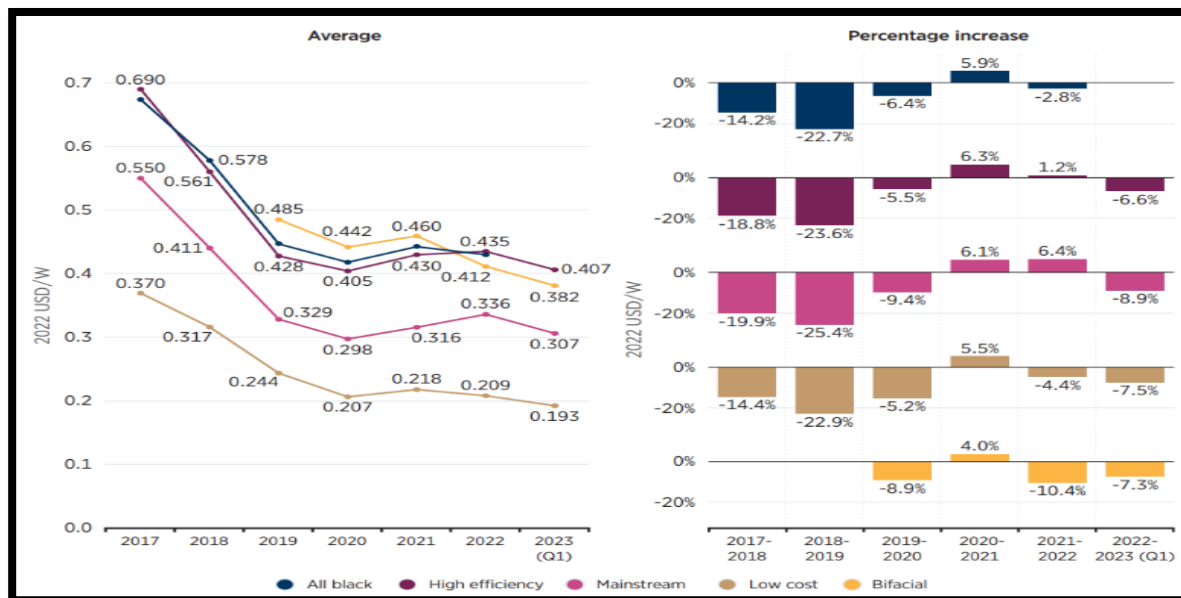
⁷ Learning rates

⁸ Mainstream modules

⁹ Thin film modules

¹⁰ Crystalline bifacial modules

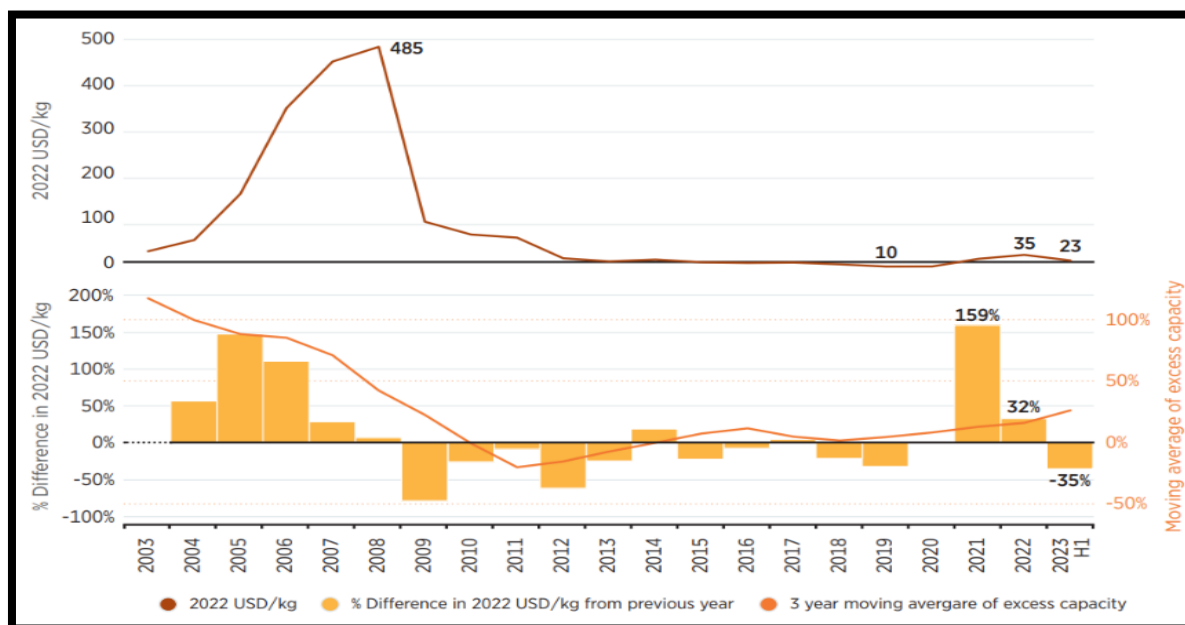
ساخت آن‌هاست (تا طراحی دوجهی خود آن). به دلیل کاهش فاصله هزینه و پتانسیل بازده بیشتر به ازای هر وات در مقایسه با فناوری‌های تک‌وجهی، ماژول‌های دوجهی به رشد سهم خود در بازار ادامه می‌دهند. در سال ۲۰۱۹، سهم بازار این ماژول‌ها حدود ۸ درصد بود که در سال ۲۰۲۰ به حدود ۲۷ درصد، در سال ۲۰۲۱ به ۲۸ درصد و در سال ۲۰۲۲ به ۳۰ درصد رسید.



میانگین قیمت سالانه ماژول‌های خورشیدی فتوولتائیک بر اساس فناوری فروخته‌شده در اروپا، ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ و سه‌ماهه اول ۲۰۲۲؛ میانگین (سمت چپ) و درصد افزایش (سمت راست)

پس از یک دهه کاهش مداوم، قیمت ماژول‌های خورشیدی فتوولتائیک در سال ۲۰۲۱ به دلیل اختلالات زنجیره تأمین و افزایش هزینه‌های مواد اولیه یا کاهش دسترسی، افزایش یافت. در اروپا، قیمت ماژول‌های کریستالی بین ۴ تا ۷ درصد افزایش داشته و از ۰.۲۰ تا ۰.۴۴ دلار به ازای هر وات به ۰.۲۲ تا ۰.۴۶ دلار به ازای هر وات رسیده است. در سال ۲۰۲۲ این روند شروع به معکوس شدن کرد، اما قیمت ماژول‌های معمولی که ۵۵ درصد بازار را تشکیل می‌دادند، افزایش مشابهی داشت و به ۰.۳۴ دلار به ازای هر وات رسید. داده‌های اولیه سه‌ماهه اول ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که این قیمت به ۰.۳۱ دلار رسیده است، که شبیه به دوران پیش از اختلالات زنجیره تأمین است. دلایل افزایش قیمت که از سال ۲۰۲۱ آغاز شده، متعدد است، اما عامل اصلی افزایش قیمت، افزایش قیمت پلی‌سیلیکون بوده است. ظرفیت محدود پلی‌سیلیکون در چین باعث شد که قیمت آن از حدود ۱۲ دلار به ازای هر کیلوگرم در ابتدای ۲۰۲۱ به بیش از ۳۳ دلار در پایان همان سال برسد. با این حال، با گسترش ظرفیت تولید و بهبود فناوری‌های تولید، قیمت پلی‌سیلیکون در سال ۲۰۲۲ تثبیت شده و در نیمه اول ۲۰۲۳ به ۲۳ دلار به ازای هر کیلوگرم کاهش یافته است، که نشان‌دهنده بازگشت به یک روند نزولی پایدار است.

با بهبود کارایی، بهینه‌سازی فرایندهای تولید و نوآوری در طراحی، پیش‌بینی می‌شود که رقابت‌پذیری فناوری فتوولتائیک خورشیدی در بلندمدت افزایش یابد و این عوامل بتوانند افزایش موقتی هزینه‌ها در سال‌های اخیر را جبران کنند. مثال‌هایی از این روند شامل پذیرش بیشتر فناوری‌های دوجهی با سلول‌های کارآمدتر است.



قیمت پلی سیلیکون به ازای هر کیلوگرم، درصد تغییر سالانه و میانگین تحرک سه ساله ظرفیت تولید مازاد پلی سیلیکون، ۲۰۰۳- نیمه اول ۲۰۲۳

کارایی متوسط ماژول‌های کریستالی از ۱۴.۷ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۲۰.۹ درصد در ۲۰۲۱ افزایش یافته و در ۲۰۲۲ به ۲۱.۱ درصد رسیده است. این افزایش عمدتاً به دلیل گذار بازار از محصولات چند کریستالی به محصولات تک کریستالی و استفاده از معماری پرک^{۱۱} بوده است. انتظار می‌رود کارایی ماژول‌های پرک به حدود ۲۲ درصد برسد و به حد نهایی (ایده‌آل) خود نزدیک شود. فناوری‌های جدیدتر مانند هیتروجانکشن^{۱۲} و تاپ‌کان^{۱۳} برای کاهش تلفات تماس یا «IBC»^{۱۴} برای کاهش سایه‌اندازی در قسمت جلویی سلول‌ها می‌توانند کارایی را بیشتر افزایش دهند. در سطح طراحی ماژول، فناوری‌هایی مانند سلول‌های نیم‌سلول (هف سل)^{۱۵}، باس‌بارهای چندگانه^{۱۶}، و پک سلولی با چگالی بالا^{۱۷} (مثل شینگلینگ^{۱۸}) باعث افزایش توان خروجی ماژول‌ها شده‌اند و انتظار می‌رود استفاده از این فناوری‌ها در آینده بیشتر شود. طراحی‌های ماژول جدید به سمت استفاده از قالب‌های بزرگ‌تر ویفر (۱۸۲ تا ۲۱۰ میلی‌متر) حرکت کرده‌اند، که باعث رشد چشمگیر توان خروجی ماژول‌ها شده است. برای مثال، در سال ۲۰۱۷ توان خروجی ماژول‌های برتر ۳۵۰ وات بود، درحالی‌که اکنون ۵۰۰ وات استاندارد جدید است و ماژول‌هایی با خروجی بالای ۶۰۰ وات نیز در بازار موجود هستند. با این حال، با تنوع طراحی‌های ماژول، «کارایی ماژول» همچنان مهم‌ترین معیار عملکرد باقی مانده است. توسعه سریع طراحی‌ها و فناوری‌های جدید نشان‌دهنده تمرکز صنعت بر به حداکثر رساندن توان خروجی و بهبود رقابت‌پذیری کلی است.

¹¹ Passivated Emitter and Rear Contact (PERC)

¹² Heterojunction (HJT)

¹³ Tunnel oxide passivated contact (TOPCon)

¹⁴ Interdigitated back contact (IBC)

¹⁵ Half-cut cells

¹⁶ Multi-busbars

¹⁷ High-density cell packing pathways

¹⁸ Shingling

با رشد بازار جهانی فتوولتائیک خورشیدی، پایداری مواد استفاده‌شده در ماژول‌های فتوولتائیک خورشیدی اهمیت بیشتری پیدا کرده است. صنعت در حال تمرکز بر کاهش مصرف پلی‌سیلیکون و نقره است که تحت تأثیر محدودیت‌های زنجیره تأمین در سال ۲۰۲۱ قرار گرفته است. فناوری‌های بهبودیافته برش ویفر مانند برش سیم الماس^{۱۹}، به‌طور قابل توجهی اتلاف پلی‌سیلیکون را کاهش داده‌اند. همچنین، استفاده از نقره در متالیزاسیون سلول‌ها کاهش یافته است و با پیشرفت در طراحی‌های باسبار چندگانه و باسبارهای نازک‌تر، این کاهش بیشتر شده است. درحالی‌که از مس به‌عنوان جایگزین نقره استفاده می‌شود، چالش‌های فنی همچنان باقی‌مانده‌اند. علاوه بر این، پذیرش فناوری سلول‌های دووجهی که امکان ورود نور از جلو و پشت سلول را فراهم می‌کند، باعث افزایش رقابت‌پذیری فتوولتائیک خورشیدی شده است زیرا بازدهی انرژی بالاتری را ارائه می‌دهد.

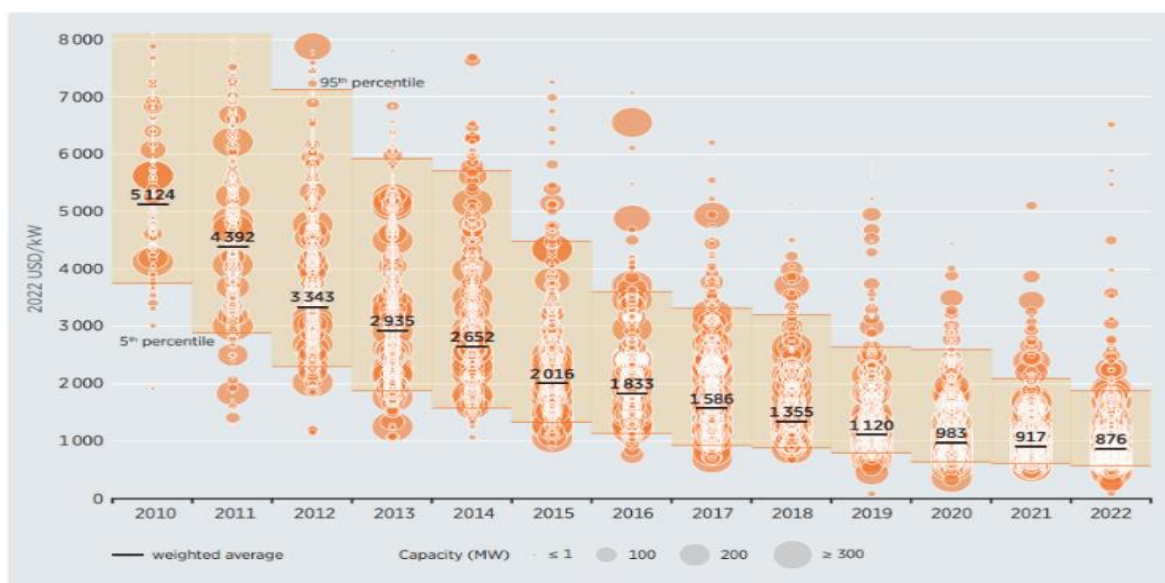
دوطرفه بودن ماژول‌های خورشیدی به ساختار سلول و ماژول بستگی دارد، اما افزایش انرژی ماژول‌های دووجهی نسبت به ماژول‌های تک‌وجهی تحت تأثیر عوامل خارجی مانند نوع نصب، مکان، جهت‌گیری ماژول، زاویه شیب، بازتابندگی زمین (آلبدو)، ارتفاع ماژول و تابش پراکنده است. این عوامل بر نحوه رسیدن نور به پشت ماژول تأثیر می‌گذارند. ماژول‌های دووجهی به‌طور فزاینده‌ای در نیروگاه‌های با مقیاس کاربردی با ردیاب تک‌محوری استفاده می‌شوند. در سال ۲۰۲۲، ماژول‌های دووجهی ۳۰ درصد از بازار را در اختیار داشتند.

در سال ۲۰۲۲، میانگین جهانی هزینه احداث پروژه‌های خورشیدی با مقیاس کاربردی^{۲۰} به ۸۷۶ دلار در هر کیلووات رسیده است که نشان‌دهنده کاهش ۴ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۱ و کاهش ۸۳ درصدی از سال ۲۰۱۰ بوده است. محدوده هزینه پروژه‌ها به‌طور قابل توجهی متفاوت بوده است، به‌طوری‌که صدک پنجم به ۵۶۹ دلار در هر کیلووات و صدک ۹۵ به ۱۸۷۸ دلار در هر کیلووات رسیده است، که هر دو کاهش‌های چشمگیری را نشان می‌دهند. بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، کشورهایمانند آلمان و هند کاهش هزینه‌هایی به ترتیب ۷۶ درصد و ۸۹ درصد را تجربه کرده‌اند. به‌ویژه در شیلی و ترکیه در سال ۲۰۲۲ کاهش‌های قابل توجهی در هزینه‌ها رخ داده است که این امر به دلیل رشد قوی بازار و عبور از ۱ گیگاوات در ظرفیت‌های جدید برای دومین سال متوالی بوده است.

بااین‌حال، برخی کشورها مانند مکزیک، ژاپن و چین در سال ۲۰۲۲ افزایش‌های متوسطی در هزینه‌های احداث را تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که هلند با رشد ۱۲ درصدی مواجه شده است زیرا بازار خورشیدی این کشور در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال قبل دو برابر شده است. اختلالات در زنجیره تأمین در سال ۲۰۲۱ روند کاهش هزینه‌ها را کند کرده است، که این امر به افزایش هزینه‌ها در برخی بازارها در سال ۲۰۲۲ منجر شده است و این افزایش‌ها از ۲ درصد تا ۳۴ درصد متغیر بوده‌اند. با وجود این چالش‌ها، چندین بازار همچنان کاهش هزینه‌ها را تجربه کرده‌اند و در شش بازار از ۱۵ بازار بررسی شده، کاهش‌هایی بین ۴ درصد تا ۲۲ درصد مشاهده شده است. هزینه‌ها در انگلستان به‌طور سالانه ثابت مانده است.

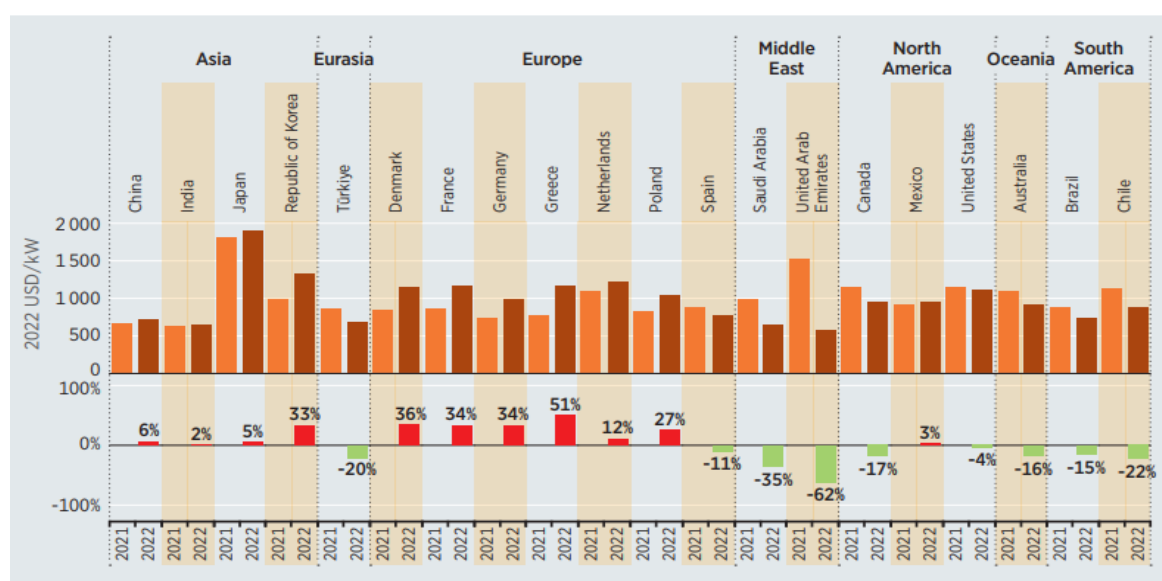
¹⁹ Diamond Wire Sawing (DWS)

²⁰ Utility-scale

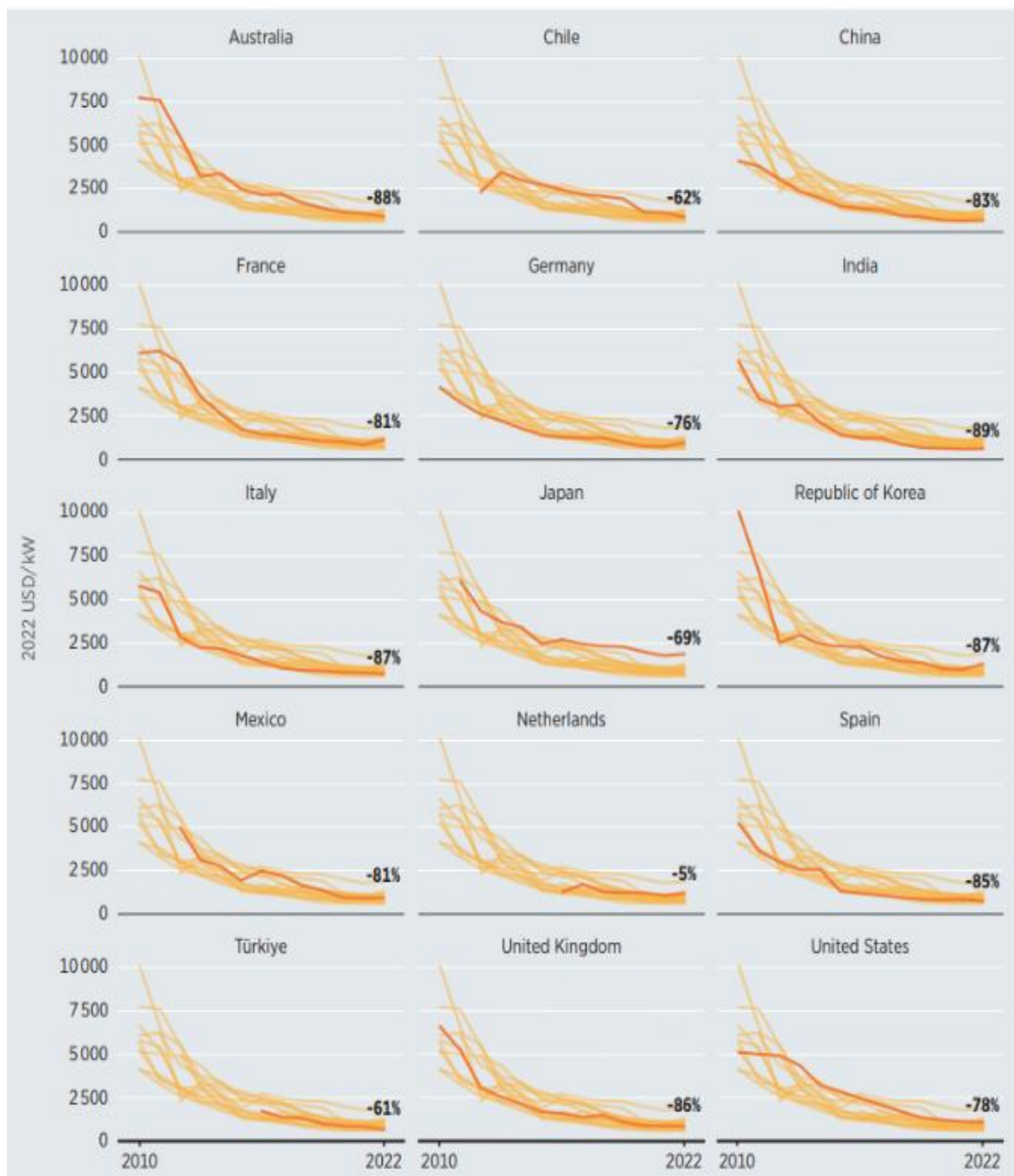


مجموع هزینه سیستم فتوولتائیک احداث شده به تفکیک پروژه و میانگین وزنی برای سیستم‌های مقیاس کاربردی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

در سال ۲۰۲۲، تحلیلی از ۲۰ بازار برتر جهانی بر اساس ظرفیت جدید احداث شده نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس کاربردی، نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه منطقه‌ای در هزینه‌های احداث بوده است. درحالی که اکثر بازارهای اصلی اروپایی افزایش هزینه‌هایی بین ۱۲٪ در هلند تا ۵۱٪ در یونان را تجربه کرده‌اند، بازارهای اصلی آسیایی افزایش‌های کمتری بین ۲٪ تا ۶٪ داشته‌اند؛ با این حال، جمهوری کره استثنایی بوده که افزایش‌هایی مشابه با اروپا داشته است. شایان ذکر است که ۱۱ بازار از ۲۰ بازار بزرگ، شاهد افزایش هزینه‌ها بوده‌اند، درحالی که خاورمیانه، به‌ویژه امارات متحده عربی، بیشترین کاهش هزینه‌ها را تجربه کرده و با کاهش ۶۲٪ نسبت به سال قبل، به میانگین هزینه نصب ۵۷۸ دلار بر کیلووات رسیده است.

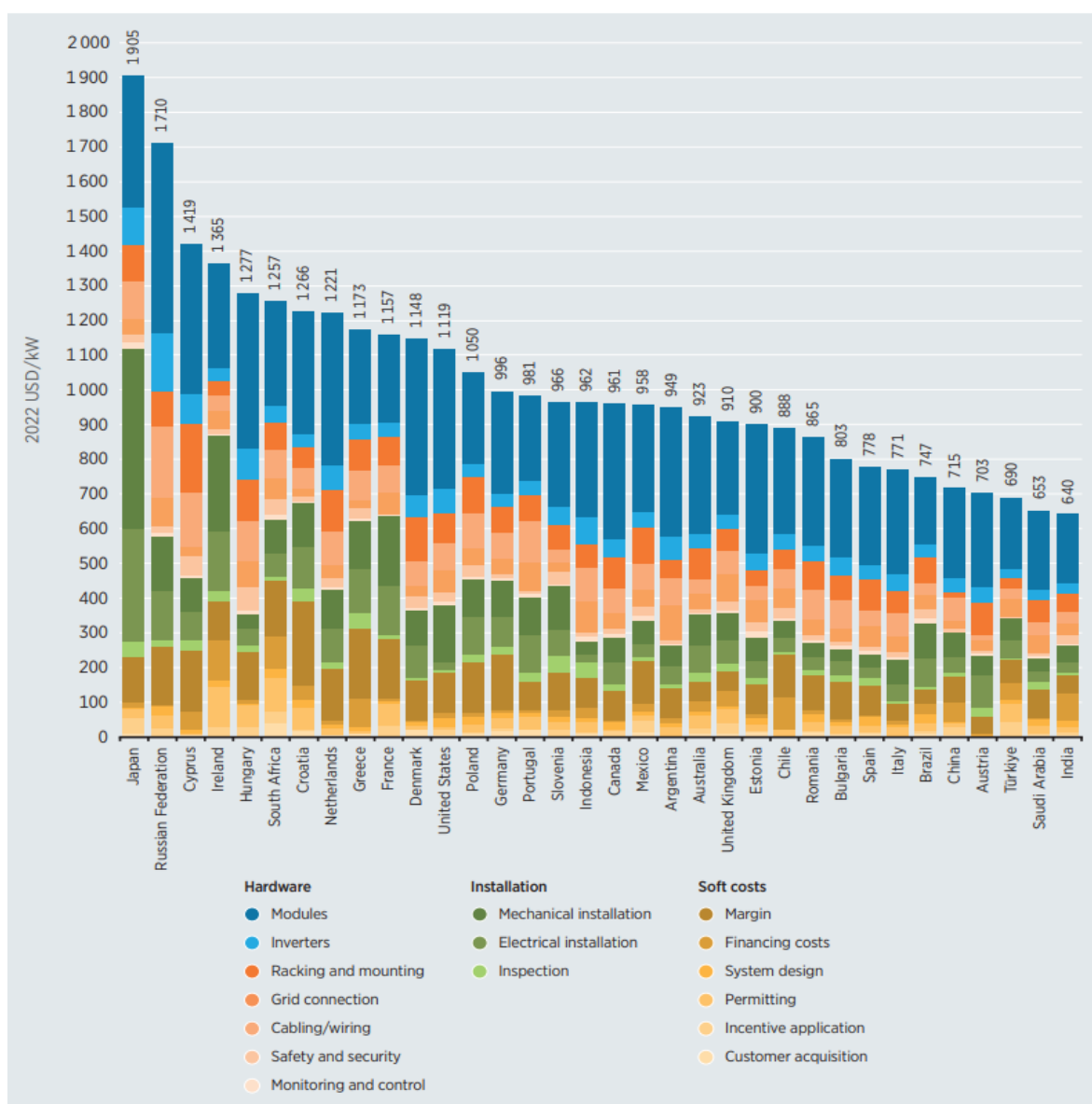


روندهای هزینه‌های احداث انرژی خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس کاربردی در ۲۰ بازار برتر، ۲۰۲۲-۲۰۲۱



رشد هزینه احداث خورشیدی فتولتائیک در مقیاس کاربردی در کشورهای منتخب، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

با وجود اینکه فناوری خورشیدی فتولتائیک به مرحله بلوغ رسیده است، تفاوت‌های منطقه‌ای در هزینه‌ها همچنان باقی مانده است. در سال ۲۰۲۲، میانگین هزینه‌های احداث بین ۶۴۰ دلار بر کیلووات در هند تا ۱۹۰۵ دلار بر کیلووات در ژاپن متغیر بوده است. شکاف هزینه‌ها بین بازارهای بالاترین و پایین‌ترین هزینه در حال کاهش بوده و نسبت بالاترین به پایین‌ترین هزینه از ۳.۵ در سال ۲۰۱۹ به ۳.۰ در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است، که نشان‌دهنده همگرایی هزینه‌های احداث در بازارهای اصلی است.

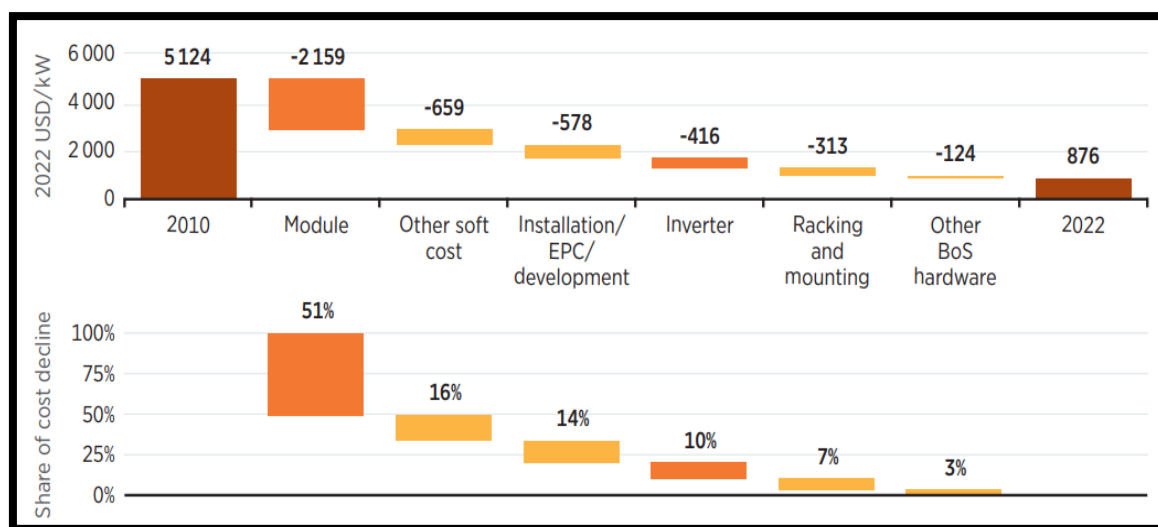


تفکیک تفصیلی کل هزینه‌های احداث فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی بر اساس کشور، ۲۰۲۲

کاهش هزینه‌های احداث سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ توسط چندین عامل هدایت شده است. به صورت جهانی، کاهش هزینه‌های ماژول‌ها ۵۱ درصد و اینورترها ۱۰ درصد به کاهش کلی هزینه‌ها کمک کرده‌اند. با کسب تجربه بیشتر توسط توسعه‌دهندگان پروژه و گسترش زنجیره‌های تأمین، هزینه‌های بالانس سیستم^{۲۱} نیز کاهش یافته و سیستم‌های فتوولتائیک را در بسیاری از بازارها رقابتی‌تر کرده است. هزینه‌های بالانس سیستم شامل سخت‌افزارهای غیرماژولی مانند کابل‌کشی، سیستم‌های نگهداری و نصب، اقدامات ایمنی و امنیتی، اجزای اتصال به شبکه و سیستم‌های نظارتی است. بخش نصب شامل وظایف مکانیکی و الکتریکی مانند دسترسی به جاده‌ها، آماده‌سازی کابل‌کشی، نصب سیستم‌ها و تست‌های الکتریکی، همچنین نظارت

²¹ Balance of System

بر ساخت و بازرسی‌های بهداشتی است. علاوه بر این، هزینه‌های نرم مربوط به درخواست‌های مشوق‌ها، اخذ مجوز، طراحی سیستم، جذب مشتری، تأمین مالی و حاشیه سود برای شرکت مهندسی، تأمین و ساخت (EPC) یا توسعه‌دهنده پروژه نیز مورد بحث قرار می‌گیرد. بنابراین این هزینه، به تمام اجزاء و هزینه‌های یک سیستم خورشیدی فتوولتائیک به غیر از ماژول‌های خورشیدی اشاره دارد و شامل سایر سخت‌افزارها، نصب و هزینه‌های عملیاتی می‌شود. درحالی‌که ماژول‌ها و اینورترها مسئول ۶۷ درصد کاهش هزینه‌ها بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ بوده‌اند، سهم آن‌ها بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ به ۳۷ درصد کاهش یافته است. در این دوره، هزینه‌های بالانس سیستم نقش مهم‌تری ایفا کرده و حدود یک‌چهارم کاهش هزینه را تشکیل داده‌اند. این تغییر، اهمیت رو به رشد هزینه‌های بالانس سیستم در رقابت‌پذیری پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی را برجسته می‌کند.



میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث جهانی سیستم‌های فتوولتائیک در مقیاس کاربردی و کاهش هزینه بر اساس منبع، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ ضریب ظرفیت ۲۲

از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی ضریب ظرفیت برای پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی جدید در مقیاس کاربردی از ۱۳.۸ درصد به ۱۶.۹ درصد افزایش یافت و در سال ۲۰۱۸ به نقطه اوج خود معادل ۱۷.۹ درصد رسید. این افزایش عمدتاً به دلیل احداث در مکان‌های با تابش بیشتر و پیشرفت‌های تکنولوژی، از جمله پذیرش پنل‌های دووجهی و سیستم‌های ردیاب بود. با این حال، پس از سال ۲۰۱۸، روند معکوس شد و منجر به کاهش جزئی در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال‌های گذشته گردید. روند ضریب ظرفیت تحت تأثیر ترکیبی از عوامل است. در ابتدا، رشد به دلیل احداث پروژه‌ها در مناطق با تابش بالا و استفاده از دستگاه‌های ردیاب پشتیبانی شده بود؛ اما با گذشت زمان، پیشرفت‌های تکنولوژی و کاهش در تلفات سیستم نیز نقش داشت. با وجود این پیشرفت‌ها، ضریب ظرفیت نوساناتی را تجربه کرد، به طوری که در صدک ۹۵ از ۲۶.۹ درصد در سال ۲۰۱۸ به ۲۰.۵ درصد در سال ۲۰۲۲ کاهش یافت، درحالی‌که در صدک ۵ به طور ملایم‌تری از ۱۲.۴ درصد به ۱۰.۳ درصد در همان دوره کاهش یافت.

نوسانات ضریب ظرفیت نشان‌دهنده تعامل پیچیده عواملی نظیر تکنولوژی ردیابی، موقعیت پروژه و حضور بازار مازول‌های دووجهی است. این عناصر در بازارهای مختلف به شیوه‌های متفاوتی تعامل دارند که منجر به تأثیرات متنوعی بر ضریب ظرفیت در سطح جهان می‌شود. درک این دینامیک‌ها برای ارزیابی روندهای ضریب ظرفیت جهانی فتوولتائیک خورشیدی ضروری است.

Year	5 th percentile	Weighted average	95 th percentile
2010	11.0%	13.8%	23.0%
2011	10.1%	15.3%	26.0%
2012	10.5%	15.1%	25.6%
2013	11.9%	16.4%	23.0%
2014	10.8%	16.6%	24.4%
2015	10.8%	16.5%	29.0%
2016	10.7%	16.7%	25.9%
2017	11.5%	17.6%	27.0%
2018	12.4%	17.9%	26.9%
2019	10.7%	17.5%	23.9%
2020	9.9%	16.1%	20.8%
2021	10.8%	17.2%	21.3%
2022	10.3%	16.9%	20.5%

میانگین وزنی ضریب ظرفیت جهانی برای سیستم‌های فتوولتائیک در مقیاس کاربردی بر اساس سال بهره‌برداری، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ هزینه‌های عملیات و نگهداری^{۲۳}

در دهه گذشته، هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس کاربردی به طور قابل توجهی کاهش یافته است که عمدتاً به دلیل بهبودهای صورت گرفته در کارایی مازول و طراحی سیستم بوده است. پیشرفت‌هایی مانند تمیزکاری رباتیک^{۲۴} و تحلیل داده‌های کلان^{۲۵} این هزینه‌ها را با کاهش زمان‌های غیرعملیاتی و امکان‌پذیر کردن نگهداری پیشگیرانه، کاهش داده‌اند. در ایالات متحده، هزینه‌های عملیات و نگهداری برای یک گروه از پروژه‌ها از ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ به میزان ۵۸ درصد کاهش یافته است و تخمین‌های اخیر نشان می‌دهد که این هزینه‌ها در محدوده بین ۱۱ تا ۲۰ دلار در هر کیلووات در سال است. نگهداری پیشگیرانه و تمیزکاری مازول‌ها اکنون بخش عمده‌ای از هزینه‌های عملیات و نگهداری را تشکیل می‌دهند.

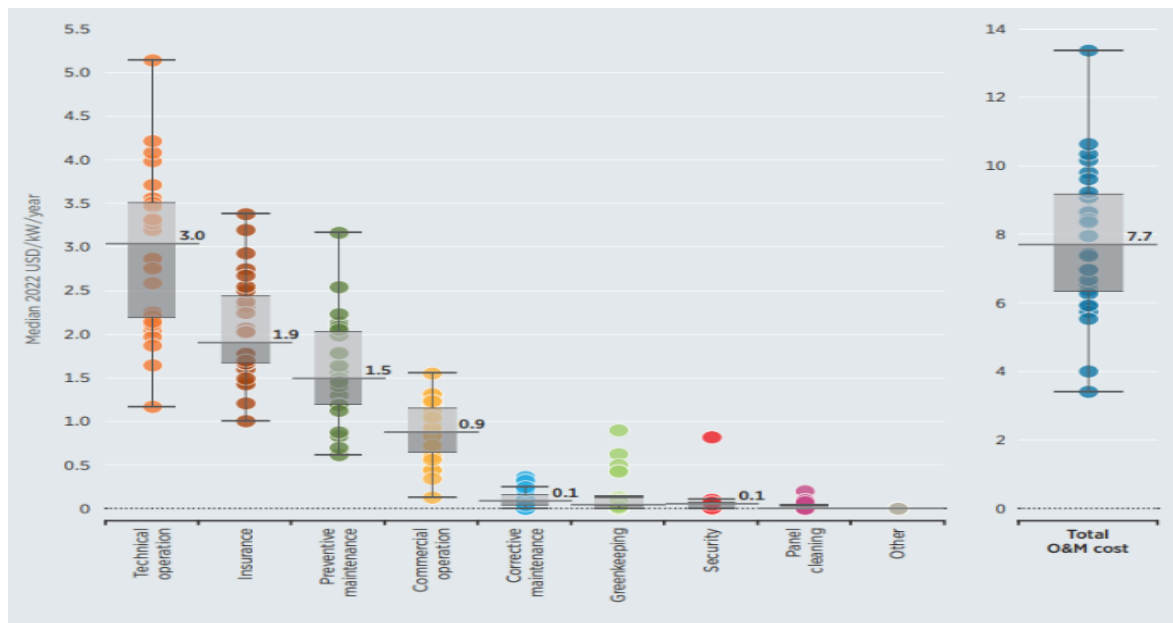
در اروپا، هزینه‌های متوسط عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های مقیاس کاربردی نیز کاهش یافته است و هزینه‌های گزارش شده در حدود ۱۰ دلار در هر کیلووات در سال بوده و کاهش قابل توجهی به میزان ۸۵ درصد در آلمان از ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ ثبت شده است. تا سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه عملیات و نگهداری برابر با ۱۳.۲ دلار در هر کیلووات در سال بوده که کاهش ۵۱ درصد از سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. با وجود این کاهش‌ها، چالش‌هایی در دستیابی به داده‌های جامع و دقیق هزینه‌های عملیات و نگهداری در مناطق مختلف وجود دارد.

²³ Operation & Maintenance (O&M)

²⁴ Robotic cleaning

²⁵ Big data analysis

بررسی‌های اخیر نشان‌دهنده تنوع قابل توجهی در هزینه‌های عملیات و نگهداری بر اساس مناطق جغرافیایی است. در آسیا، پایین‌ترین میزان هزینه یعنی ۳۶ دلار در هر کیلووات در سال است، در حالی که آمریکای شمالی بالاترین هزینه را با ۹۰۱ دلار در هر کیلووات در سال نشان می‌دهد. اروپا و اوراسیا مقادیر میانه‌ای دارند که به ترتیب ۸۰۴ دلار در هر کیلووات در سال برای اروپا و ۶۰۶ دلار در هر کیلووات در سال برای اوراسیا است. گزارش‌های آینده هدف دارند تا دقت داده‌های هزینه عملیات و نگهداری را افزایش دهند تا محاسبات هزینه تراز شده انرژی بهتری ارائه دهند و بینش‌های بازار را بهبود بخشند.



هزینه‌های عملیات و نگهداری متوسط برای نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ مقیاس بر اساس دسته هزینه و کشور، ۲۰۲۰-۲۰۲۲

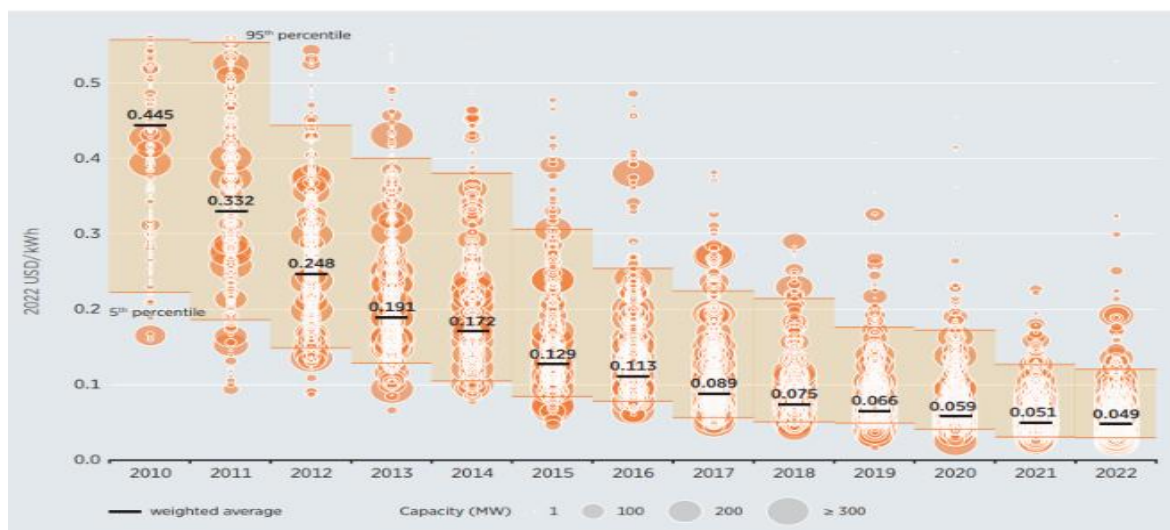
❖ هزینه‌ی تراز شده برق تولیدی^{۲۶}

هزینه‌ی تراز شده برق تولیدی برای نیروگاه‌های فتوولتائیک در مقیاس کاربردی، کاهش جهانی چشم‌گیری داشته است و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، ۸۹ درصد کاهش یافته و به ۰.۰۴۹ دلار بر کیلووات ساعت رسیده است. این کاهش نشان‌دهنده بهبود مستمر هزینه‌ها بوده است و کاهشی ۳ درصدی از ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ مشاهده شده است. دامنه هزینه‌های تراز شده برق فتوولتائیک در سطح جهانی نیز کاهش یافته است که نشان‌دهنده‌ی روندی به‌سوی قیمت‌گذاری یکنواخت‌تر است، به‌طوری‌که مقادیر صدک پنجم و نود و پنجم از سال ۲۰۱۰ به بعد کاهش‌های قابل توجهی داشته‌اند. به‌ویژه، بین سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، دامنه هزینه تراز شده برق فتوولتائیک کمترین فاصله خود را تجربه کرده است. کاهش هزینه تراز شده برق برای نیروگاه‌های خورشیدی با مقیاس کاربردی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ تحول مهم در بخش تولید برق بوده است. این کاهش به دلیل پیشرفت‌های فناوری در زنجیره ارزش انرژی خورشیدی رخ داده است، از جمله احداث کارخانه‌های بزرگ‌تر پلی‌سیلیکون، بهبود روش‌های رشد اینگوت^{۲۷}، استفاده

²⁶ LEVELISED COST OF ELECTRICITY

²⁷ Improved ingot growth methods

از تکنیک‌های جدید برش با الماس و معماری‌های جدیدتر سلول‌ها. این نوآوری‌ها به طور جمعی منجر به کاهش قابل توجه هزینه تراز شده برق فتوولتائیک خورشیدی شده‌اند و انرژی خورشیدی را در سطح جهانی رقابتی‌تر کرده‌اند. بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، هزینه ماژول‌های خورشیدی به‌تنهایی ۴۵ درصد از کاهش هزینه تراز شده برق را شامل شده و این‌ورها نیز ۹ درصد دیگر را اضافه کرده‌اند. همچنین، سایر اجزای سخت‌افزاری مانند رکینگ (سیستم‌های نگهدارنده)^{۲۸}، نصب و احداث^{۲۹} و سایر سخت‌افزارهای بالانس سیستم نیز نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها ایفا کرده‌اند.



هزینه‌ی تراز شده انرژی و دامنه‌ی آن برای پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی در سطح جهانی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

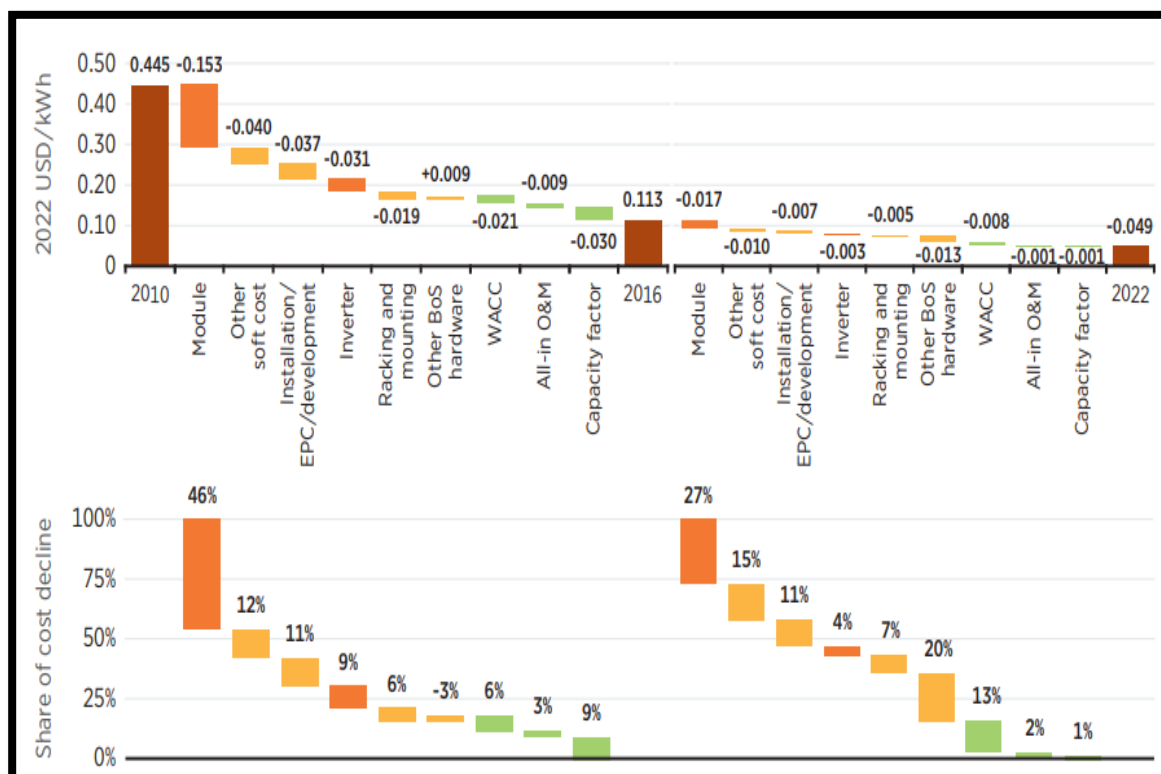
با رشد فناوری انرژی خورشیدی، اهمیت هزینه‌های سیستم‌های جانبی افزایش یافته است، زیرا هزینه‌های ماژول و اینورتر با نرخ بالاتری کاهش یافته و این بخش، سهم بیشتری از هزینه‌های کل نصب را به خود اختصاص داده‌اند. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، هزینه‌های مهندسی، تأمین و ساخت^{۳۰}، نصب، هزینه‌های توسعه و سایر هزینه‌های نرم مجموعاً ۲۶ درصد از کاهش هزینه تراز شده برق فتوولتائیک را شامل شده‌اند. بهبود شرایط مالی، کاهش هزینه‌های عملیات و نگهداری و افزایش میانگین وزن دار جهانی ضریب ظرفیت نیز به کاهش هزینه تراز شده برق فتوولتائیک، به‌ویژه در بازارهایی که منابع خورشیدی بهتری دارند، کمک کرده‌اند. در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶، هزینه تراز شده برق فتوولتائیک به‌طور کلی ۷۵ درصد کاهش یافته که عمدتاً توسط کاهش هزینه‌های ماژول و اینورتر هدایت شده است. اما از ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، سهم هزینه‌های بالانس سیستم در کاهش هزینه تراز شده برق فتوولتائیک بیشتر شده است، درحالی‌که نقش ضریب ظرفیت کاهش یافته است.

روش‌های بهبود یافته رشد اینگوت به فناوری‌های پیشرفته‌ای اشاره دارد که برای تولید اینگوت‌های سیلیکونی با کیفیت بالاتر و با هزینه کمتر به کار گرفته می‌شوند. اینگوت‌ها بلوک‌های بزرگ و تک کریستالی یا چند کریستالی از سیلیکون هستند که به عنوان ماده اولیه برای ساخت ویفرهای خورشیدی استفاده می‌شوند.^{۲۸} سیستم‌های نگهدارنده (Racking) سازه‌هایی هستند که پنل‌های خورشیدی را به صورت ایمن روی سطح مورد نظر (مانند سقف، زمین یا سازه‌های دیگری) نگه می‌دارند. این سازه‌ها معمولاً از مواد مقاوم مانند آلومینیوم یا فولاد ضد زنگ ساخته می‌شوند تا در برابر شرایط جوی مختلف مقاومت کنند.

^{۲۹} فرآیند نصب و استقرار (Mounting) به چگونگی اتصال و تثبیت پنل‌ها به سیستم‌های نگهدارنده اشاره دارد. این شامل استفاده از پیچ‌ها، قلاب‌ها و دیگر اجزای اتصال است که پنل‌ها را به سیستم نگهدارنده متصل می‌کند.

³⁰ Engineering, Procurement and Construction (EPC)

نقش تأمین مالی در کاهش هزینه ترازشده برق فتوولتائیک بین سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۲ اهمیت بیشتری پیدا کرده و شرایط مالی بهبودیافته ۱۳ درصد از کاهش هزینه ترازشده برق را در این دوره شامل شده‌اند، که نسبت به دوره قبلی افزایش قابل توجهی داشته است. هزینه سرمایه^{۳۱} برای فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی، یک عامل تعیین‌کننده در هزینه برق است. ایرنا^{۳۲} بر اهمیت داده‌های قابل اعتماد هزینه سرمایه تأکید کرده است، زیرا کاهش هزینه‌های وام و رشد بلوغ فناوری‌های خورشیدی و بادی به تأثیرگذاری بر هزینه ترازشده برق ادامه می‌دهند.



عوامل کاهش میانگین وزنی جهانی هزینه ترازشده انرژی در نیروگاه‌های فتوولتائیک در مقیاس کاربردی، ۲۰۱۰-۲۰۱۶ و ۲۰۱۶-۲۰۲۲

در کشورهای مختلف، روند نزولی هزینه ترازشده برق متفاوت بوده است، به‌طوری‌که چین و هند در سال ۲۰۲۲ به پایین‌ترین هزینه معادل ۰.۰۳۷ دلار بر کیلووات ساعت دست یافته‌اند و کاهش‌هایی معادل ۸۹ و ۹۰ درصد از سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهند. سایر کشورها مانند استرالیا و شیلی نیز کاهش‌های قابل توجهی تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که هزینه ترازشده برق به ترتیب به ۰.۰۴۱ دلار و ۰.۰۴۲ دلار بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۲ رسیده است. بااین‌حال، علیرغم اینکه اسپانیا افزایش جزئی در هزینه ترازشده خود داشته است، همچنان رقابتی باقی مانده و به ۰.۰۴۶ دلار بر کیلووات ساعت رسیده است. ایالات متحده کاهش ملایم ۱ درصدی را تجربه کرده است، درحالی‌که ژاپن افزایش ۵ درصدی در هزینه ترازشده برق از ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ داشته است.

³¹ Cost of Capital (CoC)

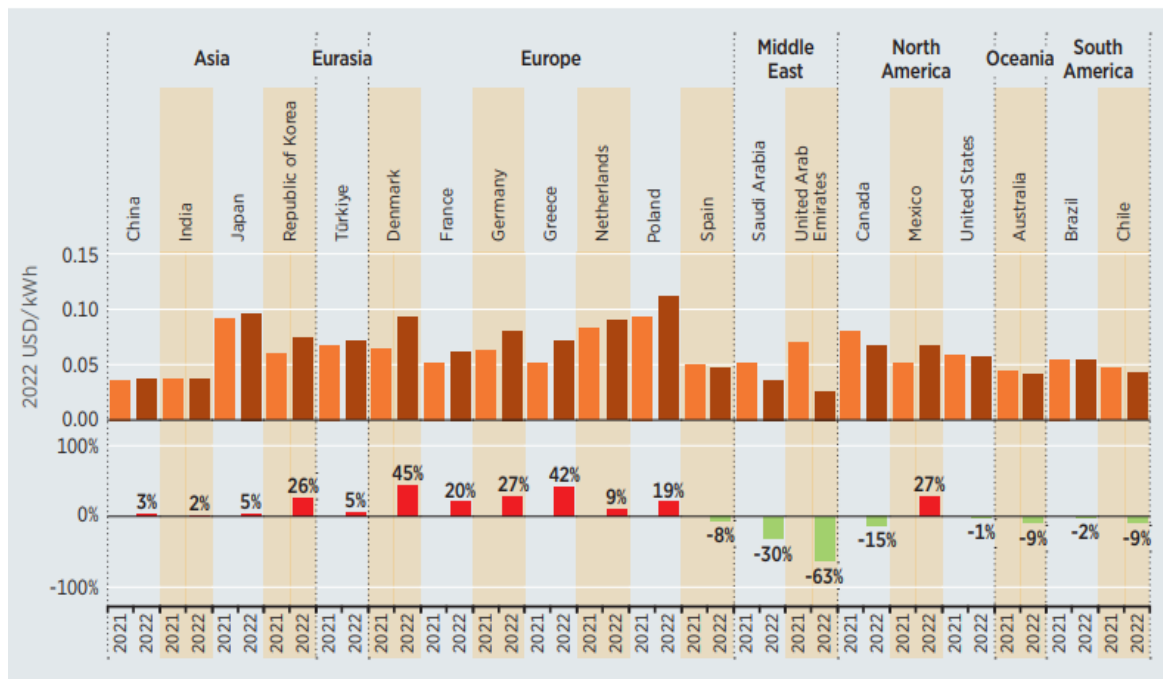
³² IRENA



میانگین وزنی هزینه برق تراز شده از نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس کاربردی در کشورهای منتخب، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

در خاورمیانه، کاهش هزینه تراز شده برق به‌طور ویژه‌ای چشم‌گیر بوده است، به‌طوری‌که امارات متحده عربی و عربستان سعودی بیشترین کاهش‌ها را در میان ۲۰ بازار برتر در مقیاس کاربردی داشته‌اند. هزینه تراز شده برق در امارات متحده عربی ۶۳ درصد کاهش یافته است و در سال ۲۰۲۲ به ۰.۰۲۶ دلار بر کیلووات ساعت رسیده است که آن را به رقابتی‌ترین بازار جهانی تبدیل کرده است. همچنین، هزینه تراز شده برق عربستان سعودی ۳۰ درصد کاهش یافته و در سال ۲۰۲۲ به ۰.۰۳۶ دلار بر کیلووات ساعت رسیده است. این کاهش‌ها برتری منطقه خاورمیانه در انرژی خورشیدی فتوولتائیک به دلیل هزینه‌های نصب پایین‌تر و شرایط مطلوب خورشیدی را برجسته می‌کند. برعکس،

بسیاری از بازارهای اروپایی، به‌ویژه دانمارک و هلند، در همین دوره افزایش‌هایی در هزینه ترازشده برق تجربه کرده‌اند که نشان‌دهنده تفاوت‌های منطقه‌ای در روند هزینه‌ها است.



روند میانگین وزنی هزینه ترازشده انرژی نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس کاربردی در ۲۰ بازار برتر، ۲۰۲۱-۲۰۲۲

RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2023 : منبع

تحلیل روند فنی-اقتصادی CSP طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



سیستم‌های برق خورشیدی متمرکز^{۳۳} در مناطقی با تابش شدید و مستقیم خورشیدی^{۳۴} (بیش از ۲۰۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال) بهترین عملکرد را دارند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند. این سیستم‌ها از آینه‌ها برای متمرکز کردن پرتوهای خورشید و تولید گرما استفاده می‌کنند که سپس به محیطی مثل روغن حرارتی^{۳۵} یا نمک مذاب^{۳۶} منتقل می‌شود و از آن برای تولید برق از طریق چرخه‌های ترمودینامیکی بهره می‌برند.

نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز معمولاً دارای سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی کم‌هزینه و طولانی مدت هستند که قابلیت انعطاف‌پذیری و توانایی هدف‌گذاری خروجی در دوره‌های پرهزینه بازار برق را به نیروگاه می‌افزاید. سیستم‌های برق خورشیدی متمرکز بر اساس مکانیزم تمرکز پرتوهای خورشیدی به دو نوع «متمرکزکننده خطی»^{۳۷} و «متمرکزکننده نقطه‌ای»^{۳۸} طبقه‌بندی می‌شوند. اکثر پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز امروزی از کلکتورهای سهموی^{۳۹} استفاده می‌کنند که شامل آینه‌های منحنی و لوله‌های جاذب گرما هستند. نوع دیگری از سیستم‌های

^{۳۳} CONCENTRATING SOLAR POWER(CSP)

^{۳۴} Direct Normal Irradiation (DNI)

^{۳۵} Thermal oil

^{۳۶} Molten salt

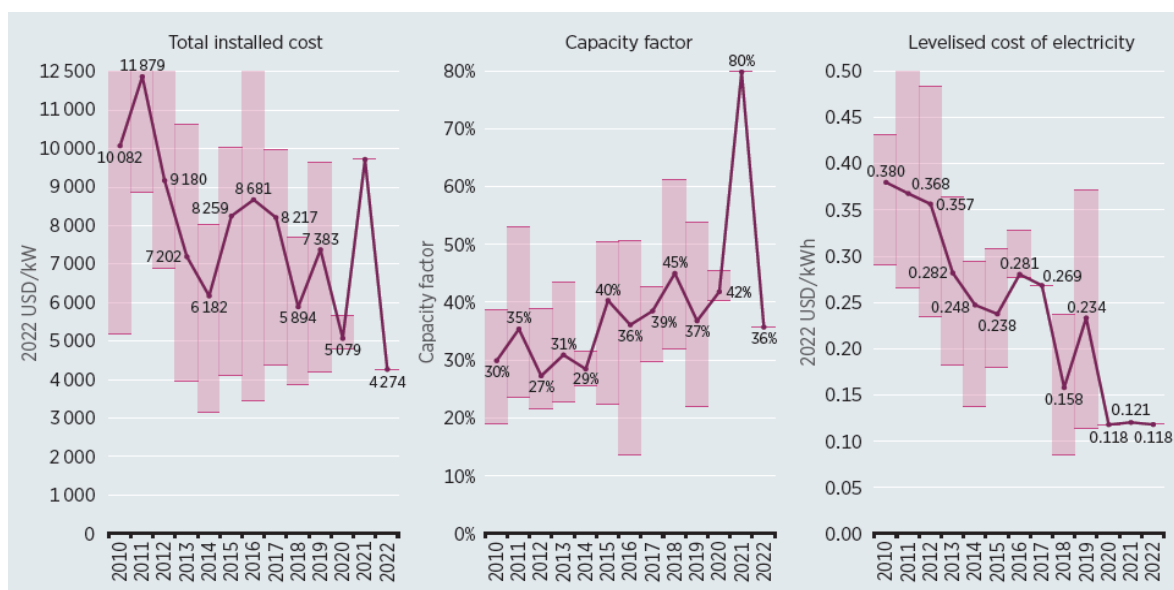
^{۳۷} Line concentrating

^{۳۸} Point concentrating

^{۳۹} Parabolic Trough Collectors (PTCs)

متمرکز کننده خطی، کلکتورهای فرنل^{۴۰} است که از آینه‌های مسطح برای تمرکز پرتوهای خورشید روی یک گیرنده خطی استفاده می‌کنند.

برج‌های خورشیدی^{۴۱} که «برج‌های توان»^{۴۲} نیز نامیده می‌شوند، متداول‌ترین فناوری برق خورشیدی متمرکز در حوزه تمرکز نقطه‌ای هستند و در آن‌ها هزاران هلیواستات^{۴۳} پرتوهای خورشید را به یک گیرنده مرکزی در بالای برج هدایت می‌کنند. سیستم‌های برج خورشیدی می‌توانند به تمرکز بسیار بالایی دست یابند و در دماهای بالاتری نسبت به کلکتورهای سهموی کار کنند، که این امر منجر به بازدهی بیشتر و هزینه‌های تولید کمتر می‌شود. در آینده انتظار می‌رود با توجه به توسعه‌های جدید در چین، سهم برج‌های خورشیدی در پروژه‌های جدید افزایش یابد.



میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت و هزینه تراز شده برای برق خورشیدی متمرکز، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

در سطح جهانی، ظرفیت احداث شده برق خورشیدی متمرکز بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بیش از پنج برابر شد و تا پایان این دوره به حدود ۶.۵ گیگاوات رسید. در پنج سال آخر این دوره، پس از افت در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، با افزایش سالانه حدود ۱۰۰ مگاوات، بازار جهانی برق خورشیدی متمرکز در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ رشد کرد. در این سال‌ها، تعداد فزاینده‌ای از پروژه‌ها در چین، مراکش و آفریقای جنوبی آنلاین شدند. با این حال، در مقایسه با سایر فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر، ظرفیت‌های جدید همچنان کم بود (۸۶۰ مگاوات در سال ۲۰۱۸ و ۵۵۰ مگاوات در سال ۲۰۱۹). در سال ۲۰۲۰، تنها ۱۵۰ مگاوات در سراسر جهان راه‌اندازی شد و همه این ظرفیت‌ها در چین به بهره‌برداری رسید. امیدها برای رشد در سال ۲۰۲۱ محقق نشد؛ هرچند ۱۱۰ مگاوات (همه از پروژه سرودومینادور^{۴۴} در شیلی) به بهره‌برداری رسید. در همان زمان، حدود ۲۶۵ مگاوات از نیروگاه‌های سیستم تولید انرژی خورشیدی^{۴۵} در

^{۴۰} Fresnel Collectors

^{۴۱} Solar Towers (STs)

^{۴۲} Power towers

^{۴۳} Heliostats

^{۴۴} Cerro Dominador

^{۴۵} Solar Energy Generating Systems (SEGS)

ایالات متحده از مدار خارج شد. پس از نصب و راه‌اندازی محدود در سال ۲۰۲۲، مجموع ظرفیت نصب شده جهانی برق خورشیدی متمرکز در پایان سال ۲۰۲۲ حدود ۶.۵ گیگاوات باقی ماند. برنامه‌های چین برای افزایش این فناوری می‌تواند به رشد صنعت کمک کند. اما پیشرفت در سیاست‌های چین برای ایجاد چندین نیروگاه در مقیاس تجاری به منظور افزایش مقیاس راه‌حل‌های فناوری و توسعه زنجیره‌های تامین، چالش‌برانگیزتر از آنچه پیش‌بینی می‌شد، بوده است. برخی پروژه‌ها عقب مانده‌اند و تکمیل برخی دیگر دور از انتظار است. چشم‌انداز سال‌های آتی، به ویژه با عملیاتی شدن یک پروژه ۱۰۰ مگاواتی در امارات و احتمال افزایش ظرفیت در چین روشن‌تر است. اسپانیا و برخی کشورهای اروپایی نیز برنامه‌هایی برای توسعه برق خورشیدی متمرکز دارند.

❖ هزینه‌های احداث

در سال‌های اولیه توسعه نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز، افزودن ذخیره‌سازی انرژی حرارتی غالباً اقتصادی نبود و ضروری به نظر نمی‌رسید. بنابراین استفاده از آن محدود بود. در صورتیکه، از سال ۲۰۱۵ به بعد، تقریباً هیچ پروژه‌ای بدون ذخیره‌سازی انرژی حرارتی ساخته یا برنامه‌ریزی نشده است. افزودن این سیستم اکنون یک روش اقتصادی برای افزایش ضریب ظرفیت محسوب می‌شود و باعث کاهش هزینه ترازشده و افزایش انعطاف‌پذیری در توزیع برق در طول روز نیز می‌شود. ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی متوسط برای نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در پایگاه داده هزینه تجدیدپذیر ایرنا^{۴۶} بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ از ۳.۵ ساعت به ۱۱ ساعت افزایش یافته است. پروژه ۱۱۰ مگاواتی سرودومینادور که در سال ۲۰۲۱ در صحرای آتاکامای شیلی راه‌اندازی شد، دارای ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۷.۵ ساعت است. در سال ۲۰۲۲، ظرفیت احداث‌شده در چین به‌طور میانگین ۹ ساعت ذخیره‌سازی داشت. احتمالاً همه پروژه‌های جدید برق خورشیدی متمرکز که در سراسر جهان توسعه می‌یابند، شامل ذخیره‌سازی حرارتی خواهند بود. کل هزینه احداث برای نیروگاه‌های کلکتور سهموی و برج‌های خورشیدی بیشتر تحت تأثیر هزینه اجزای تشکیل‌دهنده میدان خورشیدی است. در سال ۲۰۱۰، هزینه میدان خورشیدی یک نیروگاه کلکتورهای سهموی حدود ۴۵۰۳ دلار به ازای هر کیلووات (۴۴ درصد از کل هزینه احداث) بود، اما تا سال ۲۰۲۰ این رقم با ۶۸ درصد کاهش به ۱۴۴۰ دلار به ازای هر کیلووات (۳۰ درصد از کل) رسید. با چنین کاهش چشمگیری در هزینه‌های میدان خورشیدی، سایر بخش‌ها سهم بیشتری از کل هزینه‌های احداث را به خود اختصاص دادند. به عنوان مثال، سهم بلوک توان^{۴۷} از ۱۵ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۱۹ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافت. این موضوع علیرغم کاهش ۴۰ درصدی هزینه آن از ۱۴۹۹ دلار به ۸۹۲ دلار در هر کیلووات، اتفاق افتاد. همین مورد در خصوص سیستم سیال انتقال حرارت^{۴۸} نیز صادق بود که سهم آن از ۹ درصد به ۱۱ درصد افزایش یافت. این افزایش علیرغم کاهش ۴۷ درصدی هزینه آن از ۹۴۸ دلار به ۵۰۳ دلار در هر کیلووات در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ رخ داد. همچنین، سهم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی^{۴۹}

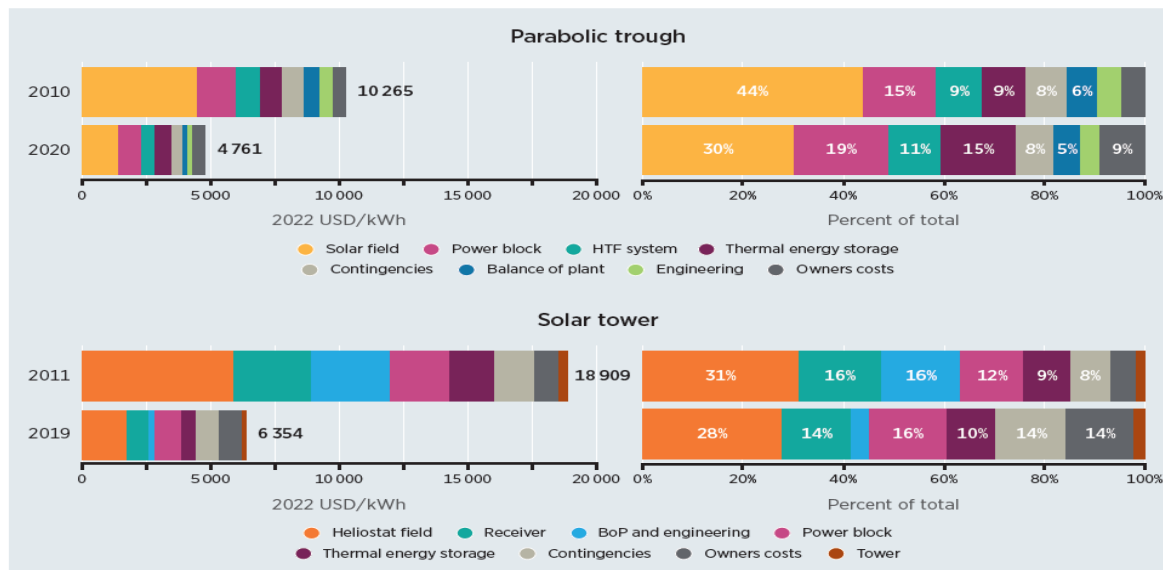
⁴⁶ IRENA

⁴⁷ Power block

⁴⁸ Heat transfer fluid system

⁴⁹ Thermal energy storage

از ۹ درصد به ۱۵ درصد افزایش یافت (با وجود کاهش هزینه از ۸۷۳ دلار به ۷۰۶ دلار در هر کیلووات). در همان زمان، سهم هزینه سرمایه‌گذار از ۵ درصد به ۹ درصد رسید.



تفکیک کل هزینه احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز بر اساس فناوری (۲۰۱۰-۲۰۱۱ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰)

بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، هزینه‌های ترازشده نیروگاه^{۵۰}، مهندسی و هزینه‌های عدم قطعیت^{۵۱} برای نیروگاه‌های کلکتور سهموی به ترتیب ۶۰، ۶۴ و ۵۷ درصد کاهش یافت. سهم تراز نیروگاه از کل هزینه‌های احداث از ۶۲۶ دلار به ۲۵۲ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه‌های مهندسی از ۵۰۷ دلار به ۱۸۰ دلار به ازای هر کیلووات کاهش یافت. هزینه‌های میدان خورشیدی در سال ۲۰۱۰ تنها ۵ درصد کمتر از میانگین وزنی کل هزینه احداث‌شده در سال ۲۰۲۰ بود.

برای نیروگاه‌های برج خورشیدی، هزینه‌های میدان هلیواستات در سال ۲۰۱۰ تنها ۷ درصد کمتر از میانگین وزنی کل هزینه احداث در سال ۲۰۱۹ بود. بین سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹، هزینه‌های میدان هلیواستات ۷۰ درصد کاهش یافت و از ۵۹۱۶ دلار به ۱۷۶۸ دلار به ازای هر کیلووات رسید. هزینه گیرنده نیز ۷۱ درصد کاهش یافت و از ۳۰۶۹ دلار به ۸۷۶ دلار به ازای هر کیلووات رسید. هزینه تراز کارخانه و مهندسی بیشترین کاهش را داشتند و ۹۳ درصد کاهش یافتند. این امر باعث شد سهم این عوامل از کل هزینه‌ها از ۱۶ به ۳ درصد کاهش یابد.

هزینه‌های عدم قطعیت^{۵۲} همچنان بخش مهمی از هزینه‌های کلی برج‌های خورشیدی را تشکیل می‌دهند. این هزینه‌ها بین سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ به میزان ۴۲ درصد کاهش یافت و از ۱۵۲۰ دلار بر کیلووات به ۸۷۸ دلار بر

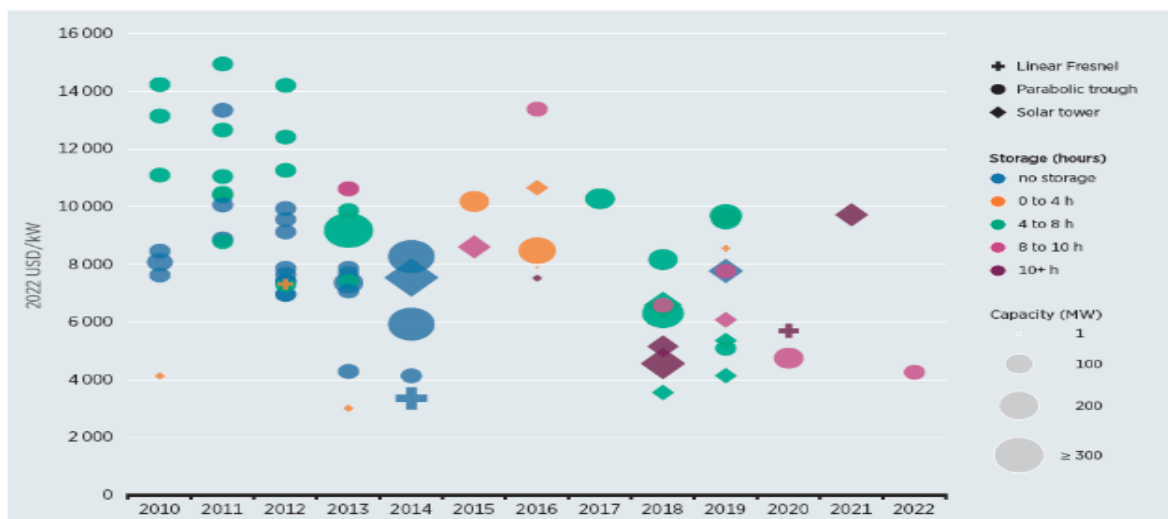
⁵⁰ Costs of the balance of plant

⁵¹ Contingencies

⁵² این هزینه‌های عدم قطعیت ناشی از تولید کمتر از مقدار مورد نظر نیروگاه به دلیل عدم ثبات منابع تجدیدپذیری نظیر باد و خورشید می‌باشد. امروزه بکارگیری روش‌های پیش‌بینی به کمک هوش مصنوعی نقشی موثر در رصد شرایط آبی و کاهش هزینه‌های عدم قطعیت دارد.

-Renewable energy contingencies in power systems: Concept and case study, Mohar Chattopadhyay a, Debabrata Chattopadhyay, NASA, February 2020

کیلووات رسید. در سال ۲۰۱۹، هزینه های عدم قطعیت برای برج های خورشیدی ۱۴ درصد از هزینه های کلی را تشکیل می داد، در حالی که برای کلکتورهای سهموی در سال ۲۰۲۰ این سهم ۸ درصد بود. هزینه های بالاتر عدم قطعیت برای برج های خورشیدی به دلیل تجربه کمتر و عدم اطمینان بیشتر در فرآیندهای توسعه و ساخت نسبت به کلکتورهای سهموی است. نیروگاه های کلکتور سهموی دارای سابقه تجاری طولانی تر و تعداد پروژه های احداث شده بیشتری هستند. به همین دلیل، هزینه های مالک برای برج های خورشیدی بین سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ تنها ۱۲ درصد کاهش یافت و سهم آن ها از هزینه های احداث کلی به ۱۴ درصد در سال ۲۰۱۹ افزایش یافت (در مقایسه با ۵٪ سال ۲۰۱۰). بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰، میانگین وزنی کل هزینه احداث برای نیروگاه های برق خورشیدی متمرکز در پایگاه داده هزینه تجدیدپذیر ایرنا حدود ۵۰ درصد کاهش یافت و به ۵۰۷۹ دلار به ازای هر کیلووات رسید. این رقم در سال ۲۰۲۲ به ۲۷۴ دلار به ازای هر کیلووات کاهش یافت که نشان دهنده کاهش ۵۸ درصد نسبت به سال ۲۰۱۰ است.



کل هزینه های احداث برق خورشیدی متمرکز بر اساس اندازه پروژه، نوع کلکتور و مقدار ذخیره سازی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

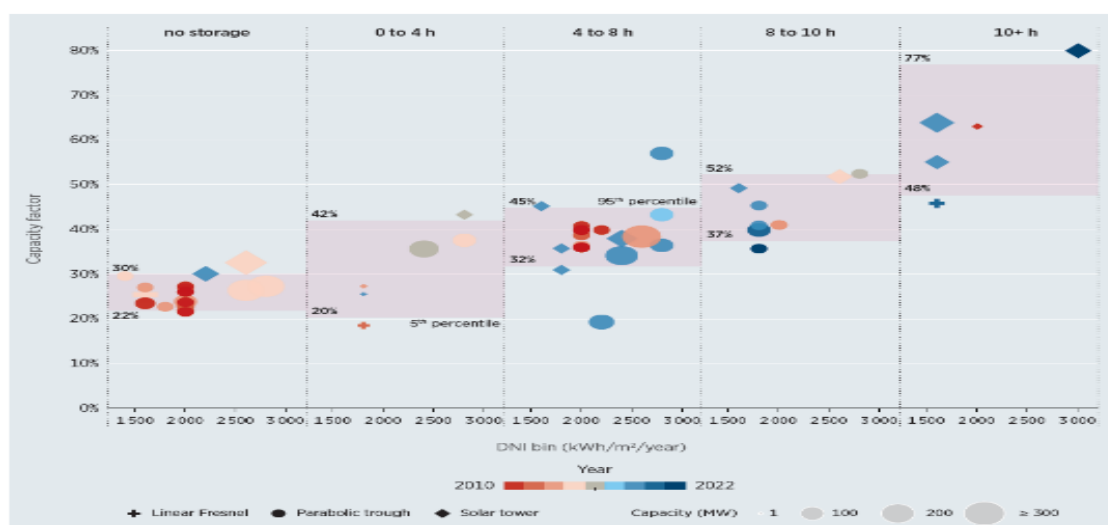
در سال ۲۰۲۱، کل هزینه های احداث به ۹۷۲۸ دلار به ازای هر کیلووات افزایش یافت، اما در سال ۲۰۲۲ به ۴۲۷۴ دلار به ازای هر کیلووات کاهش یافت. این افزایش در سال ۲۰۲۱ به دلیل افتتاح اولین نیروگاه خورشیدی در آمریکای لاتین بود. با در نظر گرفتن این مقدار، کاهش هزینه احداث بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۱، ۴ درصد بوده است. با توجه به ضریب ظرفیت بالای پروژه سرودومینادور در شیلی با ۱۷.۵ ساعت ذخیره سازی، کاهش هزینه تراشده در این دوره، مشابه دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ باقی ماند. در سال ۲۰۲۲، احداث و راه اندازی پروژه ها به چین منتقل شد و با کاهش هزینه ها، میانگین وزنی هزینه احداث به ۴۲۷۴ دلار به ازای هر کیلووات رسید.

داده های پایگاه داده هزینه تجدیدپذیر ایرنا نشان می دهد که کل هزینه های احداث برای نیروگاه های برق خورشیدی متمرکز در دهه گذشته (حتی با افزایش اندازه سیستم های ذخیره انرژی حرارتی این پروژه ها)، ۵۰ درصد کاهش یافته است. در سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، هزینه های احداث نیروگاه های برق خورشیدی متمرکز دارای ذخیره سازی، برابر یا کمتر از نیروگاه های بدون ذخیره سازی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ بود. پروژه های این دوره به طور میانگین ۷.۴ ساعت ذخیره سازی داشتند که ۲.۸ برابر بیشتر از میانگین پروژه های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ بود. ذخیره سازی همچنان رشد کرد و

میانگین وزنی برای پروژه‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به ۱۳.۸ ساعت رسید که ۸۵ درصد بیشتر از سطح ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بود. هزینه‌های سرمایه‌ای پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز در سال ۲۰۲۰ بین ۴۷۶۱ تا ۵۷۱۳ دلار به ازای هر کیلووات بود. در آن سال، تنها دو پروژه در چین با ظرفیت ۱۵۰ مگاوات تکمیل شد که بخشی از برنامه‌ی ۲۰ پروژه‌ای برای آزمایش فناوری‌های مختلف بودند. این برنامه با هدف توسعه ۱.۳۵ گیگاوات ظرفیت در سال ۲۰۱۶ آغاز شد اما تکمیل آن به تعویق افتاد. میانگین وزنی هزینه‌های احداث در سال ۲۰۲۰ برابر با ۵۰۷۹ دلار به ازای هر کیلووات بود که ۳۱ درصد کمتر از میانگین وزنی ۷۳۸۲ دلار در سال ۲۰۱۹ بود. در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، هزینه سرمایه‌ای پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز با ظرفیت ذخیره‌سازی ۴ تا ۸ ساعت بین ۳۵۷۱ تا ۹۶۹۹ دلار و برای پروژه‌هایی با بیش از ۸ ساعت ذخیره‌سازی بین ۴۵۷۴ تا ۷۷۷۴ دلار به ازای هر کیلووات بود.

❖ ضرایب ظرفیت

در طی دهه گذشته، توسعه نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز همراه با ذخیره‌سازی بهبود قابل توجهی داشته است. عوامل مهمی که ضریب ظرفیت این نیروگاه‌ها را تعیین می‌کنند، شامل کیفیت منبع خورشیدی و پیکربندی فناوری است. استفاده از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با کمترین هزینه می‌تواند ضریب ظرفیت را افزایش داده و هزینه هزینه تراز شده تولید برق را کاهش دهد. بهینه‌سازی طراحی این نیروگاه‌ها نیازمند شبیه‌سازی‌های دقیق است که با استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری پیشرفته صورت می‌گیرد. در دهه گذشته، کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و افزایش دمای عملیاتی، بهبود قابل ملاحظه‌ای در اقتصاد برق خورشیدی متمرکز را به دنبال داشته است. این تحولات همچنین باعث افزایش ضریب ظرفیت نیروگاه‌ها شده است و این شاخص از ۳۰ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۴۲ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. اندازه ذخیره‌سازی انرژی تأثیر مستقیمی بر ضریب ظرفیت دارد. در سال ۲۰۲۰، دامنه ضریب ظرفیت پروژه‌ها بین ۴۰ درصد تا ۴۶ درصد بود. منبع خورشیدی عالی در صحرای آتاکامای شیلی، محل پروژه سرودومینادور، به معنای ضریب ظرفیت بسیار بالا در حدود ۸۰ درصد است. در سال ۲۰۲۲، پروژه‌ای در چین با ۹ ساعت ذخیره‌سازی، ضریب ظرفیت را به ۳۶ درصد رساند.



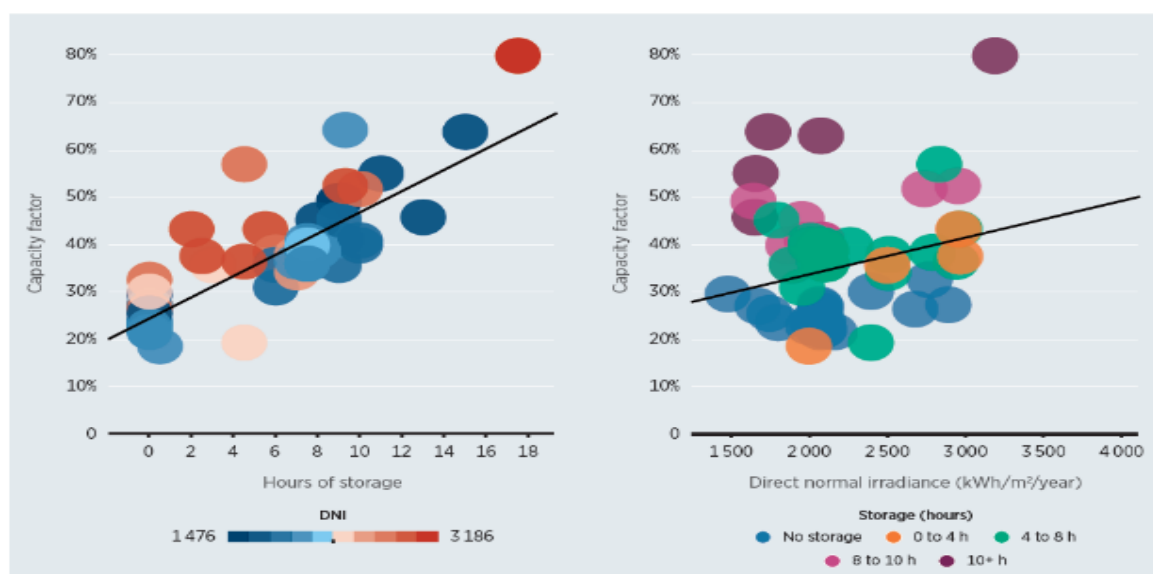
روند ضریب ظرفیت برای نیروگاه‌های برق متمرکز خورشیدی بر اساس تابش مستقیم خورشیدی و مدت زمان ذخیره‌سازی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

عوامل افزایش ضریب ظرفیت نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز به دلیل افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی در شکل فوق به وضوح قابل مشاهده است. از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، حدود ۸۰ درصد از نیروگاه‌ها حداقل چهار ساعت و ۳۹ درصد آن‌ها هشت ساعت یا بیشتر ذخیره‌سازی داشتند. نیروگاه‌های تازه راه‌اندازی شده در سال ۲۰۲۰ میانگین وزنی ضریب ظرفیت ۴۲ درصد و میانگین تابش خورشیدی کمتر از نیروگاه‌های دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ داشتند. در آن دوره میانگین وزنی ضریب ظرفیت بین ۲۷ تا ۳۵ درصد بود. اکنون نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز به طور معمول برای پاسخگویی به پیک‌های عصر و تقاضای شبانه طراحی می‌شوند. برق خورشیدی متمرکز با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کم‌هزینه می‌تواند سهم بیشتری از انرژی خورشیدی و بادی متغیر را در شبکه یکپارچه کند. به این معنی که اگرچه برق خورشیدی متمرکز اغلب فاقد اهمیت پنداشته می‌شود، اما می‌تواند نقش مهمی در آینده ایفا کند. افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی نیز به دلیل کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در پی بلوغ بازار بوده است. میانگین وزنی تعداد ساعات ذخیره‌سازی از ۳.۵ ساعت در سال ۲۰۱۰ به ۱۱ ساعت در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. پروژه سرودومینادور در شیلی با ۱۷.۵ ساعت ذخیره‌سازی، بالاترین ظرفیت را در دنیا دارد. در سال ۲۰۲۲، میانگین ظرفیت ذخیره‌سازی به ۹ ساعت رسید که نزدیک به سطح ۲۰۱۹ بود. تأثیر اقتصادی سطوح بالاتر ذخیره‌سازی انرژی از این جهت مشهود است که در سال ۲۰۲۰، نیروگاه‌های تازه راه‌اندازی شده دارای میانگین وزنی ضریب ظرفیت ۴۲ درصدی با میانگین تابش مستقیم خورشیدی کمتر از نیروگاه‌های راه‌اندازی شده در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ بوده‌اند. در واقع، در آن دوره، میانگین وزنی ضریب ظرفیت برای نیروگاه‌های تازه راه‌اندازی شده بین ۲۷ تا ۳۵ درصد بود.



میانگین اندازه پروژه و میانگین ساعات ذخیره‌سازی پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

اگرچه با ثابت بودن سایر عوامل، تابش مستقیم خورشیدی بالاتر به ضریب ظرفیت بیشتری منجر می‌شود، اما همبستگی بسیار قوی‌تری بین ضریب ظرفیت و ساعات ذخیره‌سازی وجود دارد. با این حال، این تنها یک بخش از اقتصاد نیروگاه‌ها در مکان‌هایی با تابش مستقیم خورشیدی بالاتر است. تابش مستقیم خورشیدی بالاتر همچنین باعث کاهش اندازه میدان مورد نیاز برای ظرفیت پروژه می‌شود و در نتیجه اندازه سرمایه‌گذاری را نیز کاهش می‌دهد.



ضرایب ظرفیت، ساعات ذخیره‌سازی و منبع خورشیدی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

پیشرفت‌های تکنولوژی و کاهش هزینه‌های مرتبط با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نشان می‌دهد که ضریب ظرفیت بالاتر حتی در مناطقی با تابش مستقیم خورشیدی کم نیز قابل دستیابی است. داده‌های سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در حالی که میانگین تابش مستقیم خورشیدی در این سال کمتر از سال‌های گذشته بود، نیروگاه‌های تازه راه‌اندازی شده دارای میانگین وزنی ضریب ظرفیت ۴۲ درصد بوده‌اند، که نشان از بهبود عملکرد این فناوری در شرایط مختلف می‌دهد. در دوره قبلی، میانگین وزنی ضریب ظرفیت بین ۲۷ تا ۳۵ درصد برای نیروگاه‌های تازه راه‌اندازی شده بود.

❖ هزینه‌های عملیات و نگهداری

هزینه‌های عملیات و نگهداری نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز به طور قابل توجهی با فتوولتائیک خورشیدی و نیروگاه‌های باد خشکی متفاوت است و شامل هزینه‌هایی مانند بیمه و مدیریت دارایی‌ها می‌شود. این هزینه‌ها بسیار وابسته به تفاوت‌ها در تابش خورشیدی، طراحی نیروگاه، فناوری مورد استفاده، هزینه‌های نیروی کار و قیمت‌گذاری اجزا در هر بازار هستند. این تفاوت‌ها باعث می‌شود که هزینه‌های محلی نیز متفاوت باشند.

بزرگ‌ترین هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز مربوط به هزینه‌های تعویض گیرنده‌ها و آینه‌ها بوده است، اما با پیشرفت تکنولوژی و طراحی‌های جدید، نرخ خرابی این قطعات بهبود یافته و هزینه‌ها کاهش یافته است. علاوه بر این، هزینه‌های نیروی انسانی نیز جزء مهمی از هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز را تشکیل می‌دهد. خصوصاً به این دلیل که پیچیدگی مکانیکی و الکتریکی این نوع نیروگاه‌ها نسبت به فتوولتائیک خورشیدی بیشتر است. هزینه‌های بیمه نیز هنوز نقش مهمی در هزینه‌های عملیات و نگهداری دارد و معمولاً بین ۰.۵ درصد تا ۱ درصد از هزینه سرمایه اولیه نیروگاه را به خود اختصاص می‌دهد. هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز، به طور معمول در بازه ۰.۰۲ تا ۰.۰۴ دلار بر کیلووات ساعت قرار دارد. این امر می‌تواند یک تقریب خوب برای بازارهای مختلف باشد که در آن‌ها نیروگاه‌های

برق خورشیدی متمرکز در دهه ۲۰۱۰ ساخته شده‌اند. تحلیل‌های انجام شده توسط ایرنا نشان می‌دهد که هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز در بازارهای گوناگون، با توجه به اقتصادی‌تر شدن آن‌ها و بهبود در طیف وسیعی از بازارها، قابل رقابت است.

برآورد هزینه عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز در بازارهای منتخب، ۲۰۲۰-۲۰۱۹ (شامل بیمه)

Country	Parabolic trough collectors (2022 USD/kWh)	Solar tower (2022USD/kWh)
Argentina	0.028	0.026
Australia	0.030	0.029
Brazil	0.022	0.022
China	0.024	0.020
France	0.035	0.030
India	0.017	0.017
Italy	0.028	0.026
Mexico	0.018	0.017
Morocco	0.014	0.013
Russian Federation	0.027	0.025
Saudi Arabia	0.013	0.012
South Africa	0.014	0.013
Spain	0.027	0.025
Türkiye	0.020	0.018
United Arab Emirates	0.020	0.022
United States of America	0.027	0.024

در مقایسه با نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی و مزارع بادی خشکی، هزینه‌های عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز به طور مطلق بالاست. با این حال، این هزینه‌ها حدود ۱۸ درصد تا ۲۰ درصد از هزینه ترازنده برای پروژه‌های مشابه در کشورهای گروه ۲۰ را تشکیل می‌دهند. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، هزینه ترازنده عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز به طور متوسط ۴۱ درصد کاهش یافته است (از ۰.۰۳۷ دلار بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ به ۰.۰۲۲ دلار بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۲)، که نشان از بهبود در بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیات و نگهداری است.

❖ هزینه ترازنده برق

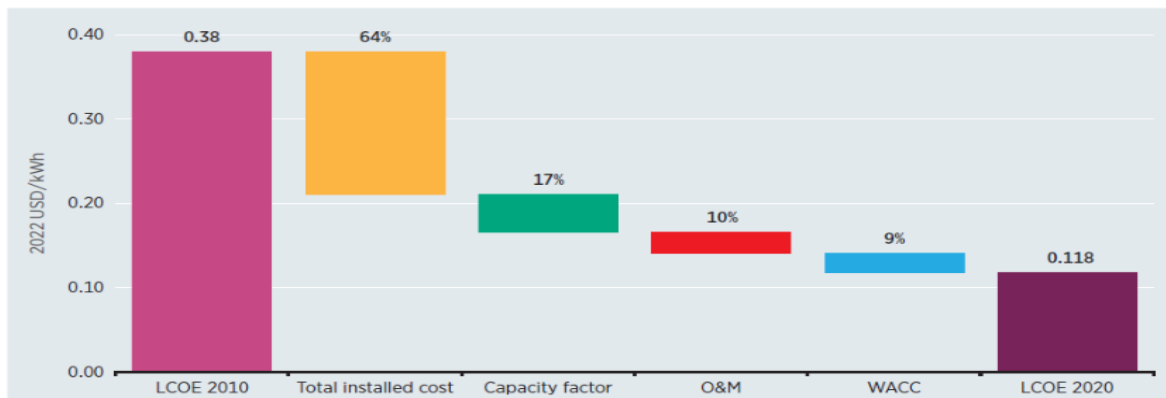
با کاهش هزینه‌های کل احداث، هزینه‌های عملیات و نگهداری و هزینه‌های مالی، به همراه افزایش ضریب ظرفیت، هزینه ترازنده برای نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی متمرکز (برق خورشیدی متمرکز) به طور قابل توجهی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ کاهش یافت. در واقع، در این دوره، میانگین وزنی جهانی هزینه ترازنده برای نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز تازه تأسیس، ۶۹ درصد کاهش یافت و از ۰.۳۸۰ دلار به ۰.۱۱۸ دلار به ازای هر کیلووات ساعت رسید. در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲، احداث و راه‌اندازی پروژه‌ها عمدتاً در اسپانیا و بیشتر شامل نیروگاه‌های کلکتور سهموی بود. در این دوره، میانگین وزنی جهانی هزینه ترازنده انرژی به ازای هر پروژه تنها به میزان کمی کاهش یافت. این وضعیت در سال ۲۰۱۳ تغییر کرد و یک روند نزولی واضح در هزینه ترازنده پروژه‌ها به وجود آمد؛ زیرا بازار گسترش یافت، تجربه بیشتری کسب شد و فرآیندهای تأمین رقابتی‌تر تأثیرگذار شدند. کاهش هزینه ترازنده پروژه‌ها از سال ۲۰۱۳ به بعد تنها به دلیل اثرات ارتقا تکنولوژی نبود، بلکه تغییر در احداث و راه‌اندازی پروژه‌ها به مناطقی با تابش مستقیم خورشیدی بالاتر در دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ نیز نقش داشت.



هزینه ترازشده برای پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز بر اساس فناوری و مدت زمان ذخیره سازی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹، کاهش هزینه‌ها ادامه یافت و راه‌اندازی پروژه‌های جدید، به ویژه در چین، نتایج قابل ملاحظه‌ای ایجاد کرد. در مقابل، هزینه‌های پروژه‌های راه‌اندازی شده در مراکش و آفریقای جنوبی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بیشتر بودند. محل قرار گرفتن پروژه‌ها در مناطق با تابش مستقیم خورشیدی بالاتر برای پروژه‌هایی که بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ راه‌اندازی شده‌اند، به عنوان عامل اصلی در افزایش ظرفیت و کاهش هزینه ترازشده عمل کرد. این دوره با میانگین وزنی تابش مستقیم خورشیدی حدود ۲۶۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال، (۲۸ درصد بیشتر از دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳)، همراه بود. این تحولات نشان می‌دهد که هم‌چنان تنها محرک بهبود فناوری نبوده و استراتژی احداث و راه‌اندازی نیز نقش مهمی در کاهش هزینه‌های نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز داشته است. در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، تنها تعداد معدودی نیروگاه تکمیل شد و هر سال حدود ۱۰۰ مگاوات به ظرفیت اضافه می‌شد. بنابراین نتایج برای این دو سال نوسانات زیادی داشت و تحت تأثیر هزینه‌های خاص هر نیروگاه بود. در سال ۲۰۱۶، افزایش هزینه ترازشده انرژی به دلیل هزینه‌های بالاتر پروژه‌های اولیه در آفریقای جنوبی و مراکش که در آن سال به بهره‌برداری رسیدند، رخ داد. در سال ۲۰۱۷، میانگین وزنی جهانی هزینه ترازشده به سطح تعیین شده در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ بازگشت. افزایش ظرفیت جدید در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ دوباره رونق گرفت و هر سال حداقل ۶۰۰ مگاوات به ظرفیت اضافه شد. در سال ۲۰۱۸، نیروگاه‌هایی در چین، مراکش و آفریقای جنوبی به بهره‌برداری رسیدند (با هزینه‌های ترازشده‌ای که از ۰.۰۸۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در چین تا ۰.۲۴۹ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در آفریقای جنوبی متغیر بود). در مقابل، سال ۲۰۱۹ شاهد هزینه ترازشده‌های بالاتری بود، زیرا دو پروژه اسرائیلی که با تأخیر مواجه شده بودند، آنلاین شدند. هزینه‌ها در آن سال از ۰.۱۱۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برای یک پروژه در چین تا ۰.۴۳۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برای پروژه کلکتورهای سهموی در اسرائیل متغیر بود. در سال ۲۰۲۰، ظرفیت احداث شده از ۱۵۰ مگاوات فراتر نرفت، هرچند هزینه‌های سرمایه‌ای پایین پروژه‌های انجام شده در چین، میانگین وزنی هزینه ترازشده برای آن سال را به ۰.۱۱۸ دلار به ازای هر کیلووات

ساعت کاهش داد. در سال ۲۰۲۱، مقدار هزینه ترازشده با ۲ درصد افزایش نسبت به سال ۲۰۲۰ به ۰.۱۲۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت رسید؛ هرچند این مقدار هنوز ۶۸ درصد کمتر از سال ۲۰۱۰ بود. با توجه به این موضوع، شکل زیر کاهش ۶۸ درصد میانگین وزنی جهانی هزینه ترازشده برای نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد و اجزای اصلی آن را بررسی می‌کند. بزرگ‌ترین سهم از کاهش‌ها با عدد ۶۴ درصد مربوط به کاهش هزینه کل احداث نیروگاه‌های برق خورشیدی متمرکز در این دوره بود. بهبودهای فناوری و کاهش هزینه‌ها در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، باعث بهبود ضریب ظرفیت شدند. این امر به نوبه خود، ۱۷ درصد از کاهش هزینه ترازشده را در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ تشکیل می‌دهد. هزینه‌های عملیات و نگهداری کمتر، ۱۰ درصد از کل کاهش هزینه ترازشده در آن زمان را به خود اختصاص داد، در حالی که کاهش میانگین وزنی هزینه سرمایه ۹ درصد باقی‌مانده را تشکیل داد. همچنین باید به نقش توسعه‌دهندگان با تجربه بیشتر در کاهش هزینه‌ها در هر مرحله از توسعه، ساخت و راه‌اندازی اشاره کرد.



کاهش هزینه ترازشده برای پروژه‌های برق خورشیدی متمرکز، ۲۰۱۰-۲۰۲۰

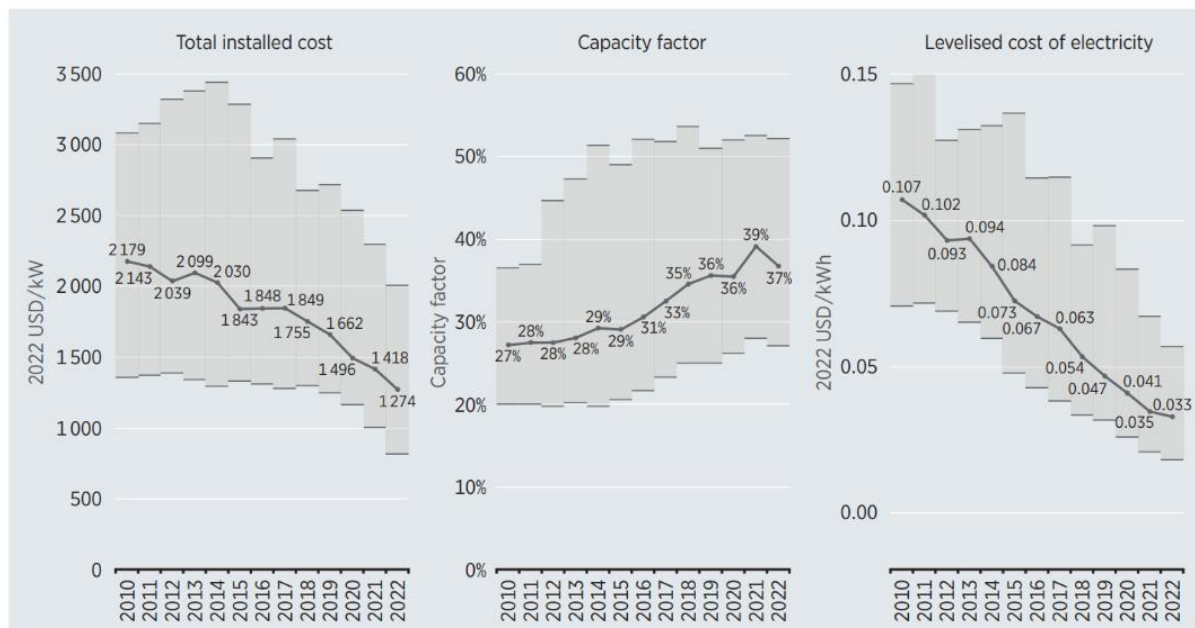
این تحلیل برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱، با توجه به ساختار هزینه احداث بالا و ضریب ظرفیت بالای پروژه سال ۲۰۲۱ در شیلی، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این موضوع، ضریب ظرفیت به عنوان عامل اصلی (۷۷ درصد) در کاهش هزینه‌ها بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ نقش دارد. هزینه‌های پایین‌تر عملیات و نگهداری یک دهم از کاهش را به خود اختصاص می‌دهند و کاهش در میانگین وزنی جهانی هزینه‌های احداث ۷ درصد را تشکیل می‌دهد. بهبود در میانگین وزنی هزینه سرمایه ۶ درصد از کل کاهش هزینه ترازشده در این دوره را شامل می‌شود. باید توجه داشت در غیاب سیاست‌های حمایتی قوی برای برق خورشیدی متمرکز، بازار کوچک باقی‌مانده و برنامه‌های جدید نیز جاه‌طلبانه نیستند. این امر با توجه به موفقیت چشمگیر در کاهش هزینه‌ها از سال ۲۰۱۰، علیرغم اینکه تنها ۶.۴ گیگاوات تا پایان سال ۲۰۲۱ در سطح جهانی احداث شده است، ناامیدکننده است. با توجه به رشد رقابت‌پذیری انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر از سال ۲۰۱۰، ارزش توانایی برق خورشیدی متمرکز در ارائه برق قابل توزیع شبانه‌روزی تنها در مناطق با تابش مستقیم خورشیدی بالا و با هزینه معقول رو به افزایش است. سیاست حمایتی بیشتر می‌تواند در کاهش بیشتر هزینه‌ها مؤثر باشد.

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه‌های بادی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



فناوری توربین‌های بادی ساحلی در دهه گذشته پیشرفت چشم‌گیری داشته است. توربین‌های بزرگ‌تر و قابل‌اطمینان‌تر، همراه با ارتفاع هاب بیشتر و قطر روتور بزرگ‌تر، برای افزایش ضریب ظرفیت ۵۳ طراحی شده‌اند. علاوه بر این پیشرفت‌های فناوری، کل هزینه‌های احداث، هزینه‌های عملیات و نگهداری و هزینه تراز شده، به دلیل صرفه‌جویی در مقیاس، افزایش رقابت‌پذیری و بلوغ فزاینده بخش بادی، کاهش یافته است. در سال ۲۰۲۲، گستره احداث باد ساحلی پس از فتوولتائیک خورشیدی دومین بازار بود. چین همچنان بزرگ‌ترین بازار باد را در دست داشته است. امروزه تقریباً تمام توربین‌های بادی خشکی محور افقی هستند که عمدتاً از سه پره استفاده می‌کنند و پره‌ها در جهت باد قرار می‌گیرند. قراردادهای این پروژه‌ها معمولاً شامل برج‌ها، نصب و (به‌جز در چین) تحویل است. دیگر دسته‌بندی‌های عمده هزینه شامل هزینه‌های نصب، اتصال به شبکه و هزینه‌های توسعه است. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و سایر هزینه‌های موردنیاز برنامه‌ریزی، هزینه‌های پروژه و هزینه‌های زمین نیز هستند که این هزینه‌ها کمترین سهم را از کل هزینه احداث نشان می‌دهند.

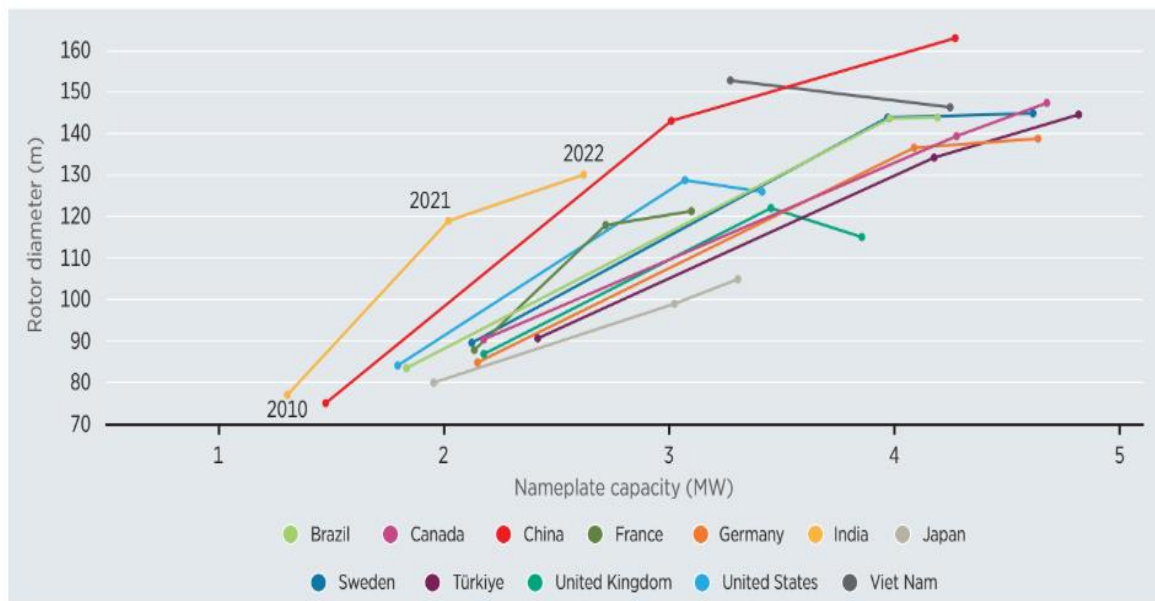


میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت و هزینه تراز شده برای توربین‌های بادی احداث شده در خشکی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ ویژگی‌ها و هزینه‌های توربین بادی

سازندگان تجهیزات اصلی توربین‌های بادی^{۵۴} طیف گسترده‌ای از طرح‌ها را ارائه می‌دهند که برای ویژگی‌های مختلف سایت، دسترسی به شبکه و سیاست‌های لازم در مکان‌های متمایز در نظر گرفته شده‌اند. این تغییرات همچنین ممکن است شامل الزامات مختلف کاربری زمین و حمل‌ونقل و الزامات فنی و تجاری خاص توسعه‌دهنده باشد. این طرح‌ها توسط OEMها در مجموعه‌ای از پلتفرم‌ها به کار گرفته می‌شوند تا طرح‌های مختلفی را متناسب با هر سایت ارائه دهند و همچنین یک محرک مهم در کاهش هزینه‌ها باشند. پلتفرم‌ها این کار را با کاهش هزینه‌های توسعه محصول در تعداد بیشتری از توربین‌ها انجام می‌دهند، درحالی‌که انتخاب توربین را برای یک سایت خاص بهینه می‌کنند و هزینه تراز شده تولید برق را بیشتر کاهش می‌دهند. توربین‌های با قطر روتور بزرگ‌تر، جذب انرژی را در مکان‌هایی با سرعت باد یکسان افزایش می‌دهند. این امر، به‌ویژه در بهره‌برداری از مکان‌های حاشیه‌ای مفید است. علاوه بر این، ارتفاعات هاب بالاتر، امکان دسترسی به سرعت باد بالاتر در همان مکان را فراهم می‌کند؛ به این ترتیب، دامنه مکان‌های مناسب برای توربین‌های بادی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، ارتفاع هاب بلندتر به معنای افزایش فاصله بین نوک پرها و زمین است که امکان نصب در مناطق جنگلی خاص را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه توان تولیدی به عنوان تابعی مکعبی از سرعت باد افزایش می‌یابد، این پیشرفت‌ها می‌توانند ضریب ظرفیت بالاتری را به همراه داشته باشند. ظرفیت توربین بالاتر همچنین امکان احداث پروژه‌های بزرگ‌تر را فراهم می‌کند و کل هزینه احداث در واحد برای برخی از اجزای هزینه را کاهش می‌دهد.

⁵⁴ Original Equipment Manufacturers (OEMs)

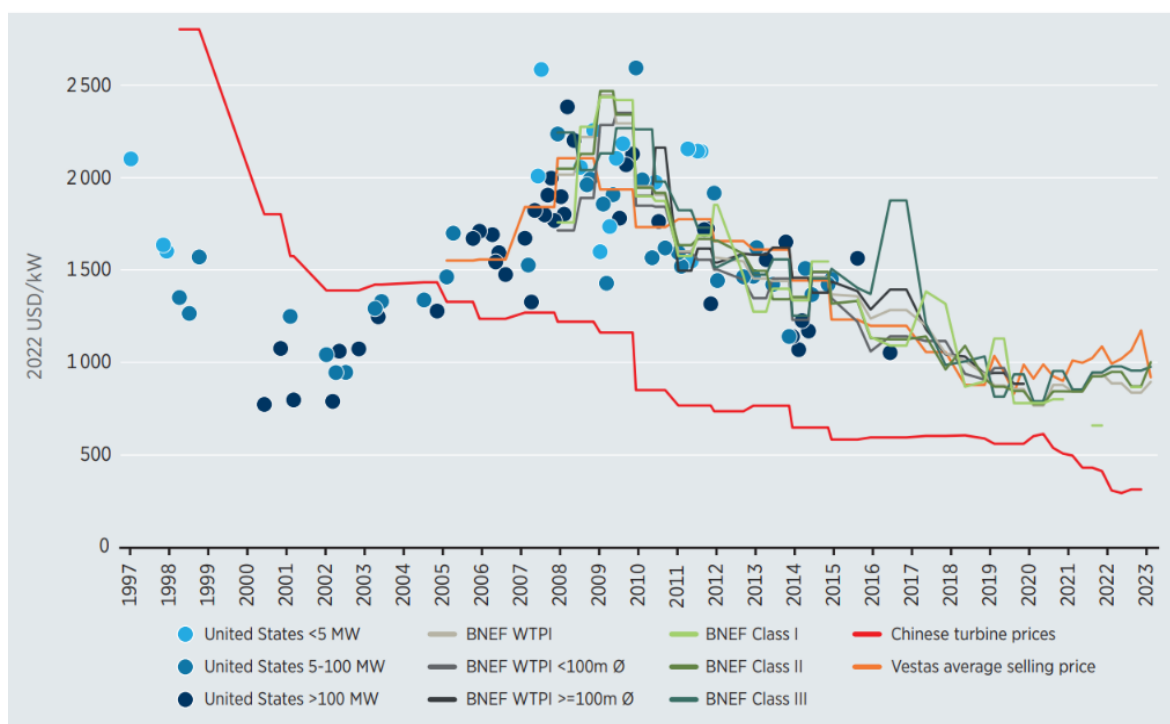


میانگین وزنی قطر روتور توربین‌های بادی در خشکی و تکامل ظرفیت نامی ۵۵، ۲۰۱۰-۲۰۲۲

شکل فوق، تکامل میانگین توان توربین و قطر روتور را بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ در برخی از بازارهای عمده توربین‌های بادی در خشکی نشان می‌دهد. برزیل، کانادا، چین، آلمان، هند و سوئد با افزایش بیش از ۶۰ درصدی در میانگین قطر روتور پروژه‌های راه‌اندازی شده‌شان در طول دوره متمایز هستند. از نظر درصدی، بیشترین افزایش ظرفیت توربین در چین (۱۹۰ درصد) و پس از آن برزیل (۱۲۹ درصد)، سوئد (۱۱۸ درصد)، آلمان (۱۱۶ درصد) و کانادا (۱۱۸ درصد) مشاهده شد. بیشترین افزایش قطر روتور نیز در چین (۱۱۸ درصد)، برزیل (۷۲ درصد)، هند (۶۹ درصد) و کانادا رخ داده است. از میان کشورهایی که در شکل فوق پوشش داده شده است، در سال ۲۰۲۲، ترکیه از کانادا پیشی گرفت تا بزرگ‌ترین توان توربین را داشته باشد. هم‌چنین، چین بزرگ‌ترین قطر روتور توربین را با میانگین ۱۶۱ متر داشت. در سال ۲۰۲۲، هند با ۲۶ وات کمترین توان توربین را داشت، درحالی‌که ژاپن با میانگین ۱۰۵ متر، کمترین میانگین قطر روتور را داشت. به‌طور کلی، در سال ۲۰۲۲، میانگین ظرفیت توربین در سطح کشورها از ۲۶ مگاوات تا ۴۸ مگاوات متغیر بود که در هر دو انتهای بازه، به‌طور قابل توجهی بالاتر از ۲۰ مگاوات تا ۴۳ مگاوات در سال ۲۰۲۱ بود. در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی قطر روتور کشورها از ۱۰۵ متر تا ۱۶۳ متر باز هم، بیشتر از ۹۹ متر تا ۱۴۷ متر ثبت شده در سال ۲۰۲۱ بود.

قیمت توربین‌های بادی بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ به پایین‌ترین حد قبلی خود رسید و به دنبال آن قیمت‌ها افزایش یافت. این امر به افزایش قیمت کالاها (به‌ویژه سیمان، مس، آهن و فولاد)، چالش‌های زنجیره تأمین و بهبود در طراحی توربین، با معرفی مدل‌های بزرگ‌تر و کارآمدتر به بازار نسبت داده شد. با این حال، به دلیل افزایش حمایت از سیاست انرژی تجدیدپذیر دولت‌ها برای احداث مزارع باد، این دوره همچنین با عدم تطابق قابل توجهی بین تقاضای بالا و عرضه کم مصادف شد. با این حال، با عمیق‌تر شدن زنجیره تأمین و رقابتی‌تر شدن و افزایش ظرفیت تولید، این

محدودیت‌های عرضه کاهش یافت و قیمت توربین‌های بادی به اوج رسید. اکثر بازارها بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ این اوج را تجربه کردند و سپس با میانگین سالانه بین ۴۹ تا ۶۴ درصد بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ کاهش یافتند. در سال ۲۰۲۲، قیمت‌های سه‌ماهه در بیشتر بازارهای اصلی پس از افزایش از پایین‌ترین سطح در سال ۲۰۲۰، به‌استثنای چین، در محدوده ۸۴۰ دلار بر کیلووات تا ۱۱۷۵ دلار بر کیلووات بود. بازار توربین چین همچنان با ریتم خاص خود حرکت می‌کند و فشارهای هزینه‌ای که در دو سال گذشته در سایر نقاط جهان احساس شده بود را متحمل نشده است. در سال ۲۰۲۲، برخلاف تجربه کشورهای دیگر، میانگین قیمت توربین‌های بادی چین به حدود ۳۱۰ دلار بر کیلووات کاهش یافت. بازار جهانی، به دلیل رشد قابل توجه در سال ۲۰۲۰ و محدودیت‌های زنجیره تأمین به دلیل کووید-۱۹، شاهد افزایش قیمت توربین‌های بادی در اواخر سال ۲۰۲۰ و اوایل سال ۲۰۲۱ بود و افزایش قیمت‌ها تا



سال ۲۰۲۲ نیز ادامه یافت.

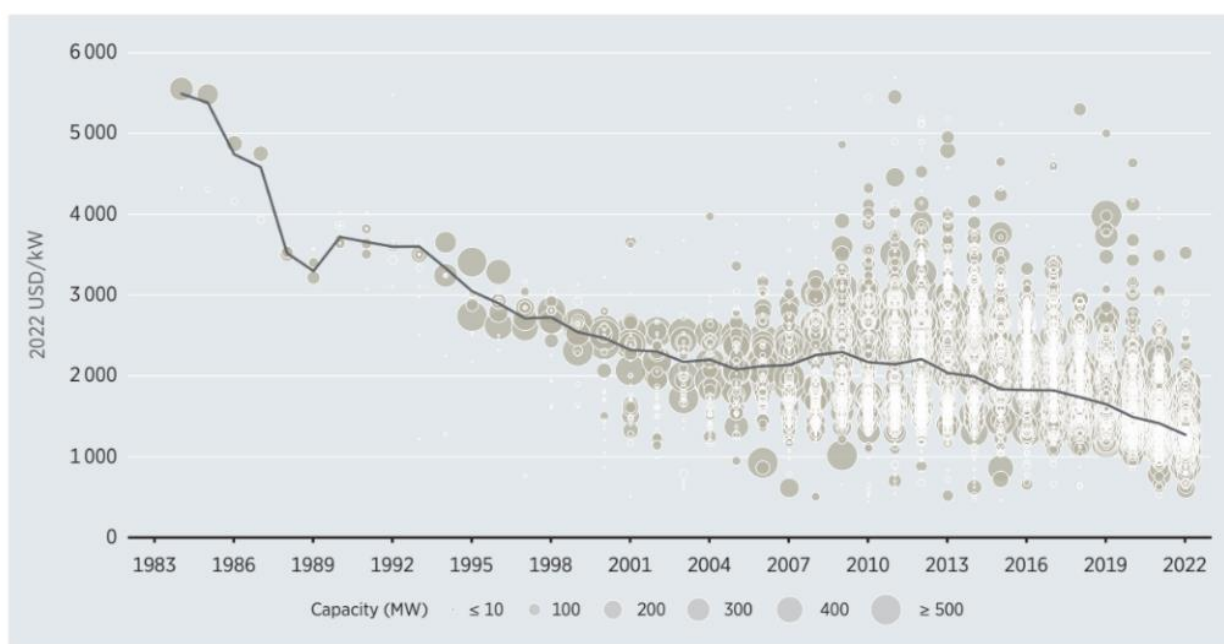
شاخص‌های قیمت توربین بادی و روند قیمت، ۱۹۹۷-۲۰۲۳

قیمت سه‌ماهه توربین^{۵۶} از ۸۴۰ دلار در کیلووات تا ۱۰۸۹ دلار در کیلووات برای سفارشات دریافتی (به‌استثنای چین) در سال ۲۰۲۱ متغیر بود. این محدوده در سال ۲۰۲۲ تا حدودی افزایش یافت و از ۸۴۰ دلار در کیلووات به ۱۱۷۵ دلار در کیلووات رسید. کاهش قیمت توربین در سطح جهانی طی دهه گذشته علیرغم افزایش قطر روتور، ارتفاع هاب و ظرفیت نامی رخ داده است. علاوه بر این، تفاوت قیمت بین توربین‌هایی با قطر روتورهای متفاوت در سال ۲۰۱۹ به میزان قابل توجهی کاهش یافت. با این حال، در اواخر سال ۲۰۲۰، شکاف بین توربین‌های بادی کلاس I و کلاس II و کلاس III شروع به بزرگ‌تر شدن کرد و تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشت.

⁵⁶ Quarterly Turbine Pricing

❖ کل هزینه‌های احداث

طبق داده‌های پایگاه داده هزینه تجدیدپذیر ایرنا^{۵۷}، بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی کل هزینه احداث پروژه‌های بادی خشکی در سطح جهانی حدود ۷۴ درصد یعنی از ۵۴۹۶ دلار در کیلووات به ۱۲۷۴ دلار در کیلووات کاهش یافت. در این دوره، میانگین کل هزینه‌های احداث جهانی به ازای هر دو برابر شدن ظرفیت تجمعی بادی خشکی در سطح جهان، حدود ۹ درصد کاهش یافت. این کاهش به دلیل کاهش قیمت توربین بادی و کاهش هزینه‌های تراز نیروگاه^{۵۸} بوده است. بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی کل هزینه احداث باد خشکی ۴۲ درصد کاهش یافت و از ۲۱۷۹ دلار در کیلووات به ۱۲۷۴ دلار در کیلووات، با کاهش ۱۰ درصدی سال‌به‌سال در سال ۲۰۲۲ رسید.

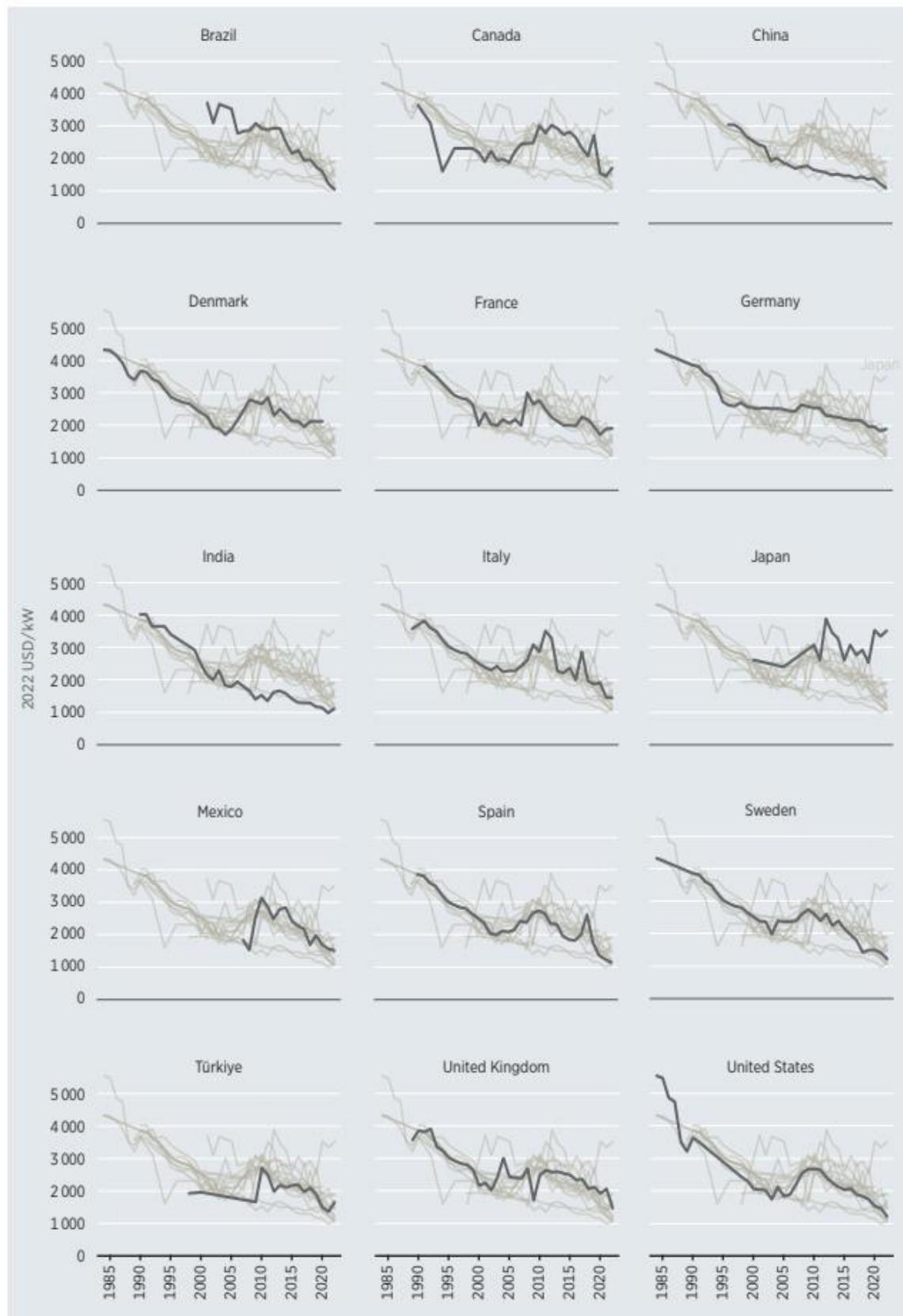


مجموع هزینه‌های احداث پروژه‌های بادی خشکی و میانگین وزنی جهانی، ۱۹۸۴-۲۰۲۲

شکل بعد، روند میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث برای ۱۵ کشور در بازه‌های زمانی مشخص و متفاوت، که بازارهای اصلی باد هستند و داده‌های سری زمانی قابل توجهی دارند، نشان می‌دهد. کشورها شاهد طیف وسیعی از کاهش هزینه‌ها بودند (از ۷۸ درصد در ایالات متحده تا ۱۴ درصد در ترکیه). ایالات متحده (با کاهش ۷۸ درصدی) و پس از آن برزیل، هند و سوئد (همه با ۷۲ درصد کاهش) بیشترین کاهش را در مجموع هزینه‌های احداث در بازه زمانی مربوطه داشتند. پس از آن نیز، اسپانیا ۷۰ درصد و چین ۶۴ درصد کاهش داشته‌اند. علاوه بر این، طیف گسترده‌ای از هزینه‌های احداث هر پروژه در داخل یک کشور و منطقه وجود دارد. این امر به دلیل شرایط مختلف کشور و سایت مانند: محدودیت‌های لجستیکی برای حمل و نقل، سیاست‌های محلی، محدودیت‌های کاربری زمین، هزینه‌های نیروی کار و عوامل دیگر است.

⁵⁷ IRENA

⁵⁸ Balance-Of-Plant Cost



مجموع هزینه های احداث پروژه های بادی خشکی در ۱۵ کشور، ۱۹۸۴-۲۰۲۲

	2010			2022		
	5 th percentile	Weighted average	95 th percentile	5 th percentile	Weighted average	95 th percentile
	(2022 USD/kW)					
Africa	1 530	1 728	2 260	1 525	1 685	2 110
Central America and the Caribbean*	2 801	2 970	3 127	1 694	1 694	1 694
Eurasia	2 711	2 711	2 711	1 343	1 650	2 398
Europe	1 960	2 693	3 929	990	1 626	1 998
North America	2 099	2 743	3 562	987	1 285	1 907
Oceania	3 339	3 903	4 291	1 069	1 361	1 893
Other Asia	2 055	2 789	3 061	1 216	1 715	3 389
Other South America	2 513	2 739	2 863	892	1 305	1 504
Brazil	2 633	2 926	3 219	677	1 052	1 960
China	1 403	1 663	1 946	902	1 103	1 534
India	996	1 537	1 790	950	1 122	1 246

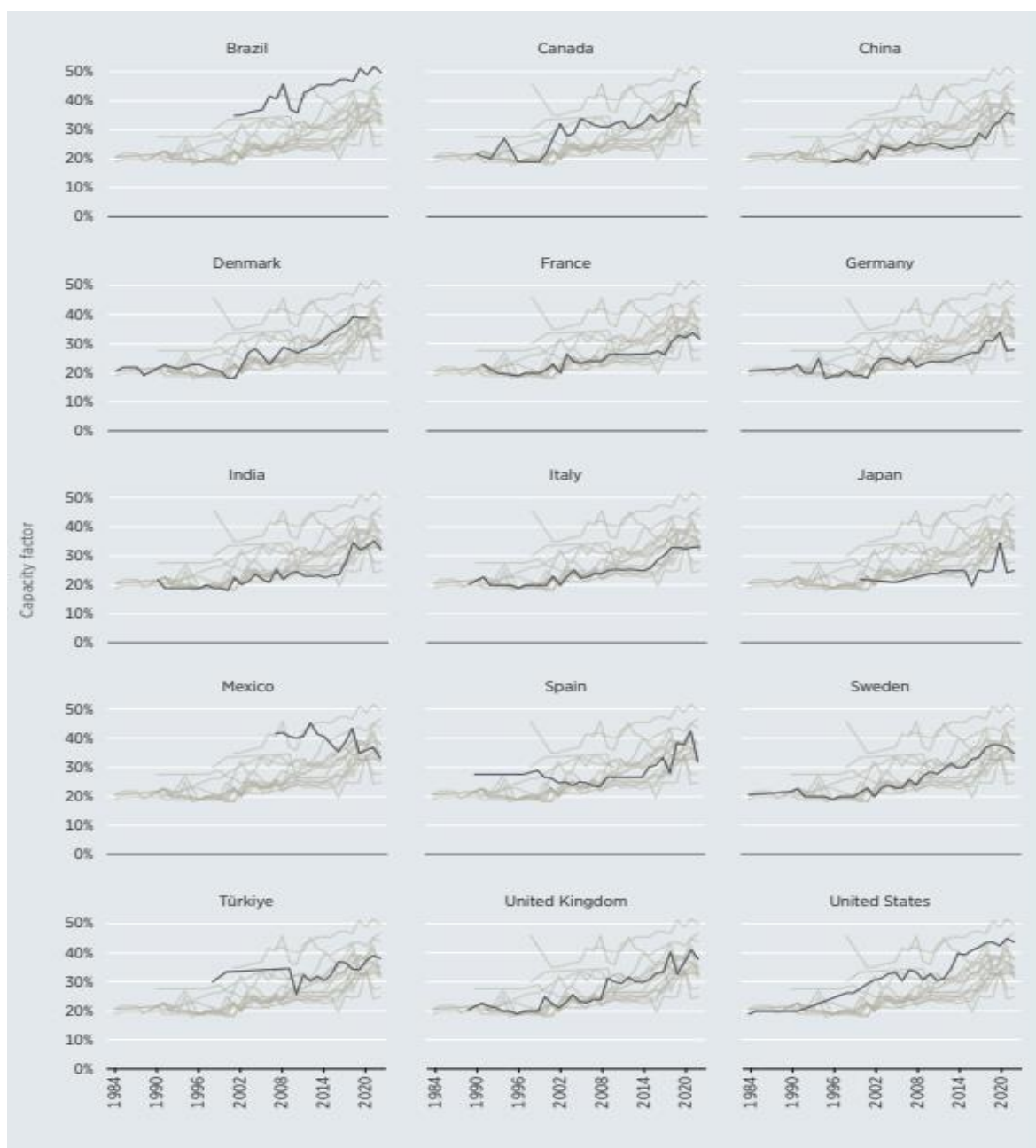
محدوده هزینه احداث و میانگین وزنی برای پروژه‌های بادی خشکی بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

❖ ضریب ظرفیت^{۵۹}

ضریب ظرفیت نشان‌دهنده انرژی خروجی سالانه یک مزرعه بادی است که به صورت درصدی از حداکثر خروجی مزرعه بیان می‌شود. این معیار توسط دو عامل تعیین می‌شود: کیفیت منبع بادی که مزرعه بادی در آن قرار دارد و توربین و فناوری تراز نیروگاه^{۶۰} مورد استفاده. گرایش به سمت فن‌آوری‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر توربین با قطر روتور و ارتفاع هاب بزرگ‌تر، در ده سال گذشته شاهد افزایش بازده انرژی و ضریب ظرفیت در بیشتر بازارها بوده است. درواقع، میانگین وزنی ضریب ظرفیت جهانی برای باد خشکی بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۲، ۹۳ درصد افزایش یافته است. تاثیر پیشرفت‌های مداوم فناوری، توربین‌های بزرگ‌تر، ارتفاع هاب بالاتر و مزارع بزرگ‌تر همچنان ادامه دارد. بااین‌حال، توازن احداث مزارع در سراسر جهان و کیفیت منابع آن، همیشه تأثیر قابل توجهی بر میانگین وزنی جهانی ضریب ظرفیت خواهد داشت. بنابراین تنوع گسترده‌ای در ضریب ظرفیت در بین بازارها باقی می‌ماند. این امر عمدتاً به دلیل کیفیت‌های متفاوت منابع بادی است و به میزان کمتری ناشی از فناوری‌های مختلف مورد استفاده و پیکربندی‌های مختلف سایت است. همه بهبودهای ضریب ظرفیت نیز نتیجه پیشرفت فناوری توربین نیست؛ بلکه به این دلیل است که پیشرفت‌ها در سنجش‌ازدور و محاسبات، ارزیابی منابع بادی و مکان‌یابی توربین‌ها را برای به حداقل رساندن تلفات تسهیل کرده است. این پیشرفت‌ها امکان انتخاب مکان‌های بادی بهتر و چیدمان بهتر مزارع بادی را برای خروجی بهینه انرژی فراهم کرده است.

⁵⁹ Capacity Factors

⁶⁰ Balance-of-Plant Technology



شکل ۱- تکامل تاریخی ضریب ظرفیت باد خشکی برای احداث مزارع بادی جدید در ۱۵ کشور، ۱۹۸۴-۲۰۲۲

شکل فوق، تکامل تاریخی ضرایب ظرفیت باد خشکی را برای پروژه‌های تازه راه‌اندازی شده در هر سال در ۱۵ بازاری که ایرنا دارای طولانی‌ترین داده‌های سری زمانی است، نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که میانگین ضرایب ظرفیت برای ۱۵ کشور مورد بررسی افزایش یافته است. به عنوان مثال، در ایالات متحده، بین سال ۱۹۸۴ (زمانی که اولین پروژه راه‌اندازی شد) و ۲۰۲۲، ضریب ظرفیت ۱۳۱ درصد افزایش یافت. در کشورهای دیگر، در کانادا، چین، دانمارک و بریتانیا، ضریب ظرفیت بین اولین تاریخ احداث تا سال ۲۰۲۲ بیش از ۷۰ درصد افزایش یافته است. برزیل، مانند ایالات متحده، دارای منابع بادی خشکی بسیار خوبی است. در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، پروژه‌های جدید در برزیل بالاترین میانگین وزنی ضریب ظرفیت را در بین ۱۵ کشور مورد بررسی به ترتیب با ۵۲ و ۵۰ درصد داشتند.

میانگین ضرایب ظرفیت کشورها برای باد خشکی جدید، ۲۰۱۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲

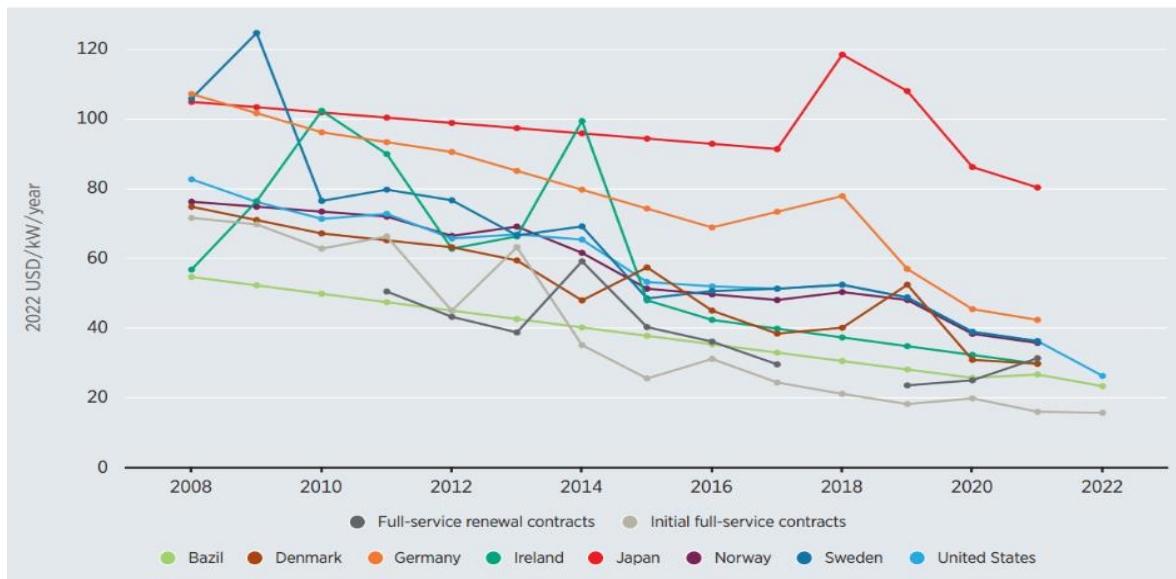
	2010	2021	2022
	%		
Brazil	36	52	50
Canada	32	45	47
China	25	36	35
Denmark	27	39*	39*
France	26	34	32
Germany	24	28	28
India	25	35	33
Italy	25	33	33
Japan	24	24	25
Mexico	40	37	33
Spain	27	43	32
Sweden	29	37	35
Türkiye	26	39	38
United Kingdom	30	41	38
United States	33	45	44

جدول فوق، تغییرات جدیدتری را در ضریب ظرفیت برای پروژه‌های راهاندازی شده در همان ۱۵ کشور برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. به‌استثنای مکزیک، همه کشورها در ضریب ظرفیت میانگین وزنی خود بهبودهایی را تجربه کردند. کانادا و ترکیه بیشترین افزایش را در ضریب ظرفیت برای پروژه‌های تازه احداث‌شده تجربه کردند که به ترتیب ۴۷ و ۴۶ درصد در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ افزایش یافتند. در مجموع، ۷ کشور از ۱۵ کشور نشان داده شده، حداقل ۳۲ درصد بهبود و ۱۰ کشور از ۱۵ کشور ۲۱ درصد یا بیشتر بهبود داشته‌اند.

❖ هزینه‌های عملیاتی و نگهداری^{۶۱}

هزینه‌های عملیاتی و نگهداری برای باد خشکی اغلب تا ۳۰ درصد از هزینه ترازشده برق برای این فناوری را تشکیل می‌دهد. با این حال، پیشرفت‌های فناوری، رقابت بیشتر بین ارائه‌دهندگان خدمات، و افزایش تجربه اپراتور و ارائه‌دهنده خدمات باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری می‌شود. و این روند منجر به بهبود قراردادهای خدمات پشتیبانی می‌گردد. چنین توافقی‌هایی حاشیه سود بالاتری نسبت به عرضه توربین، فراهم می‌آورد. با این وجود، سهم بازار هزینه‌های عملیاتی و نگهداری تحت پوشش سازندگان تجهیزات اصلی توربین همچنان در حال کاهش است. صاحبان تجهیزات به‌طور فزاینده‌ای تعداد عمده خدمات عملیاتی و نگهداری را به عهده می‌گیرند یا از ارائه‌دهندگان خدمات مستقل برای کاهش هزینه‌ها استفاده می‌کنند.

⁶¹ Operation And Maintenance Costs(O&M)



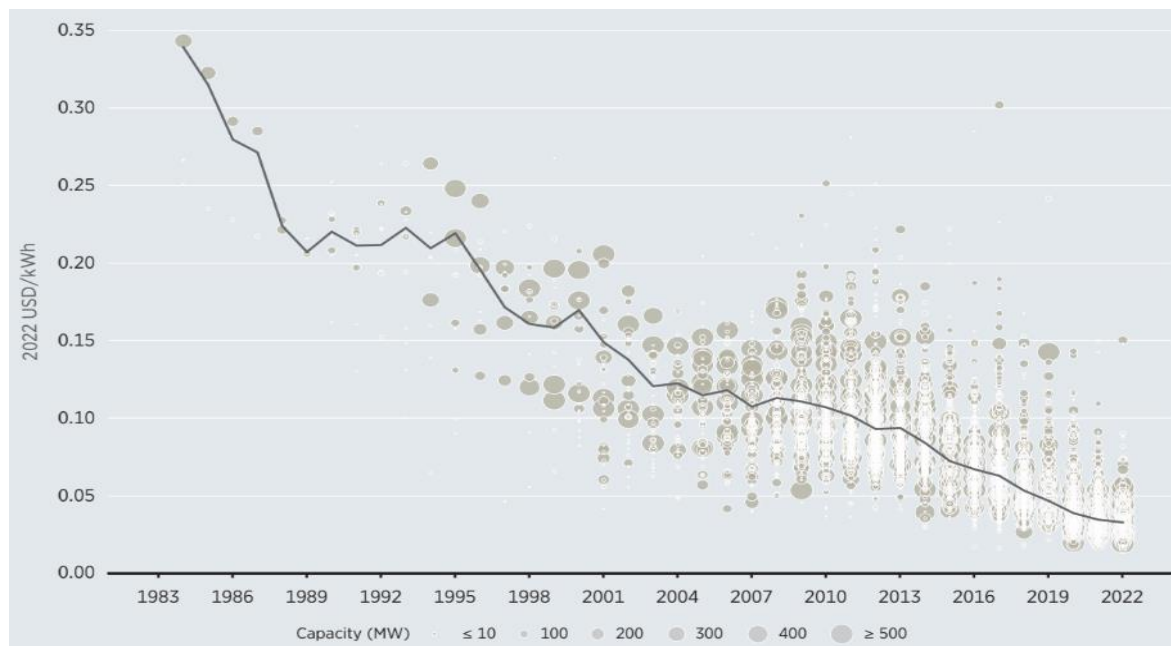
هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در برزیل، دانمارک، آلمان، ایرلند، ژاپن، نروژ، سوئد و ایالات متحده، ۲۰۲۲-۲۰۰۸

داده‌ها یک روند نزولی قابل مشاهده در هزینه‌های خدمات عملیات و نگهداری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده بلوغ و رقابت‌پذیری بازار است. قراردادهای خدمات کامل اولیه بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، حدود ۷۵ درصد کاهش یافت، در حالی که قراردادهای تمدید خدمات کامل بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ به میزان ۳۸ درصد کاهش یافت. در سطح کشورها، در سال ۲۰۲۱، هزینه‌های خدمات عملیات و نگهداری، برای باد خشکی از ۳۰ دلار به ازای هر کیلووات در سال در دانمارک تا ۸۱ دلار در کیلووات در سال در ژاپن، و حدود ۴۱ دلار در کیلووات در سال در آلمان (کشوری که به دلیل داشتن هزینه‌های خدمات عملیات و نگهداری بادی خشکی بالاتر از متوسط در اروپا شناخته شده است)، متغیر بود. تفاوت بین قیمت‌های قراردادی و هزینه‌های مشاهده‌شده خدمات عملیات و نگهداری کشورها با هزینه‌های اضافی و عمدتاً عملیاتی که توسط قراردادهای خدماتی پوشش داده نمی‌شوند (مانند بیمه، پرداخت‌های اجاره زمین، مالیات‌های محلی و سایر عوامل) توضیح داده می‌شود.

❖ هزینه ترازشده برق^{۶۲}

هزینه ترازشده یک مزرعه بادی خشکی توسط مجموع هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت، طول عمر، هزینه‌های عملیات و نگهداری، طول عمر اقتصادی پروژه و هزینه سرمایه تعیین می‌شود. در حالی که همه این عوامل در تعیین هزینه ترازشده یک پروژه مهم هستند، برخی از مؤلفه‌ها تأثیر بیشتری نسبت به سایرین دارند. به عنوان مثال، هزینه توربین (شامل برج‌ها) مهم‌ترین جزء هزینه‌های احداث در یک پروژه برق بادی خشکی را تشکیل می‌دهد. در سال ۲۰۲۲، هزینه‌های خدمات عملیات و نگهداری که شامل اجزای ثابت و متغیر است، معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ درصد هزینه ترازشده برای اکثر پروژه‌ها را تشکیل می‌دهد. کاهش در هزینه‌های خدمات عملیات و نگهداری در کاهش هزینه ترازشده به‌طور فزاینده‌ای مهم بوده است.

⁶² LEVELISED COST OF ELECTRICITY (LCOE)



هزینه ترازشده پروژه‌های بادی خشکی و میانگین وزنی جهانی، ۱۹۸۴-۲۰۲۲

شکل فوق، تکامل هزینه ترازشده باد خشکی را بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. در آن دوره، میانگین وزنی جهانی هزینه ترازشده ۹۰ درصد کاهش یافته است و از ۰.۳۳۹ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت رسید. در سال ۲۰۱۰، هزینه ترازشده ۰.۱۰۷ دلار در کیلووات ساعت بود، به این معنی که طی دهه منتهی به سال ۲۰۲۲، کاهش ۶۹ درصدی داشته است. در نتیجه، باد خشکی اکنون به‌طور فزاینده‌ای با فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس کاربردی به‌عنوان رقابتی‌ترین فناوری تجدیدپذیر بدون حمایت مالی رقابت می‌کند و از منابع تجدیدپذیر بالغ‌تر انرژی زیست‌توده، زمین‌گرمایی و نیروگاه آبی پیشی می‌گیرد.

❖ عوامل کاهش میانگین وزنی جهانی هزینه ترازشده برق بادی خشکی

- **پیشرفت‌های فناوری توربین:** با افزایش اندازه توربین و مساحت جاروب شده^{۶۳}، فرآیند بهینه‌سازی قطر روتور و توان توربین، یعنی توان ویژه^{۶۴}، منجر به افزایش بازده انرژی و در نتیجه سودبخشی بیشتر پروژه برای مالک دارایی، بسته به ویژگی‌های سایت شده است. علاوه بر این، بهینه‌سازی طراحی سایت برای بهره‌برداری بهتر از منابع بادی و کاهش تلفات خروجی ناشی از تلاطم، با بهبود خصوصیات منابع بادی و نرم‌افزار طراحی پروژه رایج‌تر شده است. در نتیجه، این امر باعث افزایش بازده انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در واحد ظرفیت و کاهش هزینه ترازشده برق بادی شده است.
- **صرفه‌جویی در مقیاس^{۶۵}:** صرفه‌جویی در مقیاس در باد خشکی در دو بعد عمل می‌کند: فعال کردن حجم تولید بیشتر و هاب‌های تولید منطقه‌ای، و کاهش هزینه‌ها. همچنین بر مقیاس توربین و پروژه نیز پرداخته شده

⁶³ Swept areas

⁶⁴ Specific power

⁶⁵ Economies of scale

است. پروژه‌های بزرگ‌تر به کاهش هزینه‌های توسعه پروژه و هزینه‌های عملیات و نگهداری کمک می‌کنند و درعین حال قدرت خرید بیشتری را برای تمام جنبه‌های پروژه ایجاد می‌کنند. در همین حال، کاهش تعداد توربین‌های موردنیاز برای یک پروژه به دلیل ظرفیت‌های بالاتر توربین میسر شده است. بنابراین، توربین‌های بزرگ‌تر در کاهش تعداد نصب، کمک‌کننده هستند.

- **هزینه‌های خدمات عملیاتی و نگهداری:** فن‌آوری‌های دیجیتال امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها و بازرسی‌های مستقل را فراهم کرده است. بهبودهایی در قابلیت اطمینان و دوام توربین‌های جدید نیز به این امر پیوسته است. همچنین، توربین‌های بزرگ‌تر تعداد توربین‌ها را برای یک ظرفیت معین کاهش داده‌اند. بهبود شیوه‌های عملیات و نگهداری نیز به کاهش هزینه‌های آن کمک کرده است. علاوه بر این، شرکت‌های بیشتری وارد بخش خدمات عملیات و نگهداری برای باد خشکی شده‌اند که باعث افزایش رقابت و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

- **تدارکات رقابتی^{۶۶}:** تغییر از طرح‌های تعرفه تضمینی^{۶۷} به مزایده‌های رقابتی، منجر به کاهش بیشتر هزینه‌ها می‌شود. چراکه این تغییر باعث رقابت در سراسر زنجیره تأمین (از توسعه به عملیات و نگهداری) در مقیاس محلی و جهانی می‌شود. برای تولیدکنندگان توربین، زنجیره تأمین نیز به سمت حمایت از هاب‌ها و کشورهای منطقه حرکت کرده است و هزینه‌های نیروی کار و تحویل را به حداقل می‌رساند و رقابت را بیش‌ازپیش بهبود می‌بخشد. بلوغ رو به رشد بازار بادی خشکی (احداث تجمعی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ به میزان ۷۵۹ گیگاوات افزایش یافت) را نیز نباید نادیده گرفت. افزایش تجربه عملیاتی و مقررات و سیاست‌های مطلوب دولت‌ها، توسعه پروژه و خطرات عملیاتی برای مزارع باد خشکی را کاهش داده است. این خطرات اکنون با اقدامات کاهشی کافی بهتر درک شده‌اند. بااین حال، در بسیاری از بازارها، چالش‌های جدیدی پدید آمده‌اند که روند احداث مزارع بادی جدید را کند کرده و هزینه‌ها را بالاتر از انتظار، افزایش داده است. در اروپا، به‌ویژه، فرآیندهای اخذ مجوز و تأیید زیست‌محیطی به‌عنوان یک وقفه در تسریع احداث مزارع جدید باد خشکی عمل می‌کند. از تلاش‌ها برای رسیدگی به این مسائل در تعدادی از بازارها و توسط کمیسیون اروپا خبر داده شده، اما تاکنون موفقیت چندانی حاصل نشده است.

در سال ۲۰۲۲، بالاترین میانگین وزنی هزینه تراز شده برای پروژه‌های راه‌اندازی شده بر اساس منطقه، ۰.۰۵۵ دلار در کیلووات ساعت در رده آسیایی (آسیا به‌استثنای چین و هند) بود. پروژه‌هایی که در برزیل و چین راه‌اندازی شده بودند، کمترین میانگین وزنی هزینه تراز شده را با ۰.۰۲۴ دلار در کیلووات ساعت و ۰.۰۲۷ دلار در کیلووات ساعت داشته‌اند. بیشترین کاهش هزینه تراز شده بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ در برزیل رخ داده بود (کاهش ۷۹ درصدی از ۰.۱۱۶ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۲۴ دلار در کیلووات ساعت). اقیانوسیه دومین کاهش هزینه تراز شده را در مدت مشابه با ۷۶ درصد داشت. آمریکای شمالی ۷۳ درصد و اروپا نیز ۶۷ درصد کاهش داشته‌اند.

به طور کلی بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه تراز شده برق بادی خشکی ۶۹ درصد کاهش یافت و از ۰.۱۰۷ دلار در کیلووات ساعت به ۰.۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت رسید. در سال ۲۰۲۲، هزینه تراز شده حدود ۵ درصد نسبت به سال قبل کاهش پیدا کرد.

^{۶۶} Competitive procurement

^{۶۷} Feed-in-tariff

در سال ۲۰۲۲، حدود ۵۹ گیگاوات از پروژه‌های بادی خشکی جدید راه‌اندازی شده دارای هزینه تراز شده کمتر از میانگین وزنی هزینه برق سوخت فسیلی بر اساس کشور/منطقه بودند. این میزان، ۸۷ درصد از ظرفیت جدید بادی خشکی اضافه‌شده در سال ۲۰۲۲ بود. ظرفیت تجمعی جهانی باد خشکی طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ تقریباً پنج برابر شد و از ۱۷۸ گیگاوات به ۸۳۷ گیگاوات رسید.

میانگین وزنی منطقه‌ای هزینه تراز شده و محدوده برای باد خشکی در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

	2010			2022		
	5 th percentile	Weighted average	95 th percentile	5 th percentile	Weighted average	95 th percentile
	(2022 USD/kW)					
Africa	0.070	0.073	0.096	0.044	0.046	0.051
Central America and the Caribbean	0.096	0.096	0.096			
Eurasia	0.135	0.135	0.135	0.042	0.052	0.071
Europe	0.090	0.137	0.206	0.029	0.045	0.059
North America	0.070	0.109	0.148	0.025	0.029	0.047
Oceania	0.121	0.136	0.148	0.027	0.033	0.042
Other Asia	0.113	0.155	0.169	0.038	0.055	0.145
Other South America	0.096	0.112	0.145	0.034	0.053	0.063
Brazil	0.116	0.116	0.116	0.017	0.024	0.030
China	0.071	0.087	0.110	0.024	0.027	0.035
India	0.060	0.096	0.119	0.032	0.037	0.042

میانگین وزنی جهانی کل هزینه احداث باد خشکی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، ۴۲ درصد کاهش یافت و از ۲۱۷۹ دلار در کیلووات به ۱۲۷۴ دلار در کیلووات رسید. در سال ۲۰۲۲، به دلیل تداوم کاهش هزینه‌ها در چین، این فاکتور، ۱۰ درصد نسبت به سال ۲۰۲۱ کاهش یافت. با این حال، بسیاری از بازارها (از جمله بازارهای کانادا، فرانسه، آلمان، هند، ژاپن، ترکیه و تعدادی از بازارهای کوچک‌تر) شاهد افزایش هزینه در سال ۲۰۲۲ بودند، زیرا قیمت توربین‌های بالاتر (خارج از چین) بر هزینه‌های پروژه تأثیر گذاشت. در سال ۲۰۲۲، متوسط قیمت توربین‌های بادی خشکی (به‌استثنای چین) بین ۸۷۰ دلار در کیلووات و ۱۰۶۶ دلار در کیلووات بود که به‌طور قابل توجهی بیشتر از سال ۲۰۲۱ بود. با وجود این افزایش، تا سال ۲۰۲۲، قیمت‌ها در اکثر مناطق (به‌استثنای چین) بین ۴۹ تا ۶۴ درصد نسبت به اوج خود در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ کاهش یافته است. در چین، تا سال ۲۰۲۲، قیمت توربین‌های بادی از زمان اوج سال ۱۹۹۸ که ۲۸۰۰ دلار بر کیلووات بود، ۸۹ درصد کاهش پیدا کرد و به‌طور میانگین به ۳۲۰ دلار در کیلووات رسید. در کل پیشرفت‌های فناوری منجر به بهبود بیش از یک‌سوم در میانگین وزنی ضریب ظرفیت جهانی باد خشکی شده است و از ۲۷ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۳۷ درصد در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است.

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه های برق آبی طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



برق آبی یک فناوری تولید برق تجدیدپذیر با سابقه و قابل اعتماد است. همچنین در سال ۲۰۲۲ گسترده ترین احداث در سراسر جهان متعلق به این فناوری بوده است. اگرچه سهم برق آبی از ظرفیت انرژی تجدیدپذیر جهانی به آرامی در حال کاهش است. درواقع، بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، سهم نیروگاه های آبی از ۷۲ درصد به ۴۱ درصد کاهش یافته است. مجموع ظرفیت جهانی نیروگاه آبی احداث شده (به استثنای فناوری تلمبه ای-ذخیره ای^{۶۸}) از ۸۸۱ گیگاوات به ۱۲۵۶ گیگاوات در پایان سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است، اما ممکن است تا پایان سال آتی، فتوولتائیک خورشیدی از آن پیشی بگیرد. نیروگاه های آبی یک منبع برق کم هزینه را فراهم می آورند. همچنین، انعطاف پذیری شبکه برق را (به ویژه اگر نیروگاه دارای مخزن ذخیره باشد)، بهبود می بخشد. این امر، نیروگاه را قادر می سازد تا خدماتی مانند پاسخ فرکانسی^{۶۹}، قابلیت بلک استارت^{۷۰} و ذخایر چرخشی^{۷۱} ارائه دهد. این قابلیت ها با افزایش درآمد، دوام نیروگاه را افزایش می دهند. همچنین امکان ادغام بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر و ناپایدار، به منظور دستیابی به اهداف کربن زدایی، فراهم می شود. علاوه بر خدمات انعطاف پذیری شبکه که نیروگاه آبی ارائه می دهد، ذخیره انرژی نیز در طول هفته ها، ماه ها، فصول یا حتی سال ها (بسته به اندازه مخزن) امکان پذیر است.

⁶⁸ Pumped Hydro

⁶⁹ Frequency Response

⁷⁰ Black Start Capability

⁷¹ Spinning Reserves

علاوه بر این، پروژه‌های برق‌آبی، خدمات تأمین انرژی و آب را با هم ترکیب می‌کنند. این امر می‌تواند شامل طرح‌های آبیاری، تأمین آب شهری، مدیریت خشکسالی، کنترل سیل، و ناوبری و تفریح باشد که همگی مزایای اجتماعی-اقتصادی محلی را فراهم می‌آورند. درواقع، در برخی موارد، قابلیت انرژی آبی به دلیل نیاز موجود به مدیریت جریان رودخانه توسعه می‌یابد. این خدمات اضافی، قابلیت دوام پروژه‌های برق‌آبی را افزایش می‌دهد. با این حال، تجزیه و تحلیل هزینه تراز شده انرژی^{۷۳} انجام شده در این گزارش، ارزش خدماتی فراتر از تولید برق را (که مختص بازار برق نیستند) در نظر نمی‌گیرد.

❖ هزینه‌های احداث

کار ساخت‌وساز مرتبط با یک پروژه برق‌آبی، بسته به اندازه و محدوده پروژه و همچنین سایر ویژگی‌های مؤثر بر پروژه، متفاوت است. همچنین مشخصات فنی کلیدی وجود دارد که نوع و اندازه توربین مورد استفاده را تعیین می‌کند. این پارامترهای کلیدی عبارت‌اند از:

- هد^{۷۳}
- اندازه مخزن
- حداقل نرخ جریان پایین دست
- جریان‌های فصلی

علاوه بر این، نیروگاه‌های آبی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- نیروگاه انرژی آبی مخزن یا ذخیره^{۷۴}، که جداسازی جریان‌های آبی ورودی از توربین‌ها را فراهم می‌کند. ذخیره آب به عنوان حائلی عمل می‌کند که سدها می‌توانند از آن برای ذخیره یا تنظیم جریان‌های آبی استفاده کنند.
 - نیروگاه آبی جریان رودخانه^{۷۵}، که در آن جریان‌های آبی میزان تولید را تعیین می‌کنند، زیرا ذخیره‌سازی کمی وجود دارد یا اصلاً ذخیره‌ای برای ایجاد حائل برای اندازه جریان‌ها وجود ندارد.
 - نیروگاه آبی تلمبه-ذخیره‌ای^{۷۶}، که در آن مخازن ذخیره بالا و پایین وجود دارد. از الکتریسیته برای پمپاژ آب از مخزن پایینی به مخزن بالایی در مواقع کم تقاضا (بیشتر در دوره‌های غیر پیک) استفاده می‌شود و سپس در زمان تقاضای بالا برق تولید می‌گردد. این نیروگاه، بیشتر برای تولید در زمان پیک، پایداری شبکه و خدمات جانبی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از آن برای ادغام بیشتر انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر با ذخیره‌سازی تولیدات تجدیدپذیر فراوان که در دوره‌های تقاضای کم برق مورد نیاز نیست، استفاده کرد.
- در ادامه، هزینه‌های انرژی آبی مخزن و جریان رودخانه پوشش داده می‌شود و هزینه‌های تلمبه-ذخیره‌ای از همه داده‌ها مستثنی می‌گردد، زیرا این فناوری، یک فناوری ذخیره‌سازی است، نه یک فناوری تولید برق‌آبی.

⁷² Levelised Cost of Electricity (LCOE)

⁷³ Head

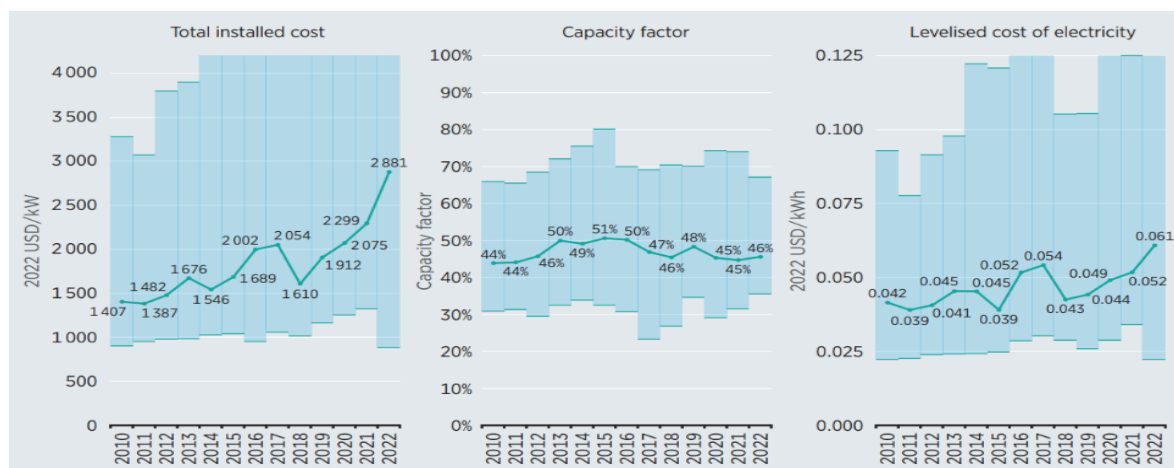
⁷⁴ Reservoir or Storage Hydropower

⁷⁵ Run-of-River Hydropower

⁷⁶ Pumped Storage Hydropower

برق‌آبی یک فناوری سرمایه‌بر است و پروژه‌ها اغلب به زمان طولانی برای توسعه، صدور مجوز، توسعه سایت، ساخت‌وساز و راه‌اندازی نیاز دارند. چنین پروژه‌هایی فازهای مهندسی عمران بزرگ و پیچیده‌ای را شامل می‌شوند که به بررسی‌های گسترده سایت، جمع‌آوری داده‌های جریان ورودی و ارزیابی‌های زیست‌محیطی نیاز دارند. این موارد اغلب باید قبل از دسترسی به سایت و آماده‌سازی تکمیل شوند. به‌طور کلی، دو جزء هزینه اصلی برای پروژه‌های برق‌آبی وجود دارد:

- عملیات عمرانی برای ساخت نیروگاه برق‌آبی: شامل هرگونه توسعه زیرساختی موردنیاز برای دسترسی به سایت، اتصال به شبکه، امور مرتبط با کاهش مسائل زیست‌محیطی شناسایی‌شده و هزینه‌های توسعه پروژه می‌باشد.
- هزینه‌های تدارکات مربوط به تجهیزات الکترومکانیکی: بخش‌های عمرانی (شامل سد، تونل، کانال و ساخت نیروگاه) معمولاً بیشترین سهم را از کل هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های آبی بزرگ دارند. پس‌ازاین، هزینه‌های تجهیز نیروگاه (شامل شفت و تجهیزات الکترومکانیکی) بزرگ‌ترین هزینه موردنیاز است که حدود ۳۰ درصد از کل هزینه‌ها را شامل می‌شود.



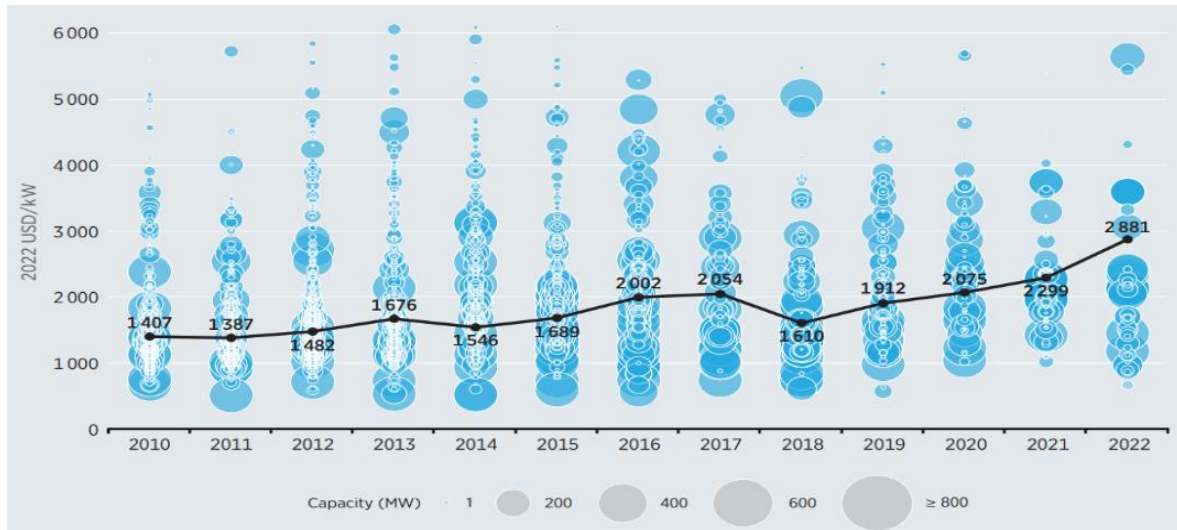
میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت و هزینه تراز شده انرژی برای نیروگاه‌های آبی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

زمان طولانی موردنیاز برای احداث پروژه‌های برق‌آبی (۷-۹ سال یا بیشتر) به این معنی است که هزینه‌های سرمایه‌گذار (ازجمله هزینه‌های توسعه پروژه)، به دلیل نیاز به سرمایه در گردش و بهره در طول ساخت‌وساز، می‌تواند بخش قابل توجهی از هزینه‌های کلی باشد. موارد اضافی که می‌تواند به‌طور قابل توجهی به هزینه‌های کلی اضافه کند شامل مطالعات پیش امکان‌سنجی و امکان‌سنجی، مشاوره با سهامداران و سیاست‌گذاران محلی، اقدامات کاهش اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی و تملک زمین است. بااین‌حال، در شرایط خاص، سهم هزینه‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این امر به‌ویژه در صورتی صادق است که یک پروژه در حال افزودن ظرفیت به یک سد یا طرح رودخانه‌ای برق‌آبی موجود باشد، یا درجایی که نیروگاه آبی به یک سد موجود که بدون در نظر گرفتن تولید برق توسعه یافته است، افزوده شود.

مجموع هزینه‌های احداث برای اکثر پروژه‌های برق‌آبی که بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ راه‌اندازی شده‌اند، از حداقل ۵۰۰ دلار در کیلووات تا حداکثر ۵۰۰۰ دلار در کیلووات متغیر است. بااین‌حال، یافتن پروژه‌هایی خارج از این محدوده

برونداد تخصصی انرژی‌های تجدیدپذیر

غیرعادی نیست. به‌عنوان مثال، افزودن ظرفیت برق‌آبی به یک سد موجود که برای مقاصد دیگر ساخته شده است ممکن است هزینه‌های کمتر از ۴۵۰ دلار در کیلووات داشته باشد، درحالی‌که سایت‌های دورافتاده با زیرساخت‌های ضعیف و دور از شبکه‌های انتقال موجود می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بیش از ۵۰۰۰ دلار در کیلووات هزینه داشته باشند. این افزایش هزینه ناشی از هزینه‌های لجستیکی، مهندسی عمران و اتصال به شبکه بالاتر است.



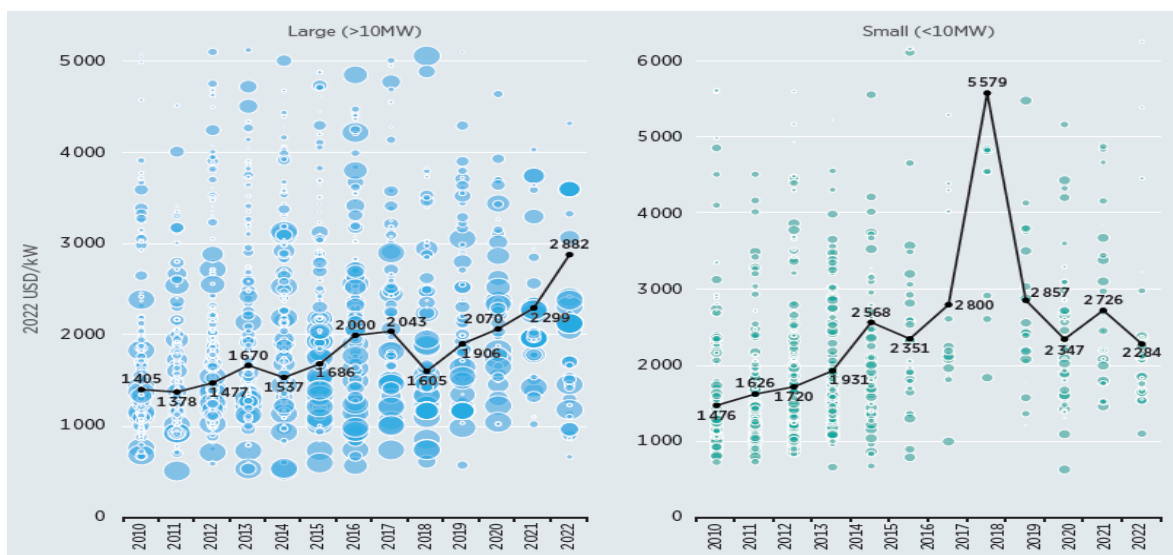
مجموع هزینه‌های احداث بر اساس پروژه و میانگین وزنی جهانی برای نیروگاه‌های آبی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی کل هزینه احداث نیروگاه‌های آبی جدید از ۱۴۰۷ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۱۰ به ۲۸۸۱ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۲ افزایش یافت. پس از افزایش نسبتاً پیوسته بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷، در سال ۲۰۱۸ میانگین وزنی جهانی کل هزینه احداث به ۱۶۱۰ دلار در کیلووات کاهش یافت، اما پس از آن شاهد افزایش مداوم آن بودیم. سال ۲۰۲۲ نشان‌دهنده یک سطح هزینه جدید و بالاتر بود، با افزایش‌هایی که نه تنها به دلیل سهم احداث در مناطق مختلف، بلکه همچنین یک روند صعودی در هزینه‌های خاص پروژه بود.

تفکیک کل هزینه احداث بر اساس اجزا و میانگین وزنی ظرفیت برای ۲۵ پروژه برق‌آبی در چین، هند و سریلانکا و اروپا

Project component	Share of total installed costs (%)		
	Minimum	Weighted average	Maximum
Civil works	17	45	65
Mechanical equipment	18	33	66
Planning and other	6	16	29
Grid connection	1	6	17
Cost of land	1	3	8
Europe 2021			
Type of Hydro	Share of total installed costs (%)		
	Civil	Mechanical	Electrical
Large-scale Reservoir Storage (high head)	70	10	20
Large-scale Run of river (low head)	50	30	20
Small-scale Run of river	50	30	20
Pumped storage	30-50	20-30	30-40

این افزایش به دلیل افزایش هزینه‌های احداث برای پروژه‌ها در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی و جنوبی بوده است. داده‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از کشورهای این مناطق اکنون در حال توسعه پروژه‌های انرژی آبی در مکان‌های کمتر ایده‌آل هستند. چنین پروژه‌هایی ممکن است دورتر از زیرساخت‌های موجود یا شبکه انتقال واقع شوند که منجر به هزینه‌های لجستیکی بالاتر و همچنین افزایش هزینه‌های اتصال به شبکه می‌گردد. همچنین ممکن است پروژه‌ها در مکان‌هایی با شرایط زمین‌شناسی چالش‌برانگیزتر واقع شده باشند و به عملیات پیچیده‌تر و پرهزینه‌تری برای ساخت خود سد نیاز باشد. همین امر، به‌طور کلی منجر به هزینه‌های احداث بالاتر می‌شود. روند میانگین وزنی جهانی هزینه احداث برای نیروگاه‌های برق آبی بزرگ (با ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات) و برق آبی‌های کوچک (۱۰ مگاوات یا کمتر) نشان می‌دهد که میانگین هزینه‌های احداث برای برق آبی‌های کوچک با سرعت بیشتری نسبت به پروژه‌های برق آبی بزرگ افزایش یافته است.

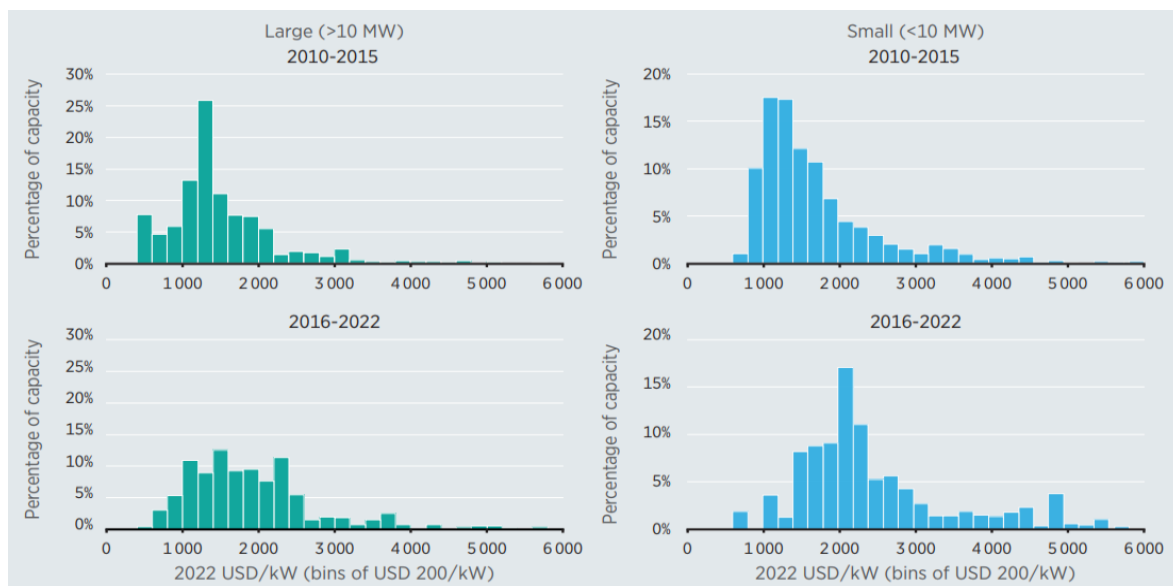


مجموع هزینه‌های احداث برای پروژه‌های کوچک و بزرگ برق آبی و میانگین وزنی جهانی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

مجموع هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های آبی بر اساس میانگین وزنی و محدوده ظرفیت، ۲۰۲۲-۲۰۰۰

2000-2022			
Capacity (MW)	5 th percentile (2022 USD/kW)	weighted average (2022 USD/kW)	95 th percentile (2022 USD/kW)
0-50	895	1 753	3 822
51-100	921	1 978	4 052
101-150	990	1 874	3 750
151-200	896	1 849	3 354
201-250	970	2 057	3 761
251-300	896	2 232	4 140
301-350	998	2 113	4 788
351-400	737	1 717	3 358
401-450	1 281	2 135	3 278
451-500	1 077	1 769	3 067
501-550	1 193	2 464	4 697
551-600	1 450	1 958	2 774
601-650	1 146	1 553	3 587
651-700	852	2 127	2 850
701-750	1 036	1 640	2 234
751-800	1 146	1 684	2 377
801-850	1 267	3 952	11 999
851-900	1 038	1 724	1 989
901-950	704	1 178	1 432
951-1000	n.a.	2 386	2 386

Note: n.a. = data not available.



توزیع کل هزینه‌های احداث پروژه‌های بزرگ و کوچک برق‌آبی بر اساس ظرفیت، ۲۰۱۵-۲۰۱۰ و ۲۰۲۲-۲۰۱۶

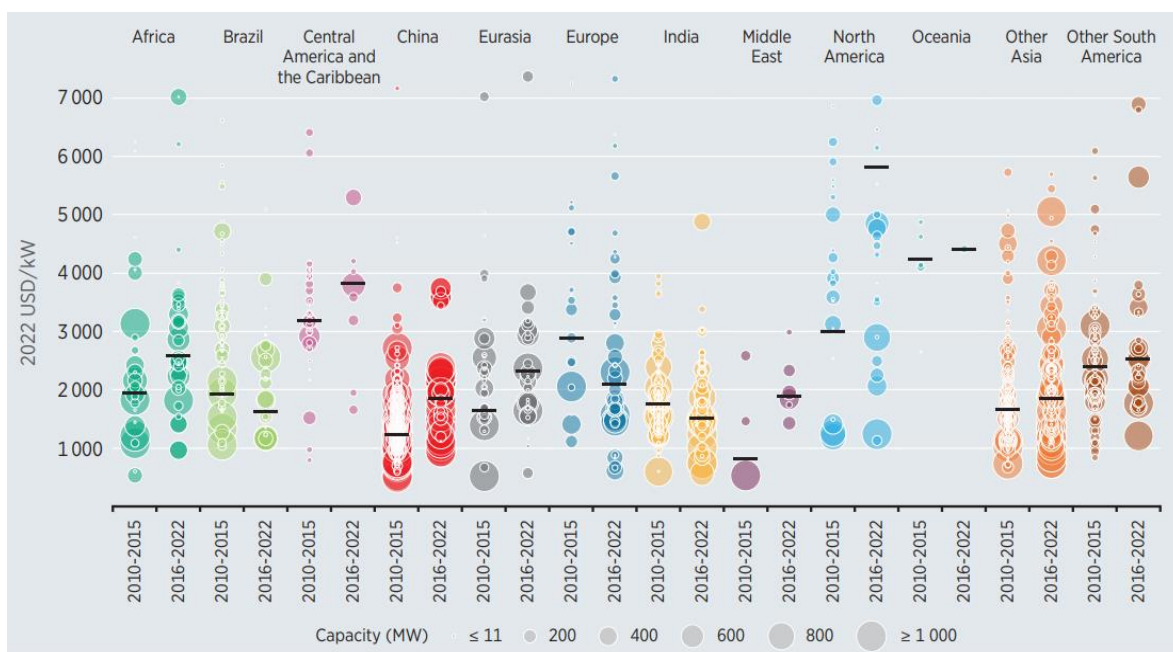
برای دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، کل هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ (با ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات) در مناطق آمریکای شمالی و آفریقا بالاترین میزان بود. در این دو منطقه، میانگین وزنی هزینه‌های احداث به ترتیب ۵۸۲۵ دلار بر کیلووات و ۲۶۰۴ دلار بر کیلووات بود. بالاترین هزینه احداث بعدی در اروپا، با میانگین وزنی ۲۱۰۱ دلار بر کیلووات بود. کمترین میانگین وزنی هزینه احداث برای نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ در هند، با ۱۵۲۵ دلار بر کیلووات و سایر مناطق آسیا، با ۱۸۷۷ دلار در کیلووات بوده است. در برزیل، میانگین وزنی هزینه احداث ۱۶۳۹ دلار بر کیلووات، در چین ۱۸۶۰، در خاورمیانه ۱۹۱۳ و در اوراسیا ۲۳۴۴ دلار بر کیلووات بوده است. در سایر مناطق آمریکای جنوبی، آمریکای مرکزی و مناطق کارائیب و اقیانوسیه، میانگین وزنی هزینه‌های احداث به ترتیب ۲۵۳۷، ۳۸۲۶ و ۴۴۱۷ دلار بر کیلووات بود. بدیهی است که مناطق با هزینه‌های احداث بالاتر، نرخ احداث کمتری دارند.

با توجه به اینکه هزینه‌های توسعه پروژه‌های برق‌آبی بسیار وابسته به سایت است، دامنه هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های آبی گسترده است. بخشی از این هزینه‌ها به دلیل تغییرات در هزینه توسعه، مهندسی عمران، تدارکات و اتصال به شبکه است. برخی از تغییرات نیز ممکن است ناشی از نیازهای غیر انرژی ادغام شده در پروژه‌های مختلف باشد. به‌طور مثال این موارد می‌تواند شامل تعهدات ارائه خدمات دیگر مانند آب آشامیدنی، کنترل سیل، آبیاری و دریانوردی باشد. این خدمات در هزینه‌های پروژه برق‌آبی گنجانده شده است، اما معمولاً پاداشی ندارد.

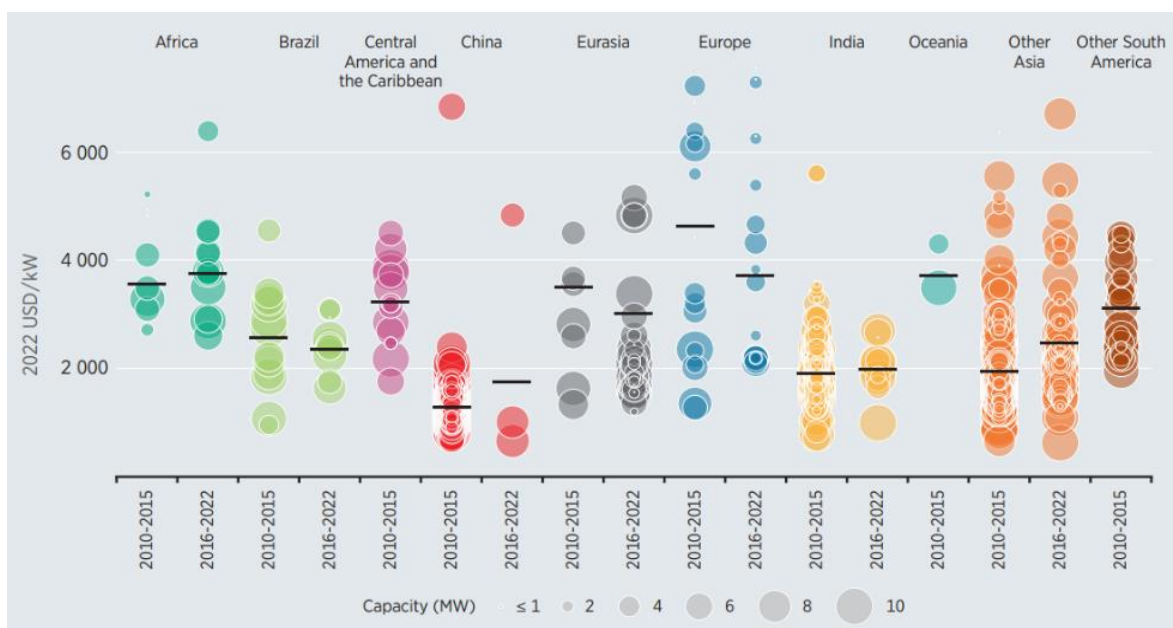
مقایسه بین هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های آبی بزرگ و کوچک نشان می‌دهد که نیروگاه‌های آبی کوچک معمولاً بین ۲۰ تا ۸۰ درصد هزینه‌های احداث بیشتری نسبت به نیروگاه‌های آبی بزرگ دارند. استثناً در آمریکای مرکزی و مناطق کارائیب و اقیانوسیه است. در این دو منطقه، هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های آبی بزرگ به دلیل تعداد نسبتاً کم پروژه‌های بزرگ در حال توسعه، بیشتر است.

بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، کل هزینه‌های احداث برای پروژه‌های کوچک برق‌آبی در هند ۱۹۹۵ دلار بر کیلووات بود که تا حدودی بیشتر از دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ است. در دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، مجموع هزینه‌های احداث

نیروگاه‌های آبی کوچک در برزیل به‌طور متوسط ۲۳۶۸ دلار در کیلووات بوده است. این رقم ۸ درصد کمتر از دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ می‌باشد. میانگین وزنی هزینه احداث برای نیروگاه‌های آبی کوچک در چین ۱۲۹۹ دلار بر کیلووات در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ بوده است. طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، این هزینه به ۱۷۶۴ دلار در کیلووات رسید. در طی این زمان، میانگین وزنی هزینه احداث برای نیروگاه‌های آبی کوچک در اقیانوسیه ۳۷۲۹ دلار بر کیلووات، در آمریکای مرکزی و کارائیب ۳۲۴۴ دلار بر کیلووات و در آمریکای جنوبی ۳۱۱۶ دلار آمریکا بر کیلووات بود.



مجموع هزینه احداث بر اساس پروژه و میانگین وزنی ظرفیت پروژه‌های بزرگ نیروگاه برق آبی بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۲۲-۲۰۱۰



مجموع هزینه‌های احداث بر اساس پروژه و میانگین وزنی ظرفیت پروژه‌های کوچک برق آبی بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ هزینه‌های تعمیرات و نگهداری^{۷۷}

هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه، اغلب به‌عنوان درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر کیلووات در سال ذکر می‌شود. این مقدار به‌طور معمول از ۱ درصد تا ۴ درصد متغیر است. ایرنا داده‌های هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را در ۲۵ پروژه جمع‌آوری نمود و اعلام کرد که میانگین هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها بین ۱ درصد تا ۳ درصد از کل هزینه‌های احداث در سال متغیر است. جدول زیر، توزیع هزینه ارقام بهره‌برداری و نگهداری را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. عملیات و حقوق افراد بیشترین بخش از بودجه هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را در برمی‌گیرند. سهم نگهداری ۲۰ درصد تا ۶۱ درصد از کل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و حقوق افراد از ۱۳ درصد تا ۷۴ درصد متغیر است. تخمین زده می‌شود که مواد و متریال حدود ۴ درصد را تشکیل دهند.

هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه پروژه برق‌آبی بر اساس دسته‌بندی از نمونه ۲۵ پروژه

Project component	Share of total O&M costs (%)		
	Minimum	Weighted average	Maximum
Operation costs	20	51	61
Salary	13	39	74
Other	5	16	28
Material	3	4	4

آژانس بین‌المللی انرژی^{۷۸}، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را برای پروژه‌های بزرگ برق‌آبی ۲.۲ درصد، برای پروژه‌های کوچک‌تر ۲.۲ تا ۳ درصد و برای میانگین جهانی نیز حدود ۲.۵ درصد در نظر گرفته است. این ارقام، نیروگاه‌های برق‌آبی در مقیاس بزرگ را در محدوده هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مشابه هزینه‌های باد قرار می‌دهد. هنگامی که مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها در امتداد رودخانه احداث می‌شوند، کنترل متمرکز، مدیریت از راه دور و یک تیم عملیاتی که به مدیریت زنجیره ایستگاه‌ها اختصاص دارد نیز می‌تواند هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را به سطوح بسیار پایین‌تری کاهش دهد. با این حال، منابع دیگر مقادیر کمتر یا بالاتر را نقل می‌کنند. برای مثال، برای یک نیروگاه برق‌آبی متعارف ۵۰۰ مگاواتی که در سال ۲۰۲۰ راه‌اندازی شده است، آژانس اطلاعات انرژی^{۷۹}، ۰.۰۶ درصد از کل هزینه‌های احداث را به‌عنوان هزینه‌های ثابت سالانه بهره‌برداری و نگهداری، همراه با ۰.۰۰۳ دلار در هر کیلووات ساعت به‌عنوان هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری متغیر فرض می‌کند.

مطالعات دیگر نشان می‌دهد که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری ثابت ۴ درصد از کل هزینه سرمایه را تشکیل می‌دهد. این رقم ممکن است برای انرژی برق‌آبی در مقیاس کوچک باشد. در خصوص نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری به‌طور قابل‌توجهی کمتر است. یک مقدار متوسط برای هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از ۲ تا ۲.۵ درصد به‌عنوان معیار برای پروژه‌های مقیاس بزرگ در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های بهره‌برداری

⁷⁷ Operation and Maintenance (O&M)

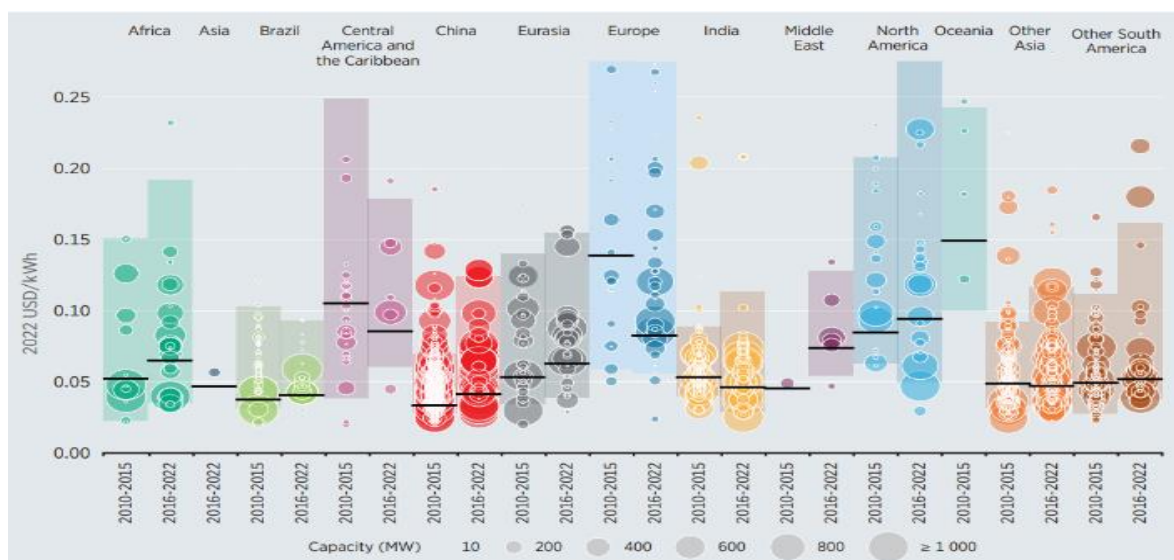
⁷⁸ International Energy Agency (IEA)

⁷⁹ Energy Information Agency (EIA)

و نگهداری معمولاً شامل هزینه‌ای برای نوسازی دوره‌ای تجهیزات مکانیکی و الکتریکی مانند تعمیرات اساسی توربین^{۸۰}، چرخش مجدد ژنراتور^{۸۱} و سرمایه‌گذاری مجدد در سیستم‌های ارتباطی و کنترل می‌شود.

❖ جمع‌بندی

نیروگاه‌های برق‌آبی در طول تاریخ رکن اساسی برق کم‌هزینه را در تعداد قابل‌توجهی از کشورهای جهان فراهم کرده‌اند. میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده برق در پروژه‌های نیروگاه آبی تازه راه‌اندازی شده، ۰.۰۶۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۲ بوده است. این میزان، ۱۸ درصد بیشتر از ۰.۰۵۲ دلار در کیلووات ساعت ثبت‌شده در سال ۲۰۲۱ است. علیرغم این افزایش، در سال ۲۰۲۲، ۹۶ درصد از ظرفیت جدید احداث شده پروژه‌های برق‌آبی، دارای هزینه تراز شده کمتر از میانگین وزنی هزینه ویژه کشور یا منطقه^{۸۲} برای ظرفیت جدید سوخت فسیلی بودند. افزایش هزینه تراز شده از سال ۲۰۱۰ ناشی از افزایش هزینه‌های احداث، به‌ویژه در آسیا بوده است. این امر، احتمالاً به دلیل افزایش پروژه‌ها در مکان‌هایی با شرایط چالش‌برانگیزتر و تورم زنجیره تأمین اخیر است. در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه احداث جهانی برای پروژه‌های آبی جدید، به ۲۸۸۱ دلار در هر کیلووات افزایش یافت. این رقم بالاتر از رقم ۲۲۹۹ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۱ بود. میانگین وزنی جهانی هزینه احداث در سال ۲۰۲۲ بالاترین مقدار ثبت‌شده تاکنون بود. اکثر ظرفیت‌های جدید اضافه‌شده در چین رخ داده است. این کشور، ۱۳ گیگاوات پروژه برق‌آبی اضافه کرده و به‌طور کلی هزینه‌های احداث کمتر از میانگین دارد. همچنین، سال ۲۰۲۲ تعدادی پروژه بزرگ دیگر، در کانادا و لائوس، با هزینه‌های بسیار زیاد احداث شد. بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی ضریب ظرفیت جهانی برای پروژه‌های برق‌آبی جدید، بین حداقل ۴۴ درصد در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۱ و حداکثر ۵۱ درصد در سال ۲۰۱۵ متغیر بوده است.

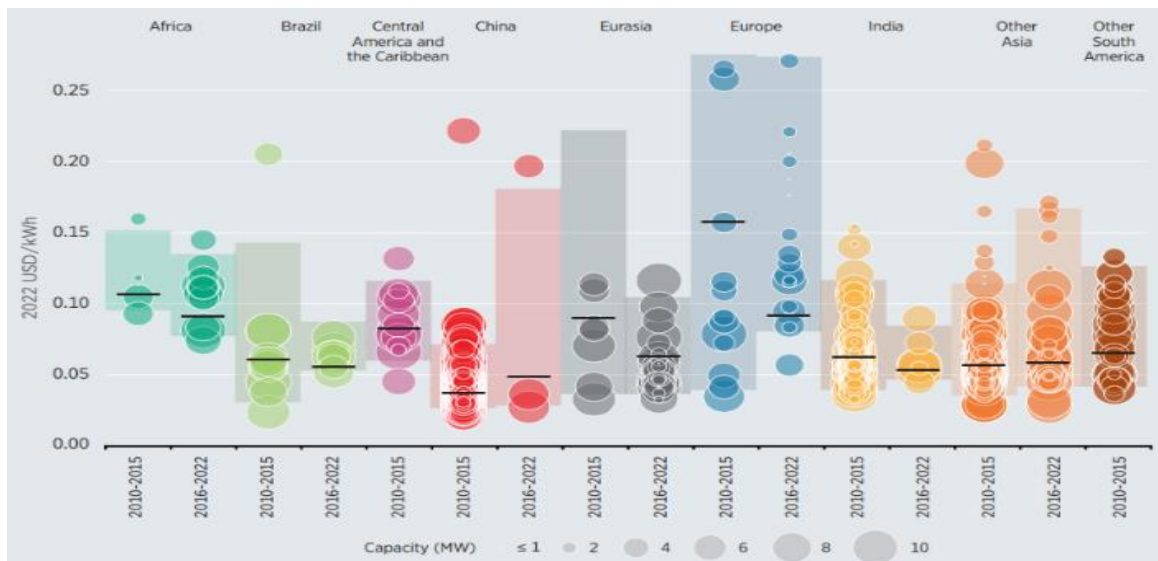


هزینه تراز شده انرژی پروژه بزرگ برق‌آبی و میانگین وزنی ظرفیت بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

⁸⁰ Turbine Overhaul

⁸¹ Generator Rewinding

⁸² Country- Or Region-Specific Weighted Average Cost



هزینه تراز شده انرژی پروژه آبی کوچک و میانگین وزنی ظرفیت بر اساس کشور/ منطقه، ۲۰۱۰-۲۰۲۲ ۲۰۲۲ دلار در کیلووات ساعت

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

تحلیل روند فنی-اقتصادی نیروگاه‌های زیست توده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



تولید برق از زیست توده می‌تواند به وسیله طیف وسیعی از مواد اولیه حاصل شود. به این منظور، می‌توان از انواع مختلف فناوری‌های احتراق بهره برد. برخی از فناوری‌های احتراق، بالغ و از منظر تجاری، قابل دسترسی و برخی دیگر سیستم‌های کم سابقه‌تر اما نوآورانه هستند؛ که هر دو در حوزه برق زیست توده به کار گرفته می‌شوند. از جمله فناوری گازی سازی که این فناوری‌ها هنوز در مرحله توسعه و یا در مقیاس تجاری آزمایشی هستند. فناوری‌های بالغ این عرصه عبارت‌اند از: احتراق مستقیم در بویلر^{۸۳}، هم‌سوزانی با درصد پایین^{۸۴}، هضم بی‌هوازی^{۸۵}، سوزاندن زباله‌های جامد شهری^{۸۶}، لندفیل^{۸۷} و سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت^{۸۸}. برای تجزیه و تحلیل اقتصادی و فنی نیروگاه‌های زیست توده برای تولید برق، توجه به سه عامل اصلی ضروری است: نوع و روش تأمین مواد اولیه، فرآیند تبدیل و فناوری تولید برق. اگرچه در دسترس بودن مواد اولیه یکی از عناصر اصلی موفقیت اقتصادی پروژه‌های زیست توده است، اما تحلیل این گزارش بر هزینه‌های فناوری‌های تولید برق و اقتصاد آن‌ها تمرکز دارد و تنها به طور خلاصه به هزینه‌های مواد اولیه پرداخته می‌شود.

⁸³ Direct Combustion in Stoker Boilers

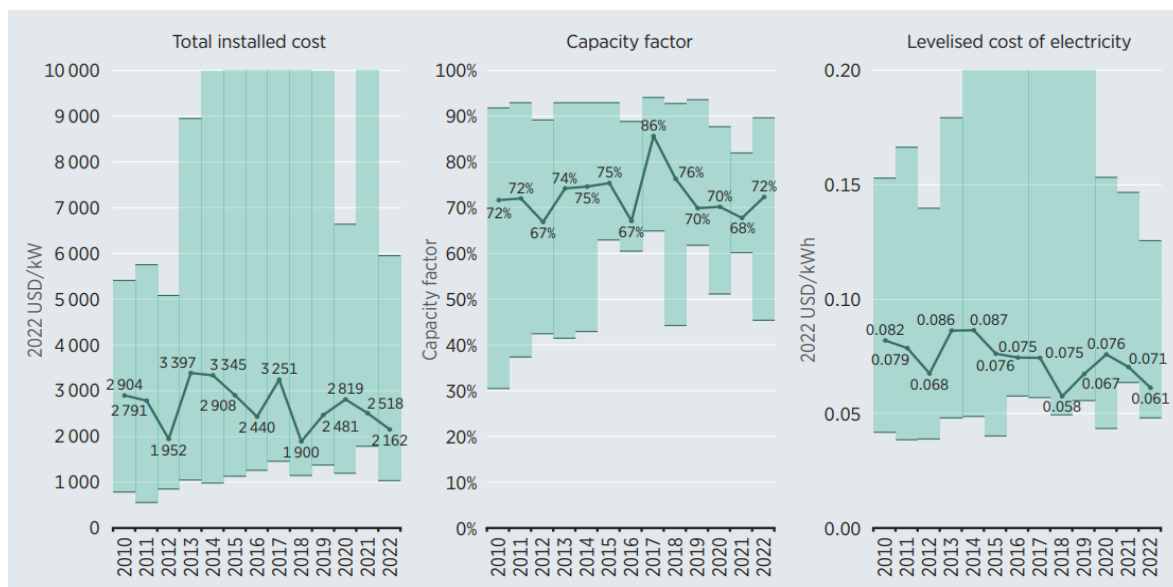
⁸⁴ Low-Percentage Co-Firing

⁸⁵ Anaerobic Digestion

⁸⁶ Municipal Solid Waste Incineration

⁸⁷ Landfill Gas

⁸⁸ Combined Heat and Power (CHP)



میانگین وزنی جهانی کل هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت و هزینه ترازشده برق‌زیست توده، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ مواد اولیه زیست‌توده

اقتصاد تولید برق با زیست‌توده با اقتصاد انرژی بادی، خورشیدی یا برق‌آبی متفاوت است. دلیل این امر وابستگی زیست‌توده به در دسترس بودن منبعی از مواد اولیه است که در بلندمدت قابل پیش‌بینی، پایدار، کم‌هزینه و کافی باشد. پیچیدگی دیگری که وجود دارد این است که در برخی موارد، تولید برق فعالیت اصلی بهره‌برداری از این منبع نیست. به عبارتی وجود یک سایت می‌تواند به فعالیت‌های فرآوری جنگلداری یا کشاورزی وابسته باشد که این امر خود می‌تواند بر زمان و چرای تولید برق تأثیر بگذارد. برای مثال، در نیروگاه‌هایی که با برق حاصل از کارخانه‌های خمیر و کاغذ کار می‌کنند، بخش قابل توجهی از برق تولیدی برای عملیات این تأسیسات استفاده می‌شود.



زیست‌توده، ماده آلی گیاهان تازه‌مرده مانند درختان، علف‌ها و محصولات کشاورزی است. بنابراین، مواد اولیه زیست‌توده بسیار ناهمگن هستند و ترکیب شیمیایی آن‌ها وابستگی زیادی به گونه گیاهی دارد.

هزینه مواد اولیه به ازای واحد انرژی نیز بسیار متغیر است. این امر به دلیل این است که مواد اولیه می‌توانند از پسماندهای فرآوری در محل و یا محصولات اختصاصی برای تولید انرژی باشند. درخصوص محصولات اختصاصی برای تولید انرژی می‌بایست هزینه زمین مورد استفاده، برداشت و حمل‌ونقل و همچنین نگهداری در محل نیروگاه زیست‌توده نیز در نظر گرفته شود. برخی از نمونه‌های ضایعات زیست‌توده کم‌هزینه که برای تولید برق و گرما سوزانده

می‌شوند عبارت‌اند از: تفاله نیشکر، پوسته برنج، لیکور سیاه^{۸۹} و سایر پسماندهای فرآوری خمیر و کاغذ، ضایعات چوب‌بری و خاکاره و جریان‌های پسماند تجدیدپذیر شهری. علاوه بر هزینه، خواص فیزیکی مواد اولیه نیز حائز اهمیت است زیرا از نظر محتوای خاکستر، چگالی، اندازه ذرات و رطوبت متفاوت خواهند بود. این عوامل همچنین بر هزینه‌های حمل‌ونقل، پیش‌تصفیه و ذخیره‌سازی و همچنین تناسب فناوری‌های تبدیل مختلف تأثیر می‌گذارند. برخی از این فناوری‌ها نسبتاً قوی و انعطاف‌پذیر هستند و می‌توانند با مواد اولیه متنوعی سازگار شوند، درحالی‌که برخی دیگر به همگنی بیشتری نیاز دارند (به‌عنوان مثال، برخی از فرآیندهای گازسازی).

یک ملاحظه کلیدی در مورد هزینه برای زیست‌توده این است که اکثر اشکال آن چگالی انرژی نسبتاً پایینی دارند. بنابراین، هزینه‌های جمع‌آوری و حمل‌ونقل اغلب بر هزینه مواد اولیه مشتق شده از بقایای جنگلی و محصولات انرژی اختصاصی غالب است. پیامد این امر این است که هزینه‌های لجستیکی با افزایش فاصله نیروگاه برق از مواد اولیه‌ای که باید تهیه شوند، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. از نظر عملی، این عامل اندازه اقتصادی نیروگاه‌های برق زیست‌توده را محدود می‌کند، زیرا کمترین هزینه برق زمانی به دست می‌آید که مواد اولیه در شعاع مشخصی از نیروگاه قابل‌دستیابی باشد. برای فناوری‌های زیست‌توده، سهم هزینه مواد اولیه در هزینه ترازشده کل بین ۲۰ تا ۵۰ درصد است. با این حال، تخمین قیمت‌های مواد اولیه تهیه‌شده و مصرف‌شده دشوار است.

❖ هزینه‌های احداث نیروگاه زیست‌توده

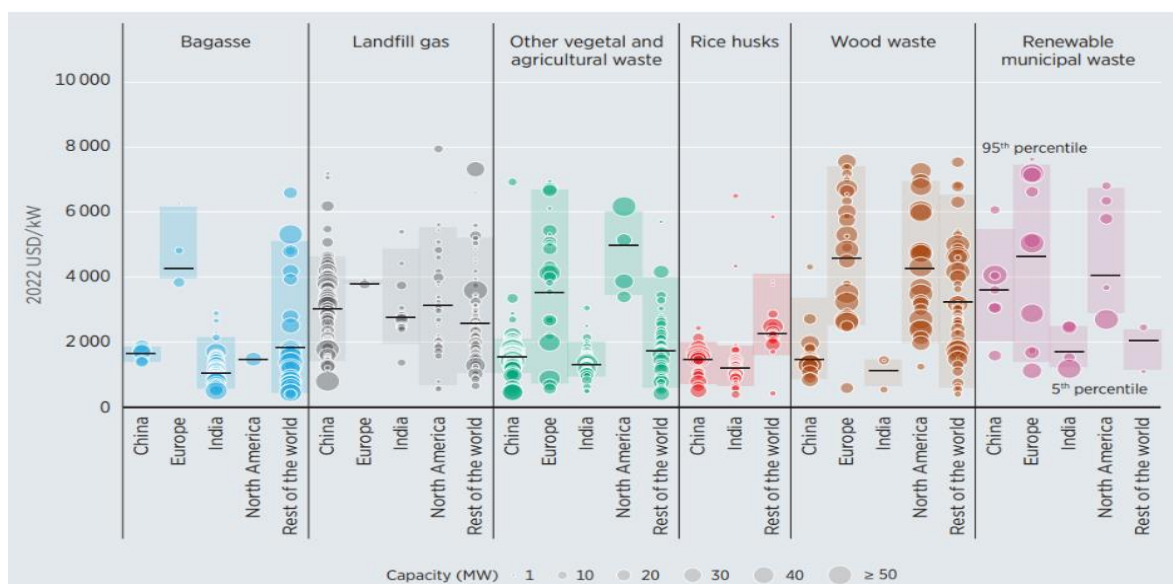
هزینه‌های احداث نیروگاه‌های برق زیست‌توده در مناطق مختلف متفاوت است و هر دو مؤلفه نوع فناوری و هزینه مواد اولیه محلی، در هزینه کل نقش دارند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری در پروژه‌های زیست‌توده در کشورهای درحال توسعه معمولاً کمتر از پروژه‌های کشورهای عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه^{۹۰} است. دلیل این امر این است که اقتصادهای نوظهور اغلب از نیروی کار و کالاهای ارزان‌تر بهره می‌برند. این عامل امکان احداث فناوری‌های کم‌هزینه در کنترل آلاینده‌ها را فراهم می‌کند، اگرچه در برخی موارد با انتشار آلاینده‌های محلی بیشتر همراه است. دسته‌بندی‌های اصلی در کل هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه برق زیست‌توده عبارت‌اند از: هزینه‌های برنامه‌ریزی، مهندسی و ساخت، ماشین‌آلات حمل‌ونقل و آماده‌سازی سوخت، و سایر تجهیزات (سیستم تبدیل سوخت). هزینه‌های اضافی ناشی از اتصال به شبکه و عملیات زیرساخت (به‌عنوان مثال، کارهای عمرانی و جاده‌ها) است. به‌طورمعمول، هزینه‌های تجهیزات بخش عمده هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهند؛ اما پروژه‌های خاص می‌توانند هزینه‌های بالایی برای زیرساخت و لجستیک یا برای اتصال به شبکه در مناطق دورافتاده داشته باشند.

⁸⁹ Black Liquor

"لیکور سیاه" محصول جانبی در فرآیند ساخت خمیر کاغذ است و ترکیب لیگنین موجود در لیکور سیاه را می‌توان برای تولید سوخت زیستی استفاده کرد. در حال حاضر، تولید آن گران است ولی به گفته آژانس بین‌المللی انرژی، آینده استفاده از لیکور سیاه به عنوان سوخت زیستی امیدوارکننده است.

⁹⁰ Organisation for Economic Co-operation and Development(OECD)

تأسیسات زیست‌توده ترکیبی برق و حرارت^{۹۱} هزینه سرمایه‌گذاری بالاتری نیاز دارند. با این حال، راندمان کلی بالاتر (حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد)، توانایی در تولید گرما و یا بخار برای فرآیندهای صنعتی یا برای گرمایش فضا و آب از طریق شبکه‌های گرمایش منطقه‌ای، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی اقتصاد این نوع نیروگاه‌های زیست‌توده را بهبود ببخشد. شکل زیر هزینه کل احداث پروژه‌های تولید برق با زیست‌توده را برای انواع مواد اولیه مختلف در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد.



هزینه کل احداث پروژه‌های تولید برق با زیست‌توده

اگرچه الگوی هزینه احداث بر اساس مواد اولیه در کشورهای مختلف متفاوت است، اما واضح است که کل هزینه‌های احداث با توجه به مواد اولیه، در اروپا و آمریکای شمالی بالاتر و در آسیا و آمریکای جنوبی پایین‌تر است. این امر نشان‌دهنده این است که پروژه‌های زیست‌توده در کشورهای توسعه‌یافته اغلب بر پایه چوب هستند و یا از سوزاندن زباله‌های تجدیدپذیر شهری یا صنعتی حاصل می‌شوند. در این موارد، تولید انرژی (به‌طور بالقوه برق و گرما) نتیجه‌ای از این نکته است که تولید ترکیبی برق و حرارت ارزان‌ترین راه برای مدیریت زباله می‌باشد.

برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، در چین و در صدک ۵ و ۹۵ پروژه‌ها در تمام انواع مواد اولیه، کل هزینه‌های احداث از ۷۰۲ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های پوسته برنج تا ۵۴۸۱ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های زباله‌های تجدیدپذیر شهری بوده است. در هند، این محدوده از ۵۷۲ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های باگاس^{۹۲} تا ۴۸۷۱ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های لندفیل می‌باشد. این محدوده برای پروژه‌ها در اروپا و آمریکای شمالی بالاتر است. هزینه‌ها در این دو منطقه جغرافیایی، در دوره موردنظر، از ۷۰۱ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های لندفیل در آمریکای شمالی تا ۷۴۴۵ دلار بر کیلووات برای پروژه‌های زباله‌های تجدیدپذیر شهری در اروپا متغیر بوده است. دلیل این امر این است که در این مناطق، گزینه‌های فناوری مورد استفاده برای توسعه پروژه‌ها ناهمگون‌تر و به‌طور متوسط گران‌تر هستند.

^{۹۱} CHP Biomass

^{۹۲} Bagasse

داده‌های موجود بر اساس مواد اولیه برای سایر نقاط جهان محدودتر بود؛ اما گسترده‌ترین محدوده هزینه کل احداث (در صدک ۵ و ۹۵)^{۹۳} برای پروژه‌های ضایعات چوب بود. برای این موارد، داده‌ها از ۶۱۵ دلار بر کیلووات تا ۶۵۳۹ دلار بر کیلووات متغیر بوده است. برای دوره زمانی مورد مطالعه، میانگین وزنی کل هزینه احداث برای پروژه‌ها در سایر نقاط جهان به‌طور معمول بالاتر از مقادیر موجود در چین و هند و پایین‌تر از مقادیر رایج در اروپا و آمریکای شمالی بود.



هزینه کل احداث بر اساس منطقه و ظرفیت پروژه

شکل قبل، کل هزینه احداث را بر اساس منطقه پروژه و محدوده ظرفیت ارائه می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در بخش برق، پروژه‌های زیست‌توده عمدتاً در مقیاس کوچک هستند و اکثر پروژه‌ها ظرفیت کمتر از ۲۵ مگاوات دارند. با این حال، صرفه به مقیاس برای نیروگاه‌های بالاتر از ۲۵ مگاوات، در داده‌های چین و هند مشهود است.

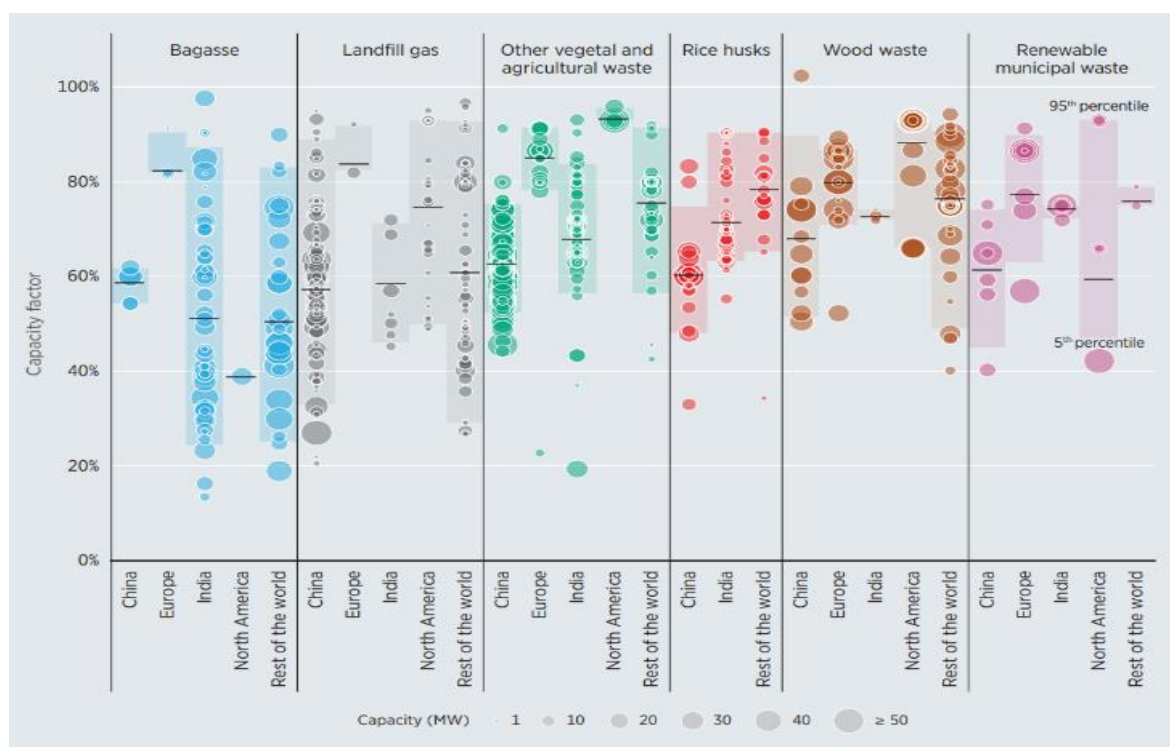
❖ دلایل کوچک مقیاس بودن نیروگاه‌های زیست‌توده

اندازه نسبتاً کوچک نیروگاه‌های زیست‌توده ناشی از چگالی انرژی پایین مواد اولیه زیست‌توده و افزایش تصاعدی هزینه‌های لجستیکی مرتبط با گسترش منطقه جمع‌آوری با هدف تأمین حجم بیشتری از مواد اولیه برای پشتیبانی از نیروگاه‌های بزرگ است. دستیابی به اندازه بهینه یک نیروگاه با هدف به حداقل رساندن هزینه تراشده، با برقراری تعادل بین صرفه به مقیاس و هزینه‌های مواد اولیه میسر می‌شود و هزینه‌ی مواد اولیه با افزایش میانگین فاصله تا محل تأمین، افزایش می‌یابد.

^{۹۳} مجموعه اعداد صدک پنجم و نود و پنجم به معنای یافتن دو عدد ویژه در گروه هزینه‌ها است. مجموعه صدک پنجم به معنای یافتن میزان هزینه‌ای است که بیشتر از ۵ درصد دیگر اعداد هزینه است و مجموعه صدک نود و پنجم به معنای یافتن میزان هزینه‌ای است که از ۹۵ درصد دیگر اعداد هزینه بیشتر است. بنابراین، با دانستن مجموعه صدک پنجم و نود و پنجم، می‌توان ایده‌ای از توزیع هزینه به دست آورد. به عنوان مثال این بدان معنی است که بیشتر پروژه‌های ضایعات چوب، هزینه‌ای بین این دو نقطه دارند.

❖ ضریب ظرفیت^{۹۴} و راندمان

زمانی که دسترسی به مواد اولیه در طول سال یکنواخت باشد، نیروگاه‌های برق زیست‌توده می‌توانند ضرایب ظرفیت بسیار بالایی (در محدوده ۸۵ تا ۹۵ درصد) داشته باشند. با این حال، هنگامی که دسترسی به مواد اولیه بر اساس برداشت‌های فصلی کشاورزی باشد، ضرایب ظرفیت به‌طور معمول پایین‌تر هستند. چالش نوظهور برای نیروگاه‌های برق زیست‌توده، تأثیری است که تغییرات اقلیمی بر دسترسی به مواد اولیه دارند و اینکه چگونه این امر ممکن است بر حجم کل سالانه در دسترس و همچنین توزیع آن در طول سال تأثیر بگذارد. این حوزه با تغییر آب‌وهوا، نیازمند تحقیقات مداوم است.



ضرایب ظرفیت پروژه و مواد اولیه منتخب برای پروژه‌های تولید برق زیست‌توده بر اساس کشور و منطقه، ۲۰۰۰-۲۰۲۲

شکل زیر نشان می‌دهد که نیروگاه‌های زیست‌توده‌ای که به باگاس، گاز محل دفن زباله و سایر بیوگازها متکی هستند، به‌طور کلی در هر منطقه، ضریب ظرفیت پایین‌تری (معمولاً در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد) دارند. اما نیروگاه‌هایی که به چوب، هیزم^{۹۵}، پوسته برنج، و سایر زباله‌های گیاهی و کشاورزی، صنعتی و تجدیدپذیر شهری متکی هستند، از میانگین وزنی ضرایب ظرفیت در محدوده ۶۰ تا ۹۳ درصد برخوردار می‌شوند. پس از مساله مواد اولیه، بازده الکتریکی محرک اصلی (ژنراتور) به‌طور متوسط حدود ۳۰ درصد است. با این حال، این مقدار از ۲۵ درصد تا حدود ۳۶ درصد متغیر است. نیروگاه‌های ترکیبی برق و حرارت که گرما و برق تولید می‌کنند، بازده بالاتری دارند و سطح کلی ۸۰ تا ۸۵ درصد برای آن‌ها دور از انتظار نیست. در کشورهای در حال توسعه، فناوری‌های کمتر پیشرفته منجر به بازدهی کلی

^{۹۴} Capacity Factor

^{۹۵} Fuel Wood

پایین‌تر می‌شود که می‌توانند در حدود ۲۵ درصد باشند، اما بسیاری از فناوری‌ها با بازده بالاتر نیز در دسترس هستند. بازده بالاتر می‌تواند از ۳۱ درصد برای گازی‌سازهای چوب^{۹۶} تا ۳۶ درصد برای سیستم‌های مدرن بستر سیال گردش^{۹۷}، بستر سیال حبابی^{۹۸} و هاضم‌های بی‌هوازی^{۹۹} متغیر باشد.

	2000-2022		
	5 th percentile (%)	Weighted average (%)	95 th percentile (%)
China	39	66	82
Europe	52	81	93
India	32	68	86
North America	43	85	94
Rest of the world	30	68	91

ضرایب ظرفیت پروژه‌های تولید برق با زیست‌توده، ۲۰۲۲-۲۰۰۰

جدول فوق اطلاعاتی در خصوص ضرایب ظرفیت برای پروژه‌های تولید برق با زیست‌توده در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ ارائه می‌کند. طبق پایگاه داده هزینه ایرنا، آمریکای شمالی بالاترین ضریب ظرفیت یعنی حدود ۸۵ درصد و به دنبال آن اروپا ۸۱ درصد و سپس چین ۶۶ درصد را به خود اختصاص داده‌اند.

❖ هزینه‌های عملیات و نگهداری

- هزینه‌های عملیات و نگهداری به دو دسته کلی هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر تقسیم می‌شوند:
- هزینه‌های ثابت عملیات و نگهداری شامل نیروی کار، بیمه، تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی‌شده و جایگزینی منظم اجزای نیروگاه (به‌عنوان مثال دیگ بخار)، تجهیزات حمل‌ونقل مواد اولیه و سایر موارد است. در مجموع، این بخش از هزینه‌ها سالانه بین ۲ تا ۶ درصد از کل هزینه‌های احداث را تشکیل می‌دهد. نیروگاه‌ها زیست‌توده بزرگ به دلیل صرفه به مقیاس، هزینه‌های ثابت عملیات و نگهداری پایین‌تری به ازای هر کیلووات دارند.
 - هزینه‌های متغیر عملیات و نگهداری برای نیروگاه‌های زیست‌توده در مقایسه با هزینه‌های ثابت، رقم پایینی دارند و به‌طور معمول با میانگین ۰.۰۰۵ دلار بر کیلووات ساعت برآورد می‌شوند. قطعات کوچک جایگزین و هزینه‌های سرویس‌دهی، اجزای اصلی هزینه‌های متغیر عملیات و نگهداری هستند، این هزینه‌ها همچنین شامل هزینه‌های سوخت غیر زیست‌توده^{۱۰۰} مانند دفع خاکستر^{۱۰۱} می‌شود. به دلیل ماهیت خاص پروژه و در دسترس بودن محدود داده‌ها، در این گزارش، هزینه‌های عملیات و نگهداری متغیر با هزینه‌های ثابت عملیات و نگهداری ادغام شده‌اند.

⁹⁶ Wood Gasifiers

⁹⁷ Circulating Fluidised Bed (CFB)

⁹⁸ Bubbling Fluidised Bed (BFB)

⁹⁹ Anaerobic Digestion Systems

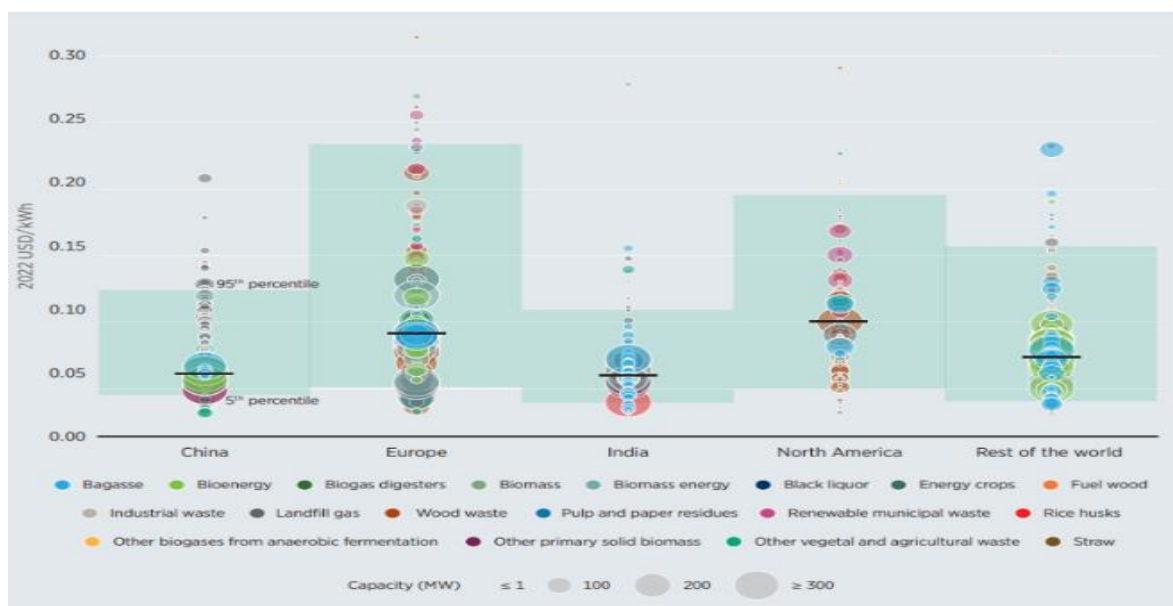
¹⁰⁰ Non-Biomass Fuel

¹⁰¹ Ash Disposal

❖ قیمت تراز شده برق ۱۰۲

دامنه وسیع فناوری‌های تولید برق زیست‌توده، هزینه‌های احداث، ضرایب ظرفیت و هزینه‌های مواد اولیه منجر به تنوع هزینه تراز مشاهده شده در برق زیست‌توده می‌شود. شکل زیر طیف تخمینی هزینه تراز شده را برای فناوری‌های تولید برق زیست‌توده بر اساس مواد اولیه و کشور/منطقه خلاصه می‌کند. شایان ذکر است که این تصویر شامل مناطقی است که پایگاه داده هزینه‌های تجدیدپذیر ایرنا داده‌های کافی برای تحلیل معنادار در اختیار داشته است.

با نگاهی به کل مجموعه داده برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، کمترین میانگین وزنی هزینه تراز شده تولید برق با زیست‌توده در هند یافت شد (۰.۰۶۰ دلار بر کیلووات ساعت). علاوه بر این، مقادیر صدک پنجم و نود و پنجم هند به ترتیب ۰.۰۴۰ دلار بر کیلووات ساعت و ۰.۱۰۹ دلار بر کیلووات ساعت بود. بالاترین میانگین وزنی برای این دوره زمانی، ۰.۱۰۱ دلار بر کیلووات ساعت بود که در آمریکای شمالی به ثبت رسید. در این منطقه صدک پنجم و نود و پنجم پروژه‌ها بین ۰.۰۵۰ دلار بر کیلووات ساعت و ۰.۱۹۵ دلار بر کیلووات ساعت قرار داشت. همچنین، میانگین وزنی هزینه تراز شده پروژه‌های زیست‌توده در چین ۰.۰۶۲ دلار بر کیلووات ساعت بود (صدک پنجم و نود و پنجم پروژه‌ها: ۰.۰۴۶ و ۰.۱۲۴ دلار بر کیلووات ساعت). میانگین وزنی در اروپا در طول این دوره نیز ۰.۰۹۲ و در سایر نقاط جهان ۰.۰۷۴ دلار بر کیلووات ساعت گزارش شد.



هزینه تراز شده بر اساس پروژه و میانگین وزنی پروژه‌های تولید برق از زیست‌توده بر اساس مواد اولیه و کشور/منطقه، ۲۰۰۰-۲۰۲۲

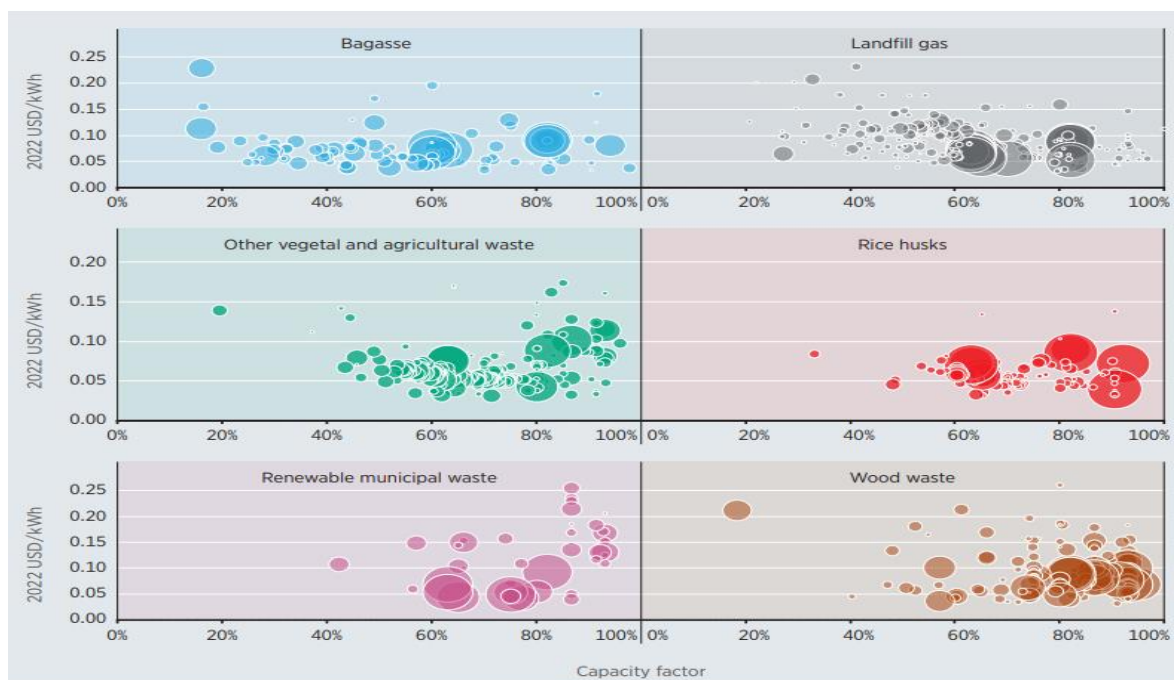
زیست‌توده می‌تواند در مواقعی که هزینه‌های سرمایه‌گذاری کم و مواد اولیه کم‌هزینه در دسترس باشد، برق بسیار رقابتی ارائه دهد. در واقع این فناوری می‌تواند تولید برق با هزینه تراز شده پایین‌تر از حدود ۰.۰۴۰ دلار بر کیلووات ساعت را امکان‌پذیر سازد. رقابتی‌ترین پروژه‌ها از بقایای کشاورزی یا جنگلی که در محل موجود است، استفاده می‌کنند. به این ترتیب، هزینه‌های مواد اولیه ناچیز یا حتی صفر است. در صورت نیاز به بخار یا حرارت در محل، سیستم‌های

ترکیبی برق و حرارت زیست‌توده می‌تواند هزینه ترازشده برق را تا ۰.۰۳ دلار بر کیلووات ساعت کاهش دهند. لازم به ذکر است که تحقق این امر، بستگی به هزینه‌های جایگزین گرما یا بخار موجود در محل دارد. با این حال، حتی پروژه‌های با هزینه بالاتر در برخی از کشورهای در حال توسعه نیز قابل توجه هستند، زیرا امنیت عرضه را با هدف جلوگیری از خاموشی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، فراهم می‌کنند. پروژه‌هایی که از مواد اولیه کم‌هزینه (مانند بقایای کشاورزی یا جنگلی یا باقی‌مانده فرآوری محصولات کشاورزی یا جنگلی) استفاده می‌کنند، هزینه ترازشده پایین‌تری دارند. در پروژه‌های موجود در پایگاه داده هزینه‌های تجدیدپذیر ایرنا، میانگین وزنی هزینه ترازشده پروژه بر اساس مواد اولیه برای استفاده از لیکور سیاه، زیست‌توده جامد اولیه (معمولاً چوب یا تراشه چوب)، زباله جامد شهری تجدیدپذیر و سایر زباله‌های گیاهی و کشاورزی، ۰.۰۶ دلار بر کیلووات ساعت یا کمتر است.

❖ پروژه‌های زباله شهری و هزینه تراز شده برق

پروژه‌های متکی به زباله‌های شهری با ضرایب ظرفیت بالا همراه هستند و به‌طور کلی منبع اقتصادی برای تأمین برق به شمار می‌روند. با این حال، هزینه ترازشده پروژه‌ها در آمریکای شمالی به‌طور قابل توجهی بالاتر از میانگین سایر مناطق است. شایان ذکر است، این پروژه‌ها در درجه اول برای حل مسائل مدیریت زباله توسعه یافته‌اند و نه برای رقابت‌پذیری تولید برق، اما این موضوع لزوماً مانعی برای عملیاتی بودن آن‌ها نیست. در اروپا، چنین پروژه‌هایی گرمای لازم برای کاربران صنعتی محلی یا شبکه‌های گرمایش منطقه‌ای را تأمین می‌کنند و درآمد حاصل از این فروش‌ها، هزینه ترازشده را به سطحی پایین‌تر از آنچه در اینجا ارائه شده است، می‌رساند. بسیاری از پروژه‌های با هزینه بالاتر در اروپا و آمریکای شمالی که از زباله‌های جامد شهری به‌عنوان مواد اولیه استفاده می‌کنند، به فناوری‌هایی با هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتر متکی هستند. دلیل این امر این است که از فناوری‌های گران‌تر برای اطمینان از کاهش آلاینده‌های محلی به سطوح قابل قبول استفاده می‌شود. حذف این پروژه‌ها میانگین وزنی هزینه ترازشده را در اروپا و آمریکای شمالی حدود ۰.۰۱ دلار بر کیلووات ساعت کاهش می‌دهد و اختلاف هزینه ترازشده با مناطق غیر عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه را کاهش می‌دهد.

شکل زیر هزینه ترازشده و ضریب ظرفیت را بر اساس پروژه برای باگاس^{۱۰۳}، لندفیل، پوسته برنج و سایر ضایعات گیاهی و کشاورزی که به‌عنوان مواد اولیه برای پروژه‌های تولید برق با زیست‌توده استفاده می‌شود، نشان می‌دهد. این شکل بیانگر این است که چگونه رابطه پویا بین در دسترس بودن مواد اولیه بر بهینه‌سازی اقتصادی یک پروژه تأثیر می‌گذارد. در دسترس بودن جریان پیوسته مواد اولیه اجازه می‌دهد تا ضرایب ظرفیت بالاتر باشد. با این حال، اگر به این معنی باشد که بقایای فصلی کشاورزی ارزان‌قیمت باید با مواد اولیه گران‌تر تکمیل شوند، لزوماً اقتصادی نیست. نکته مهم این است که هزینه ترازشده این پروژه‌ها با پروژه‌هایی که بر مواد اولیه زیست‌توده چوبی (مانند پلت‌ها و تراشه‌های چوب)، متکی هستند، قابل مقایسه است که می‌توان در تمام طول سال به راحتی آن‌ها را خریداری کرد.



هزینه ترازشده و ضریب ظرفیت بر اساس مواد اولیه منتخب برای پروژه‌های تولید برق زیست‌توده، ۲۰۲۲-۲۰۰۰

بنابراین، دسترسی به مواد اولیه کم‌هزینه، تأثیر کمبود ضرایب ظرفیت بر هزینه ترازشده را جبران می‌کند. برای پروژه‌هایی که از سایر ضایعات گیاهی و کشاورزی به‌عنوان مواد اولیه اصلی استفاده می‌کنند، داده‌ها نشان می‌دهند که بین ضرایب ظرفیت بالاتر و هزینه ترازشده پایین‌تر در کشورهای در حال توسعه، همبستگی وجود دارد؛ زیرا پروژه‌های با هزینه بالاتر با ضرایب ظرفیت بالاتر از ۸۰ درصد، همگی در کشورهای عضو سازمان همکاری اقتصادی و توسعه قرار دارند.

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

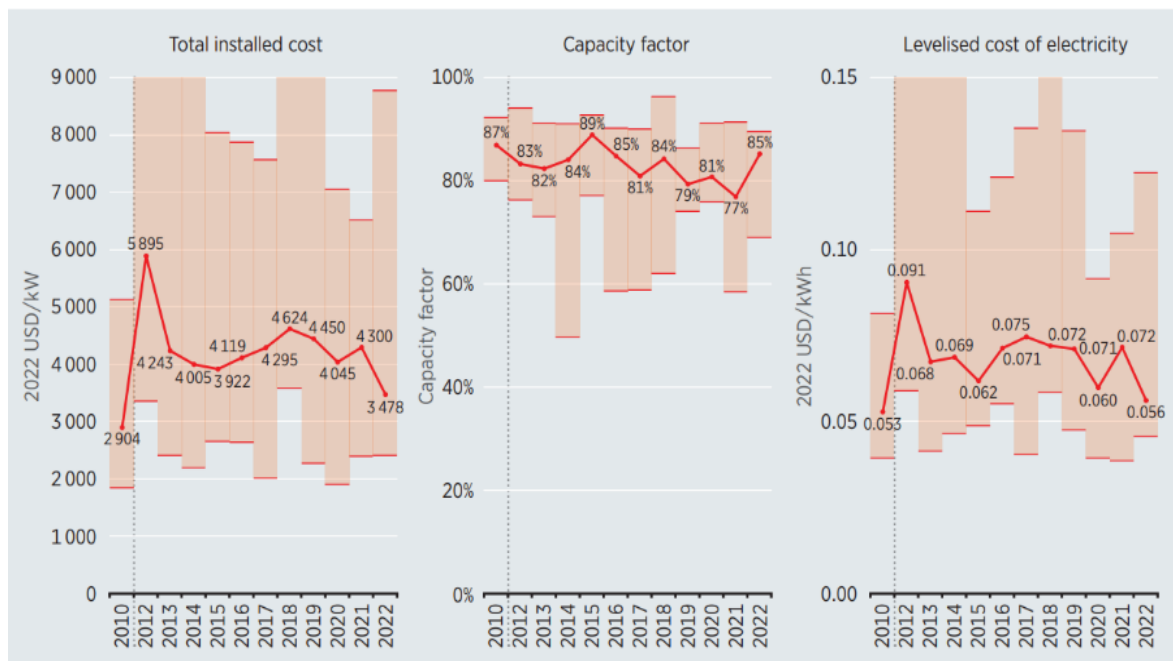
تحلیل روند فنی-اقتصادی انرژی زمین‌گرمایی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲



در پایان سال ۲۰۲۲، نیروگاه‌های تولید برق زمین‌گرمایی با ظرفیت احداث‌شده حدود ۱۴.۹ گیگاوات، ۰.۴ درصد از کل ظرفیت تولید برق تجدیدپذیر احداث‌شده در سراسر جهان را به خود اختصاص دادند. همچنین، ظرفیت کل احداث‌شده در پایان سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۰، ۴۵ درصد افزایش یافته است. کشورهایی با بیشترین ظرفیت احداث‌شده عبارت‌اند از: اندونزی، ایتالیا، کنیا، مکزیک، نیوزیلند، فیلیپین، ترکیه و ایالات‌متحده. بهترین منابع زمین‌گرمایی در مناطق زمین‌گرمایی فعال، روی سطح یا نزدیک سطح پوسته زمین یافت می‌شوند. مزیت اصلی این منابع این است که نسبت به منابع در اعماق بیشتر، با هزینه کمتری قابل دسترسی هستند. در مناطق زمین‌گرمایی فعال، با حفاری کم‌عمق در سطح زمین می‌توان ارزانه‌تر به بخار یا آب داغ طبیعی دسترسی پیدا کرد که برای تولید برق در توربین‌های بخار و یا تأمین گرما برای خانه‌ها یا صنایع مورد استفاده است.

منابع زمین‌گرمایی از انرژی گرمایی تشکیل شده‌اند که به‌صورت گرما در سنگ‌های پوسته و درون زمین ذخیره می‌شود و در اعماق کم، آب داغ و یا بخاری تولید می‌کند که می‌توان با هزینه نسبتاً کم برای تولید برق از آن بهره برد. این مناطق، با آب یا بخار با دمای بالا، در سطح یا نزدیک به سطح زمین، معمولاً به‌عنوان «مناطق زمین‌گرمایی فعال»^{۱۰۴} شناخته می‌شوند. در سایر مناطق، انرژی زمین‌گرمایی همچنان با حفاری به اعماق بیشتر و تزریق آب به منطقه داغ از طریق چاه‌ها قابل استخراج است؛ و به این ترتیب، گرمای موجود در سنگ‌های خشک مهار می‌شود.

¹⁰⁴ Active geothermal areas



میانگین وزنی کل هزینه‌های احداث، ضریب ظرفیت و هزینه تراز شده برای زمین گرمایی، ۲۰۲۲-۲۰۱۰

❖ زمین گرمایی، یک فناوری بالغ با چالش‌های منحصربه‌فرد

زمین گرمایی یک فناوری بالغ و تجاری است. این فناوری می‌تواند انرژی کم‌هزینه و دائمی را در مناطقی با منابع زمین گرمایی با دمای بالا و نزدیک به سطح زمین ارائه دهد. با این حال، توسعه منابع غیرمتداول زمین گرمایی، با استفاده از رویکرد سنگ‌های داغ خشک^{۱۰۵} یا زمین گرمایی پیشرفته^{۱۰۶}، بسیار کم‌سابقه‌تر است. در این حالت، پروژه‌ها به دلیل حفاری عمیق مورد نیاز، معمولاً با هزینه‌های بسیار بالاتری همراه هستند که باعث می‌شود از لحاظ اقتصادی چنین ابتکارهایی در حال حاضر جذاب نباشد. در این موارد تحقیق و توسعه در مورد تکنیک‌های حفاری نوآورانه‌تر، کم‌هزینه‌تر و روش‌های پیشرفته تحریک مخزن^{۱۰۷} ضروری است. این امر به کاهش هزینه‌های توسعه و تحقق کامل پتانسیل منابع زمین گرمایی پیشرفته، با مقرون به صرفه کردن آن‌ها کمک می‌کند.

با توجه به ماهیت نسبتاً منحصربه‌فرد منابع زمین گرمایی، تولید برق زمین گرمایی در مقایسه با سایر فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر ماهیت بسیار متفاوتی دارد. در واقع، توسعه یک پروژه زمین گرمایی مجموعه چالش‌های منحصربه‌فردی هنگام ارزیابی منابع و واکنش مخزن پس از شروع تولید در پی خواهد داشت. ارزیابی منابع زیرسطحی و نقشه‌برداری مخازن پرهزینه هستند. پس از تکمیل، این ارزیابی‌ها باید توسط چاه‌های آزمایشی تأیید شوند تا به

¹⁰⁵ Hot dry rocks

¹⁰⁶ Enhanced Geothermal

¹⁰⁷ Advanced Reservoir Stimulation Methodologies

تحریک مخازن پیشرفته در زمین گرمایی به تکنیک‌هایی اشاره دارد که برای افزایش بهره‌وری مخازن زمین گرمایی از طریق افزایش نفوذپذیری و جریان سیال درون مخزن استفاده می‌شود. برخی از تکنیک‌های رایج مورد استفاده شامل شکست هیدرولیکی، تزریق بخار یا آب و راهکارهای شیمیایی است.

توسعه دهندگان اجازه دهند مدلهایی با توجه به اندازه و جریان مخزن و نحوه واکنش آن به استخراج آب و بخار برای تولید برق بسازند. با این حال، تا زمانی که تجربه عملی واقعی به دست نیاید، نکات زیادی در مورد عملکرد مخزن و نحوه مدیریت آن در طول عمر عملی پروژه ناشناخته باقی خواهد ماند. این مسائل علاوه بر افزایش هزینه های توسعه، به پروژه های زمین گرمایی نسبت به سایر فناوری های تولید برق تجدیدپذیر ریسک بسیار متفاوتی می دهد.

یکی از مهم ترین چالش های توسعه پروژه های تولید برق زمین گرمایی، در دسترس بودن نقشه جامع منابع زمین گرمایی است. در صورت وجود، ابهاماتی را که توسعه دهندگان در طول دوره اکتشاف میدانی با آن مواجه می شوند، کاهش می دهد که به طور بالقوه منجر به کاهش هزینه توسعه می گردد. این امر به این دلیل است که نتایج ضعیف تر از حد انتظار در فاز اکتشاف (مانند سرعت جریان کمتر از حد پیش بینی شده یا نفوذپذیری مخزن) ممکن است نشان دهنده نیاز به حفاری بیشتر یا احداث چاه ها در منطقه ای بسیار وسیع تر برای تولید برق مورد انتظار باشد.

دولت ها می توانند با انجام برخی نقشه برداری های منابع و در دسترس قرار دادن آن برای توسعه دهندگان پروژه، ریسک های توسعه پروژه و هزینه ها برای مصرف کنندگان را کاهش دهند. به طور جهانی، حدود ۷۸ درصد از چاه های حفر شده موفقیت آمیز هستند و میانگین نرخ موفقیت در دهه های اخیر نیز بهبود یافته است. این امر احتمالاً به دلیل بهبود فناوری نقشه برداری است که می تواند با دقت بیشتری بهترین چشم اندازها را برای مکان یابی چاه ها هدف قرار دهد.

علاوه بر این، نیروگاه های زمین گرمایی از نظر کیفیت منابع و نیازهای مدیریتی متمایز هستند. در نتیجه، تجربه در یک پروژه ممکن است آموزه های خاصی را به همراه نداشته باشد که بتوان مستقیماً در توسعه های جدید به کار برد. با این حال، چنین تجربه ای ممکن است دانش گسترده تری از صنعت در اختیار بگذارد که به شناسایی بهتر سایر عوامل، از مدل سازی مخزن گرفته تا شیوه های بهره برداری و نگهداری، کمک کند. با وجود این، پایداری به بهترین شیوه های بین المللی برای بررسی و مدیریت، همراه با تجزیه و تحلیل دقیق داده ها از محل پروژه، بهترین ابزار کاهش ریسک موجود برای توسعه دهندگان است و اهمیت آن را نمی توان انکار کرد.

یکی دیگر از نقاط تمایز نیروگاه های زمین گرمایی این است که پس از راه اندازی، مدیریت نیروگاه و مخزن آن، در طول زمان، بسیار چالش برانگیزتر از نیروگاه های بادی یا خورشیدی فتوولتائیک است. فرآیند استخراج و تزریق مجدد سیال مخزن در طول عمر پروژه، شرایطی پویا ایجاد می کند که این امر بر بهره وری چاه های منفرد تأثیر می گذارد. با کسب اطلاعات واقعی و بیشتر از عملکرد سیستم، درک بهره برداران از نحوه مدیریت بهتر مخزن نیز به طور مداوم تکامل خواهد یافت.

یکی دیگر از ملاحظات مهم برای نیروگاه های زمین گرمایی این است که پس از کاهش بهره وری چاه های موجود، اغلب نیاز به چاه های جایگزین است. در نتیجه، هزینه های عملیات و نگهداری مادام العمر به طور متوسط، بالاتر از سایر فناوری های تجدیدپذیر است. با این حال، با افزایش ضرایب ظرفیت، می توانند در هر کیلووات ساعت هزینه مشابهی داشته باشند.

❖ هزینه‌های کل احداث

پروژه‌های تولید برق زمین‌گرمایی به‌طور متوسط نسبت به برق‌آبی، انرژی خورشیدی فتوولتائیک و بادی در خشکی، هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالایی دارند و هزینه‌های احداث آن‌ها بیشتر با باد فراساحلی و نیروگاه خورشیدی متمرکز^{۱۰۸} مطابقت دارد. توسعه پروژه، آماده‌سازی سایت، چاه‌های تولید و تزریق مجدد، ساخت نیروگاه و فعالیت‌های عمرانی مرتبط، هزینه‌های اولیه قابل‌توجهی را به همراه دارد.

پروژه‌های زمین‌گرمایی همچنین تحت تأثیر تغییرات هزینه حفاری قرار دارند که روند آن‌ها اغلب تحت تأثیر چرخه کسب‌وکار در صنعت نفت و گاز است. این نوسانات تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های حفاری و در نتیجه هزینه‌های مهندسی، تأمین و ساخت^{۱۰۹} دارد. هزینه‌های احداث نیروگاه زمین‌گرمایی به‌شدت به محل پروژه نیز بستگی دارد. در این رابطه، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی اشتراکات بیشتری با پروژه‌های برق‌آبی دارند. به‌طور خاص، هزینه‌های پروژه‌های برق زمین‌گرمایی تحت تأثیر کیفیت مخزن (یعنی دما، سرعت جریان و نفوذپذیری) قرار می‌گیرد زیرا این امر بر نوع نیروگاه و تعداد چاه‌های موردنیاز برای ظرفیت معین تأثیر می‌گذارد. ماهیت و وسعت مخزن، خواص حرارتی آن و سیالات به کار گرفته شده و عمق مورد بهره‌برداری، همگی بر هزینه‌های پروژه تأثیر می‌گذارند.

علاوه بر این، کیفیت منبع زمین‌گرمایی و توزیع جغرافیایی آن، نوع نیروگاه را تعیین می‌کند. انواع نیروگاه‌ها می‌تواند با رویکردهای فلاش^{۱۱۰}، بخار مستقیم^{۱۱۱}، دومداره (باینری)^{۱۱۲}، پیشرفته^{۱۱۳} یا ترکیبی^{۱۱۴} برای تأمین بخاری باشد که توربین را به حرکت درآورده و برق تولید می‌کند. به‌طورمعمول، هزینه‌های نیروگاه‌های دومداره (باینری) که برای بهره‌برداری از منابع با دمای پایین‌تر طراحی شده‌اند، نسبت به نیروگاه‌های بخار مستقیم و فلاش، بالاتر است. هزینه‌های کل احداث نیروگاه‌های زمین‌گرمایی همچنین شامل هزینه کاوش و ارزیابی منابع (ازجمله بررسی‌های لرزه‌ای^{۱۱۵} و چاه‌های آزمایشی) می‌شود. این دسته هزینه‌ها در مورد منابع خورشیدی و بادی نیز اعمال می‌شود، اما ارزیابی منابع باد و خورشید با ایستگاه‌های هواشناسی بسیار کمتر از ارزیابی‌های لازم برای نیروگاه‌های زمین‌گرمایی هزینه دارد. هزینه اصلی دیگر برای نیروگاه زمین‌گرمایی، هزینه حفاری چاه‌های تولید^{۱۱۶} و تزریق^{۱۱۷} است. اگر نیاز به بهره‌برداری از سایت زمین‌گرمایی وسیعی باشد، هزینه‌های زیرساخت سایت، جمع‌آوری سیال زمین‌گرمایی، سیستم‌های دفع و سایر تأسیسات سطحی نیز می‌تواند قابل توجه باشد.

همسو با افزایش قیمت کالاها و هزینه‌های حفاری، بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹، کل هزینه‌های احداث برای نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش یافته است. هزینه‌های توسعه پروژه در آن دوره به دلیل افزایش

¹⁰⁸ Concentrated Solar Power (CSP)

¹⁰⁹ Engineering, Procurement and Construction (EPC)

¹¹⁰ Flash

¹¹¹ Direct steam

¹¹² Binary

¹¹³ Enhanced

¹¹⁴ Hybrid

¹¹⁵ Seismic surveys

¹¹⁶ Production wells

¹¹⁷ Injection wells

هزینه‌های مهندسی عمران و تأمین و ساخت، افزایش یافت. همچنین، افزایش هزینه‌های حفاری در پی افزایش بازارهای نفت و گاز رخ داد. با این حال، به نظر می‌رسد از آن زمان به بعد، هزینه‌ها تثبیت شده‌اند. شایان ذکر است، به دلیل کم‌رونق بودن بازارها تا سال ۲۰۱۵ نوسانات قابل توجهی مشاهده شده است. در سال ۲۰۰۹، کل هزینه‌های احداث پروژه‌های تولید برق زمین‌گرمایی فلاش بین ۲,۰۹۷ تا ۴,۱۸۳ دلار بر کیلووات بود. در همان زمان، نیروگاه‌های دومداره (باینری) گران‌تر بودند و بین ۲,۴۸۱ تا ۶,۰۶۲ دلار بر کیلووات هزینه داشتند.

از سال ۲۰۱۰، اکثر نیروگاه‌های فلاش که ایرنا داده مربوطه آن‌ها را در اختیار دارد، در محدوده ۲,۲۶۰ تا ۵,۵۸۰ دلار بر کیلووات و نیروگاه‌های دومداره (باینری) در محدوده ۲,۸۹۰ تا ۵,۲۱۰ دلار بر کیلووات هزینه داشته‌اند. بر اساس داده‌های موجود در پایگاه داده هزینه‌های تجدیدپذیر ایرنا، هزینه‌های احداث از سال ۲۰۱۰ به بعد به‌طور کلی در محدوده ۲,۰۰۰ تا ۶,۰۰۰ دلار بر کیلووات قرار داشته است.

از سال ۲۰۱۳، میانگین وزنی کل هزینه احداث نسبتاً ثابت بوده است و از ۴,۶۲۴ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۱۸ تا ۳,۴۷۸ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۲، با میانگین حدود ۴,۱۵۰ دلار بر کیلووات، مشاهده شده است. رقم سال ۲۰۲۲، اگرچه به طور قابل توجهی کمتر از ۴,۳۰۰ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۱ بود، اما همچنان از ۲,۹۰۴ دلار بر کیلووات گزارش شده در سال ۲۰۱۰ بالاتر بود. در موارد استثنایی‌تر و در پروژه‌هایی که بر ظرفیت یک پروژه برق زمین‌گرمایی موجود می‌افزایند، هزینه یک نیروگاه زمین‌گرمایی می‌تواند تا ۵۶۰ دلار بر کیلووات کاهش یابد. با این حال، این به هیچ‌وجه یک امر معمول نیست و در حال حاضر به‌ندرت پروژه‌هایی با هزینه کمتر از ۲,۰۰۰ دلار بر کیلووات مشاهده می‌شود. شکل آتی کل هزینه‌های احداث برق زمین‌گرمایی را بر اساس پروژه، فناوری مورد استفاده و ظرفیت از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد.



مجموع هزینه‌های احداث نیروگاه برق زمین‌گرمایی بر اساس پروژه، فناوری و ظرفیت، ۲۰۲۲-۲۰۰۷

❖ ضریب ظرفیت^{۱۱۸}

نیروگاه‌های زمین‌گرمایی با دسترسی به بخار یا آب داغ نزدیک سطح زمین، از یک منبع انرژی مداوم برخوردار هستند و این امکان را دارند در بیشتر ساعات سال کار کنند. داده‌های پایگاه داده هزینه‌های تجدیدپذیر ایرنا برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که نیروگاه‌های زمین‌گرمایی به‌طورمعمول ضریب ظرفیت‌هایی در محدوده ۵۰ تا بیش از ۹۵ درصد داشته‌اند. با این حال، تغییرات قابل‌توجهی در هر پروژه و بین کشورها وجود دارد. این تغییرات ناشی از کیفیت منابع، دینامیک مخزن و همچنین عوامل اقتصادی (به‌عنوان تنها سه مورد از مهم‌ترین عوامل محرک) می‌باشد. شکل زیر ضریب ظرفیت پروژه‌های نیروگاه زمین‌گرمایی را در پایگاه داده هزینه‌های تجدیدپذیر ایرنا بر اساس سال، اندازه پروژه و فناوری نشان می‌دهد.



ضرایب ظرفیت نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بر اساس فناوری و اندازه پروژه، ۲۰۰۷-۲۰۲۲

میانگین ضریب ظرفیت نیروگاه‌های زمین‌گرمایی با استفاده از بخار مستقیم حدود ۸۵ درصد است، درحالی‌که میانگین برای فناوری‌های فلاش ۸۲ درصد گزارش شده است. انتظار می‌رود نیروگاه‌های زمین‌گرمایی دومداره (باینری) که از منابع با دمای پایین‌تر بهره می‌برند، به طور متوسط به ضریب ظرفیت ۸۰ درصدی دست یابند. در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی ضریب ظرفیت برای پروژه‌های زمین‌گرمایی راه‌اندازی شده جدید، ۸۵ درصد بود که نسبت به ۷۷ درصد در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است. کاهش سال ۲۰۲۱ ناشی از یک نیروگاه ترکیه‌ای با ضریب ظرفیت طول عمر^{۱۱۹} ۴۲ درصد بود.

¹¹⁸ Capacity Factor

¹¹⁹ Lifetime capacity factor

❖ هزینه تراز شده برق

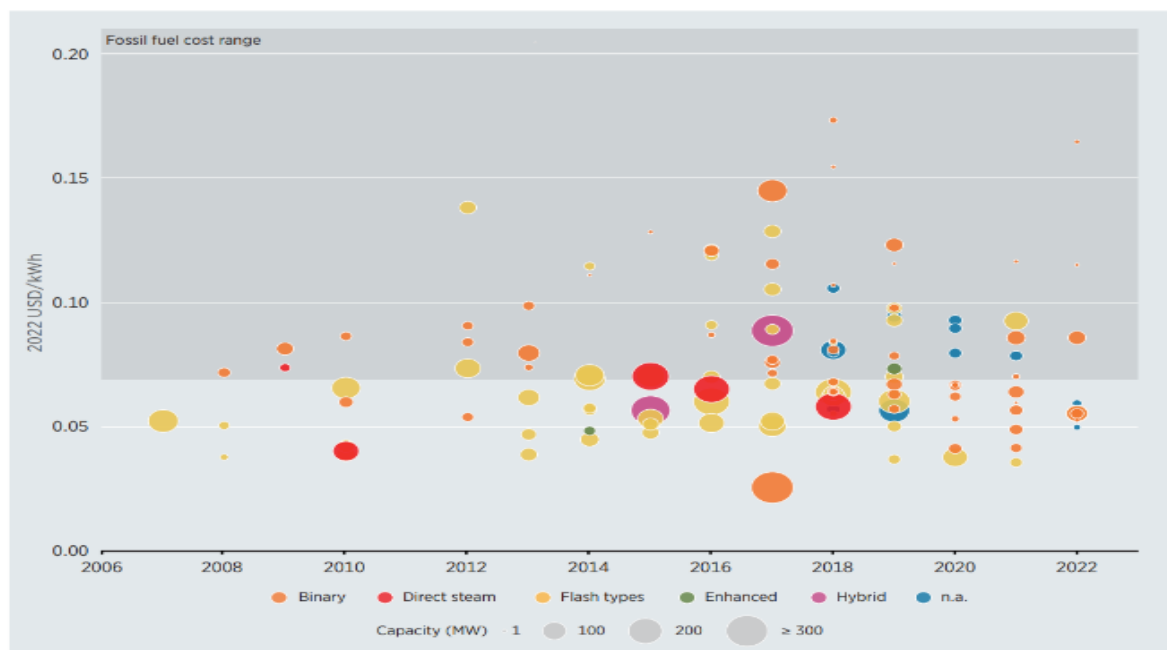
کل هزینه های احداث، میانگین وزنی هزینه سرمایه، عمر اقتصادی و هزینه های عملیات و نگهداری یک نیروگاه زمین گرمایی، هزینه تراز شده برق آن را تعیین می کند. نیروگاه های زمین گرمایی در مقایسه با برق آبی، برخی نیروگاه های زیست توده، انرژی خورشیدی فتوولتائیک و پروژه های بادی خشکی، هزینه های احداث، هزینه های عملیات و نگهداری و ضریب ظرفیت بالاتری دارند. ضریب ظرفیت بالاتر به جبران هزینه های سرمایه ای و عملیاتی کمک می کند، در عین حال نشان می دهد که نیروگاه در بیشتر ساعات سال کار می کند. پروژه های برق زمین گرمایی حتی بیشتر از فناوری های خورشیدی و بادی، در طول عمر خود نیاز به بهینه سازی مداوم دارند و مدیریت پیچیده ای از مخزن و چاه های تولید برای اطمینان از مطابقت خروجی با انتظارات را می طلبند. این امر منجر به هزینه های بالاتر بهره برداری و نگهداری می شود.

این تحلیل فرض می کند هزینه های بهره برداری و نگهداری ۱۱۵ دلار بر کیلووات در سال است و عمر اقتصادی پروژه ۲۵ سال است. شکل آتی هزینه تراز شده پروژه های برق زمین گرمایی را بر اساس فناوری و اندازه برای دوره ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ نشان می دهد. در طول این دوره، هزینه تراز شده برای توسعه مرحله دوم یک سایت موجود از ۰.۰۲۶ دلار بر کیلووات ساعت تا ۰.۱۷۴ دلار بر کیلووات ساعت برای توسعه های کوچک در مناطق دورافتاده متغیر بوده است.

هزینه های بهره برداری و نگهداری برای پروژه های زمین گرمایی به ویژه نسبت به فناوری باد خشکی و انرژی خورشیدی فتوولتائیک زیاد است؛ زیرا به مرور زمان فشار مخزن اطراف چاه تولید کاهش می یابد که منجر به کاهش نرخ جریان می شود. بنابراین راندمان چاه در طول زمان کاهش می یابد و در نهایت، اگر اقدامات اصلاحی انجام نشود، تولید برق نیز کاهش خواهد یافت. برای حفظ تولید در ضریب ظرفیت طراحی شده، مخزن و عملکرد نیروگاه های زمین گرمایی نیاز به پایش و مدیریت مداوم دارند که به طور معمول شامل اضافه کردن چاه های تولید در طول عمر نیروگاه نیز می شود. بنابراین، فرض هزینه بهره برداری و نگهداری ۱۱۰ دلار بر کیلووات در سال شامل دو مجموعه چاه برای جبران و تزریق مجدد در طول عمر ۲۵ ساله پروژه برای حفظ عملکرد است.

میانگین وزنی جهانی هزینه تراز شده در حدود ۰.۰۵۶ دلار بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۲، تقریباً به رقم ۰.۰۵۳ دلار بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ بازگشته است. اگرچه تغییرات سالانه ای در میانگین وزنی جهانی ضریب ظرفیت پروژه های راه اندازی شده جدید وجود دارد، اما این میزان اغلب کمتر از زیست توده است.

از آنجایی که معمولاً در ضریب ظرفیت تغییرات کمی وجود دارد، هزینه تراز شده پروژه های برق زمین گرمایی تمایل به پیروی از روند کل هزینه های احداث دارد. داده های موجود نشان می دهد که برای دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، هزینه تراز شده برای اکثر سال ها نسبتاً ثابت بوده است (میانگین وزنی جهانی بین ۰.۰۷۱ و ۰.۰۷۵ دلار بر کیلووات ساعت). تنها استثنا مشاهده شده، سال ۲۰۲۰ بود که با راه اندازی یک پروژه بسیار رقابتی در کنیا، به پایین ترین رقم ۰.۰۶۰ دلار بر کیلووات ساعت رسید.



هزینه تراز شده پروژه‌های انرژی زمین‌گرمایی بر اساس فناوری و اندازه پروژه، ۲۰۲۲-۲۰۰۷

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2023

برونداد تخصصی

انرژی‌های تجدیدپذیر



شماره ۱۶- ویژه‌نامه ۱۴۰۳