

هزینه تولید نیروی برق تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۲

با وجود تورم در هزینه تمام شده، رقابت پذیری انرژی تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۲ به طور چشمگیری بهبود یافته است.

پس از دهه ها روند کاهشی هزینه ها و بهبود عملکرد در فناوری های خورشیدی و بادی، اینک تولید برق تجدیدپذیر از دیدگاه مزایای اقتصادی - علاوه بر مزایای زیست محیطی آن - توجیه پذیر است.

در واقع، به دلیل افزایش شدید قیمت سوخت های فسیلی، دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ شاهد یکی از مهمترین بهبودها در رقابت پذیری انرژی های تجدیدپذیر در دو دهه گذشته، بوده است. این در حالی بود که اکثر بازارها، به استثنای چین، شاهد افزایش قیمت تجهیزات مازول های فتوولتائیک خورشیدی (PV) و توربین های بادی بودند که خود این موضوع باعث افزایش تورم در هزینه تمام شده کلی انرژی خورشیدی و بادی در بسیاری از بازارها شده است.

به استناد داده های دقیق موجود برای ۲۰ کشور در ایرنا (IRENA) در سال ۲۰۲۱، ۹ کشور شاهد بهبود رقابت پذیری PV خورشیدی در مقیاس نیروگاهی بودند، که بیش از میانگین وزنی هزینه کلی برق (Levelised cost of electricity=LCOE) بهبود یافته است. در سال ۲۰۲۲ هم هشت کشور شاهد چنین پیشرفتی بودند.

برای انرژی باد در خشکی، وضعیت شدیدتر هم بود. در دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۲، از ۲۰ کشور مورد بررسی، ۱۵ کشور بیشترین بهبود مطلق خود را در رقابت پذیری، شاهد بودند. این شامل بازارهایی می شود که "هزینه نصب کل" افزایش یافته و قیمت سوخت های فسیلی بسیار بیش از قیمت جایگزین های تجدیدپذیر آنها، افزایش یافته است.

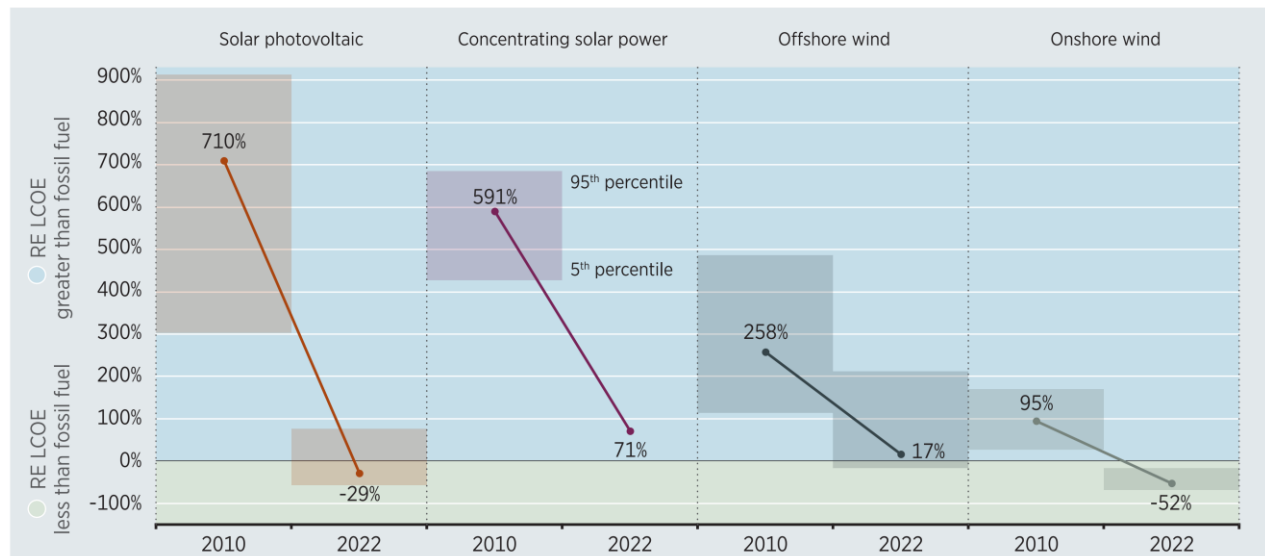
از بابت هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی و بادی، کاهش نرخ هزینه برق و بهبود رقابت پذیری آنها نیز بسیار قابل توجه است.

در سال ۲۰۱۰، میانگین وزنی LCOE کلی انرژی باد در خشکی ۰,۱۰۷ دلار در هر کیلووات ساعت (kWh) بود. این ۹۵ درصد بالاتر از کمترین هزینه سوخت فسیلی ۰,۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت در آن زمان بود. تا سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی LCOE پروژه های انرژی بادی در خشکی جدید ۰,۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت بود که ۵۲ درصد کمتر از ارزان ترین سوخت فسیلی که به ۰,۰۶۹ USD/kWh افزایش یافته بود، است.

در ابتدای همین دوره، میانگین وزنی LCOE کلی باد فراساحلی از ۲۵۸ درصد گران تر از ارزان ترین سوخت فسیلی بوده ولی در ۲۰۲۲ تنها ۱۷ درصد گران تر است، زیرا هزینه آن از ۰,۱۹۷ USD/kWh به ۰,۰۸۱ USD/kWh کاهش یافته است.

شکل S.1- تغییر در رقابت پذیری انرژی های خورشیدی و بادی بر اساس میانگین وزنی جهانی LCOE، ۲۰۱۰-۲۰۲۲

Figure S.1 Change in competitiveness of solar and wind by country based on global weighted average LCOE, 2010-2022



Note: The global weighted average LCOE data by technology and the fossil fuel LCOE data used to derive this chart is presented in detail in Chapter 1; RE = renewable energy.

انرژی متمرکز خورشیدی (CSP) شاهد کاهش میانگین وزنی LCOE جهانی از ۵۹۱ درصد گرانتر از ارزان ترین گزینه سوخت فسیلی در سال ۲۰۱۰ به ۷۱ درصد در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است.

بهبود وضعیت قیمتی در PV خورشیدی شاخص تر از همه آنها بوده است. این منبع انرژی تجدید پذیر دارای یک میانگین وزنی LCOE کلی ۰,۴۴۵ USD/kWh در سال ۲۰۱۰ - ۷۱٪ گران تر از ارزان ترین گزینه سوخت فسیلی بوده است، ولی کاهش چشمگیر هزینه ها تا سال ۲۰۲۲ - به ۰,۰۴۹ دلار در کیلووات ساعت - باعث جهانی شدن PV خورشیدی شد. یعنی میانگین وزنی LCOE، 29 درصد کمتر از ارزان ترین گزینه سوخت فسیلی شده است.

در واقع، عمدتاً به دلیل افزایش قیمت سوخت های فسیلی و افزایش هزینه های تولید برق آنها در سال های ۲۰۲۱-۲۰۲۲، حدود ۸۶ درصد از پروژه های تولیدی انرژی تجدیدپذیر در مقیاس نیروگاهی که در سال ۲۰۲۲ راه اندازی شدند، معادل ۱۸۷ گیگاوات (GW)، هزینه تمام شده برق آنها کمتر از میانگین وزنی گزینه های فسیلی داشتند. این رقم ۸ درصد بیشتر از ۱۷۴ گیگاوات برآورد شده برای سال ۲۰۲۱ بود.

به طور کلی، بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، ۱۱۲۰ گیگاوات تولید برق تجدیدپذیر با LCOE کمتر از میانگین وزنی LCOE سوخت فسیلی به بهره برداری رسید.

برق تجدیدپذیر مزایای عمده انرژی ایمن را فراهم می کند.

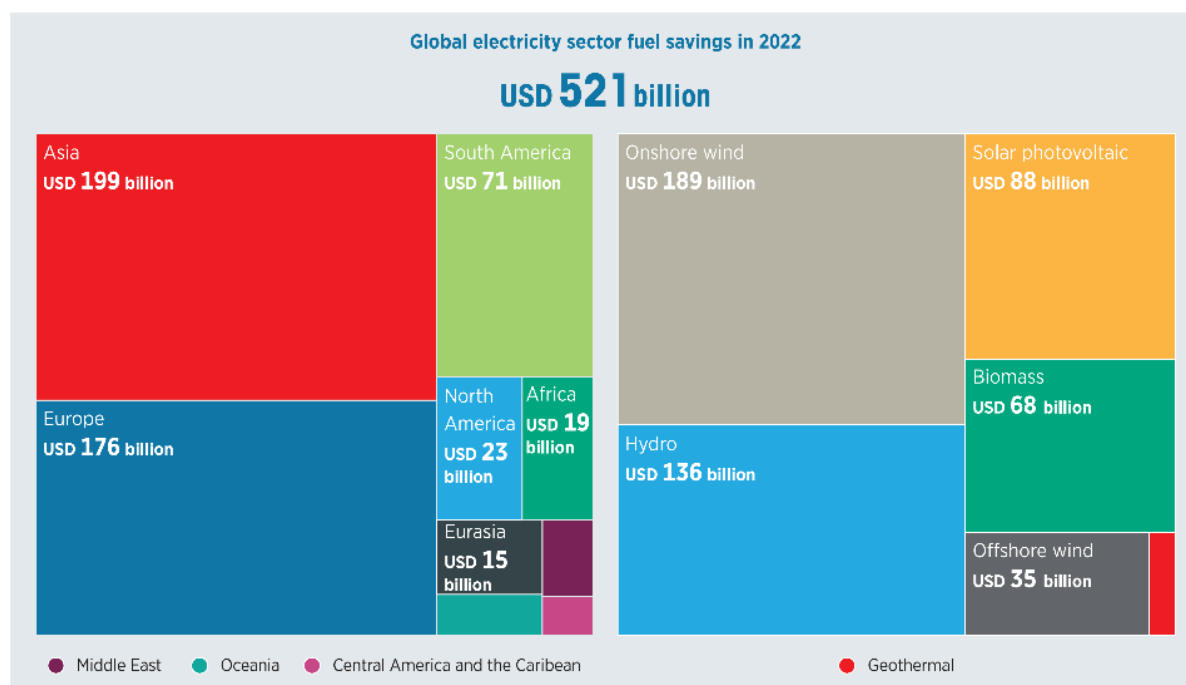
بحران قیمت سوخت های فسیلی در سال ۲۰۲۲ یادآور مزایای اقتصادی قدرتمندی بود که انرژی های تجدید پذیر برق می تواند از نظر امنیت انرژی تامین کند. در واقع، سال ۲۰۲۲ سالی بود که امنیت انرژی از آن سود می برد و به عبارتی انرژی های تجدیدپذیر به طور گسترده ای "بازکشف" شدند.

برخلاف سیاست های امنیت انرژی که بر تامین فیزیکی سوخت های فسیلی تمرکز دارند، برق تجدیدپذیر در مقایسه با قیمت های ذاتاً ناپایدار سوخت های فسیلی، هزینه های اقتصادی را با کاهش نیاز به سوخت های فسیلی و واردات آنها کم می کند. به طور خلاصه، جایگزین های سوخت های فسیلی که هزینه

های ثابتی در طول عمر خود دارند، و مانند انرژی تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی، می‌توانند به سرعت جایگزین شوند، تا حد زیادی مزایای انرژی ایمن را فراهم می‌کنند. هر چند ظاهراً این موضوع بدیهی به نظر برسد، اما در تلاش برای تامین منابع سوخت فسیلی مازاد در سال ۲۰۲۲، اغلب یک اولویت ثانویه در میان سیاستگذاران بود.

انرژی تجدیدپذیری که از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۲، در سطح جهان به کار گرفته شد، حدود ۵۲۱ میلیارد دلار هزینه سوخت، تنها در بخش برق صرفه جویی کرده است. این رقم در اروپا ۱۷۶ میلیارد دلار بود. علاوه بر این، احتمالاً تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از سال ۲۰۱۰ این قاره را از یک بحران کامل اقتصادی نجات داده است، چرا که در نبود تولید برق تجدیدپذیر، احتمال افزایش جهشی هزینه‌های اقتصادی مستقیم سوخت‌های فسیلی بسیار بیشتر بود.

Figure S.2 Global fossil fuel cost savings in the electricity sector in 2022 from renewable power added since 2000

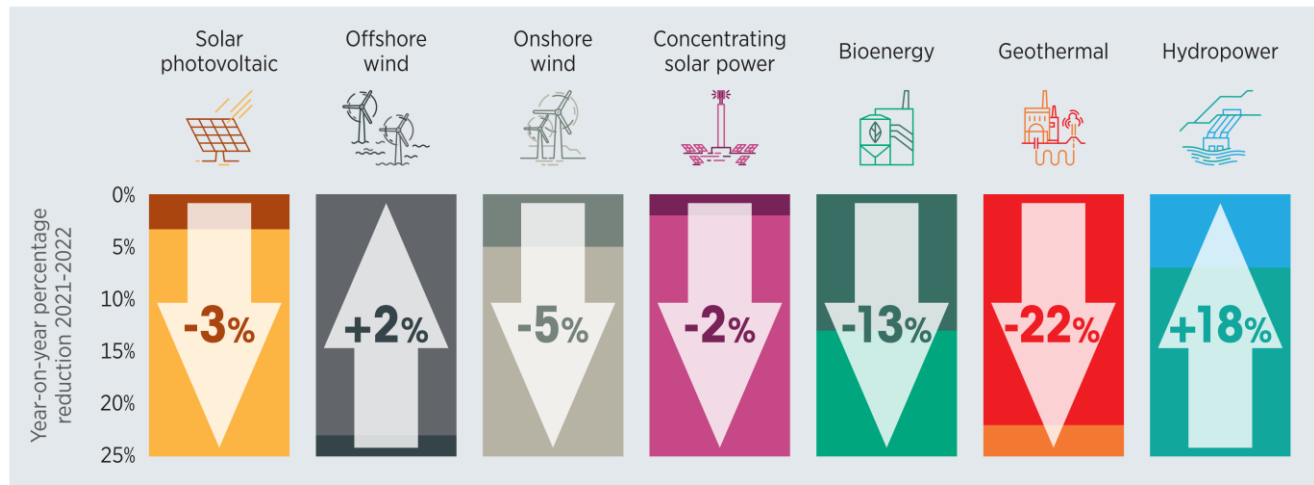


در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه برق از PV خورشیدی، انرژی باد در خشکی، CSP، بیوانرژی و زمین گرمایی همه سقوط کردند.

برای پروژه‌های بادی در خشکی که به تازگی راه اندازی شده‌اند، میانگین وزنی LCOE جهانی بین ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، ۵ درصد از ۰٫۳۵ USD/kWh تا ۰٫۳۳ USD/kWh کاهش یافته است.

در سال ۲۰۲۲، چین بار دیگر بزرگترین بازار برای افزایش ظرفیت جدید انرژی بادی در خشکی در جهان بود. این کشور با افزایش سهم خود از ۴۱ درصد به ۵۰ درصد بین سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ واحدهای منصوبه جدید، به این مهم دست یافت. که این به نوبه خود منجر به کاهش سهم بازارهایی با هزینه‌های نصب شده بالاتر نسبت به سال ۲۰۲۱ شد. در صورت حذف چین از آمارها، منحنی LCOE میانگین وزنی جهانی برای انرژی باد در خشکی برای این دوره یک خط صاف باقی می‌ماند.

Figure S.3 Global LCOE from newly commissioned, utility-scale renewable power technologies, 2021-2022



برای پروژه‌های فتوولتائیک خورشیدی نیروگاهی تازه راه‌اندازی شده، از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی LCOE با ۳ درصد کاهش به ۰,۰۴۹ دلار در کیلووات ساعت رسید. این به دلیل کاهش ۴ درصدی میانگین وزنی کل هزینه نصب شده برای این فناوری، از ۹۱۷ دلار آمریکا به ازای هر کیلووات در سال ۲۰۲۱ به ۸۷۶ دلار در کیلووات برای پروژه‌هایی که در سال ۲۰۲۲ راه‌اندازی شدند، بود.

به طور کلی، تجربه PV خورشیدی در سال ۲۰۲۲ ترکیبی بود و بازارهای مختلف در جهات مختلف حرکت کردند. کاهش LCOE در سال ۲۰۲۲ کمتر از ۱۳ درصد کاهش سال به سال تجربه شده در سال ۲۰۲۱ بود، برای ۱۱ عدد از ۲۰ بازار برتر فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس نیروگاهی، که ایرنا اطلاعات دقیقی برای آنها دارد، مجموع هزینه نصب شده افزایش یافته است. برخی از این افزایش‌ها قابل توجه بود - برای مثال در فرانسه و آلمان ۳۴ درصد و یونان شاهد افزایش ۵۱ درصدی در پایان سال ۲۰۲۱ و تا سال ۲۰۲۲، بود. در برخی موارد این افزایش به صورت طبیعی ناشی از انجام پروژه‌های فردی بوده ولی تغییرات در هزینه‌های نیروی کار و کالا عامل اصلی این افزایش هستند.

با این وجود، میانگین موزون جهانی هزینه برق حاصل از PV خورشیدی در مقیاس صنعتی تازه راه‌اندازی شده، کاهش یافته است. چرا که در سال ۲۰۲۲، که چین نسبت به بسیاری از بازارهای جهانی هزینه کمتری داشت و به دلیل افزایش ظرفیت احداث PV خورشیدی در مقیاس نیروگاهی از ۳۸ درصد در سال ۲۰۲۱ به حدود ۴۵ درصد در سال ۲۰۲۲، سهم زیادی در این کاهش داشته است.

بازار بادی فراساحلی افزایش ۸,۹ گیگاوات ظرفیت جدید در سال ۲۰۲۲ را تجربه کرد. اگر گسترش بی‌سابقه‌ای که در سال ۲۰۲۱ در چین روی داد و در آن ۲۱ گیگاوات به ظرفیت بادی جهان اضافه شد، نبود این رقم تبدیل به یک رکورد جدید می‌شد.

در واقع، کاهش سهم چین در افزایش ظرفیت‌های جدید و راه‌اندازی پروژه‌ها در سال ۲۰۲۲ در بازارهای جدید، میانگین موزون جهانی هزینه برق پروژه‌های جدید را ۲ درصد افزایش داد و در مقایسه با سال ۲۰۲۱، از ۰,۰۷۹ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۰۸۱ دلار در کیلووات ساعت رسید.

افزایش میانگین وزنی جهانی کل هزینه‌های نصب شده (از ۳۰۵۲ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۱ تا ۳۴۶۱ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۲۲) تا حدی به دلیل افزایش ضریب ظرفیت پروژه‌های تازه راه‌اندازی شده از ۳۹ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۴۲ درصد در سال ۲۰۲۲ بوده است.

برای **انرژی برق زیستی** تازه راه‌اندازی شده بین ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی LCOE جهانی ۱۳ درصد کاهش یافت و از ۰,۰۷۱ دلار در کیلووات ساعت تا ۰,۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت رسید. این بیشترین دلیل افزایش سهم پروژه‌های کم‌هزینه جدید راه‌اندازی شده در چین و برزیل در سال ۲۰۲۲ بوده است.

برای **پروژه های انرژی زمین گرمایی**، بین سال های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی جهانی LCOE ناشی از ده پروژه راه اندازی شده، ۲۲ درصد کاهش یافت و به ۰,۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت رسید.

در مقابل، **پروژه های نیروگاه آبی** تازه راه اندازی شده شاهد افزایش میانگین وزنی LCOE جهانی خود به میزان ۱۸ درصد بین سال های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ بوده اند و از ۰,۰۵۲ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت رسید. در سال ۲۰۲۲، تعدادی از پروژه ها که با تأخیرهای قابل توجهی مواجه شده بودند و هزینه های بیش از حد زیادی را متحمل شده بودن، به طور جزئی یا کامل راه اندازی شدند. در نتیجه، میانگین موزون جهانی هزینه کل نصب شده پروژه های جدید برق آبی در سال ۲۰۲۲ از ۲۲۹۹ دلار/کیلووات دلار در سال ۲۰۲۱ به ۲۸۸۱ دلار/کیلووات افزایش یافت که افزایش ۲۵ درصدی را باعث شدند.

بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، هزینه انرژی خورشیدی و بادی کاهش قابل توجهی را تجربه کرده است

انتظارات قیمتی بازیگران حوزه انرژی از بازارهای سوخت فسیلی بر اثر تجربیات دو سال گذشته دچار تغییراتی شده است و آسیب پذیری کشورهای وابسته به سوخت های فسیلی در تولید برق را نیز آشکار ساخته است. با این حال، حتی قبل از بحران قیمت سوخت های فسیلی در سال ۲۰۲۲، انرژی های تجدیدپذیر رقابت پذیری خود نسبت به سوخت های فسیلی را تقویت کرده بودند.

در واقع، زمانی که ظرفیت تولید برق جدید در سال ۲۰۲۱ مورد نیاز بود، انرژی های تجدیدپذیر به میزان قابل توجهی کاهش قیمت نسبت به سوخت های فسیلی جدید داشته اند، حتی در بسیاری از موارد که آثار پشتیبانی های مالی لحاظ گردید، انرژی های تجدیدپذیر از نیروگاه های موجود هم بهای کمتری را تحمیل می کردند. به دلیل جهش افزایشی در قیمت سوخت های فسیلی در سال ۲۰۲۲، بهبود رقابت پذیری انرژی های تجدیدپذیر چشمگیر بود.

از سال ۲۰۱۰، سیستم های فتوولتائیک خورشیدی سریع ترین کاهش هزینه را تجربه کرده است. بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه کلی LCOE پروژه های فتوولتائیک خورشیدی در مقیاس نیروگاهی تازه راه اندازی شده از ۰,۴۴۵ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۰۴۹ دلار بر کیلووات ساعت - ۸۹ درصد- کاهش یافت. این تغییر عمدتاً ناشی از کاهش قیمت ماژول ها بوده است. علیرغم افزایش در سال ۲۰۲۲، این رقم بین دسامبر ۲۰۰۹ و دسامبر ۲۰۲۲، حدود ۹۰ درصد کاهش را نشان می دهد. کاهش های مهم دیگری هم در زمینه هزینه های ساخت، بهره برداری و نگهداری، و هزینه های سرمایه گذاری، روی داده است.

برای **پروژه های انرژی بادی در خشکی**، بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی هزینه برق کلی ۶۹ درصد کاهش یافته و از ۰,۱۰۷ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۰۳۳ دلار در کیلووات ساعت رسید. کاهش هزینه برای انرژی باد در خشکی ناشی از دو عامل کلیدی کاهش هزینه توربین بادی و افزایش ضریب ظرفیت توربین های بادی حاصل از پیشرفت فناوری بوده است.

بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، کاهش قیمت توربین های بادی در خارج از چین بین ۳۹-۵۵٪ متناسب با شاخص قیمت توربین بادی بکار رفته، بوده است، ولی کاهش در چین به میزان تقریبی دو سوم، یعنی ۶۴٪، شده است. میانگین وزنی کلی ضریب ظرفیت پروژه های تازه راه اندازی شده از ۲۷ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۳۹ درصد برای پروژه هایی که در سال ۲۰۲۱ راه اندازی شدند، افزایش یافت. با این حال، این میانگین وزنی کلی در سال ۲۰۲۲ به ۳۷٪ کاهش یافت، زیرا سهم احداث های جدید توسط چین در مکان هایی با پتانسیل کم بادی افزایش یافت.

برای **پروژه های بادی فراساحلی** تازه راه اندازی شده، بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ میانگین وزنی جهانی LCOE از ۰,۱۹۷ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۰۸۱ دلار در کیلووات ساعت کاهش یافت که معادل ۵۹ درصد است.

در سال ۲۰۱۰، میانگین وزنی LCOE پروژه های بادی فراساحلی تازه راه اندازی شده در چین و اروپا به ترتیب ۰,۱۸۹ USD/kWh و 0.198 USD/kWh بوده است. در حالیکه این رقم در سال ۲۰۲۱ برای پروژه های اروپایی تازه راه اندازی شده ۰,۰۵۶ USD/kWh شده است که کمتر از هزینه ۰,۰۸۳ USD/kWh در چین در همان سال بوده است. با این حال در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی LCOE در اروپا به ۰,۰۷۴ دلار در کیلووات ساعت افزایش یافت.

این به دلیل انجام پروژه های گران تر در بازارهای جدید رخ داده است. با این حال در سال ۲۰۲۲، LCOE در پروژه های تکمیل شده در اروپا همچنان حدود ۴ درصد کمتر از پروژه های چینی، با میانگین وزنی ۰,۰۷۷ دلار در کیلووات ساعت بوده است.

احداث CSP همچنان ناامید کننده است، با کمتر از ۰,۱ گیگاوات در سال ۲۰۲۲ و ظرفیت منصوبه کل جهانی به میزان ۶,۵ گیگاوات در پایان سال ۲۰۲۲.

برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، هزینه میانگین وزنی جهانی پروژه های CSP تازه راه اندازی شده از ۰,۳۸ دلار در کیلووات ساعت به ۰,۱۱۸ دلار در کیلووات ساعت کاهش یافت. با وجود نوسانات سالانه - کاهش ۶۹٪ در هزینه های CSP به سرعت در بین سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ اتفاق افتاد. با این حال، از سال ۲۰۲۰، احداث پروژه های دارای تأخیر یا با طرح های بدیع، میانگین وزنی جهانی هزینه های برق را تحت تاثیر قرار داده اند. فناوری CSP با وجود کاهش هزینه همچنان راکد بوده و ظرفیت تجمعی آن تنها ۶,۵ گیگاوات است لذا نیازمند اعمال سیاست های حمایتی مضاعف است.

انرژی زیستی در مقیاس نیروگاهی با میانگین وزنی کلی LCOE نوسانات محدودی را در طول دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰ تجربه کرد بدون اینکه روند قابل توجه صعودی یا نزولی داشته باشد. اما در سال ۲۰۲۲، میانگین وزنی LCOE کلی انرژی زیستی ۰,۰۶۱ دلار در کیلووات ساعت، ۱۳ درصد کمتر از مقدار سال ۲۰۲۱ بود و یک چهارم کمتر از ارزش سال ۲۰۱۰ که ۰,۰۸۲ دلار در کیلووات ساعت بود.

برای **پروژه های زمین گرمایی**، میانگین وزنی LCOE کلی بین سال های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ ۲۲ درصد کاهش یافته و به ۰,۰۵۶ دلار در کیلووات ساعت رسید. این مقدار ۶ درصد بیشتر از سال ۲۰۱۰ بود، اما همچنان در محدوده ۰,۰۵۳ USD/kWh تا ۰,۰۹۱ USD/kWh بود. محدوده ای که بین سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ ثبت شده است.

پروژه های نیروگاه آبی تازه راه اندازی شده شاهد افزایش میانگین وزنی LCOE جهانی ۴۷ درصدی بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، از ۰,۰۴۲ USD/kWh تا ۰,۰۶۱ USD/kWh بوده است که این مقدار در سال ۲۰۲۲ همچنان از ارزان ترین نیروگاه برق با سوخت فسیلی جدید پایین تر بود، علیرغم این واقعیت که میانگین وزنی هزینه های جهانی ۱۸ درصد افزایش یافته است. افزایش در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۲۱ ناشی از راه اندازی تعدادی از پروژه ها بود که هزینه های بسیار قابل توجهی را مصرف کردند که بیشتر آنها در کانادا بوده است.

Figure S.4 Global LCOE from newly commissioned utility-scale renewable power technologies, 2010 and 2022

