وزارت نیرو
سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر
بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)

پژوهشگاه نیرو

بروندداد تخصصی

انرژی‌های تجدیدپذیر

شماره ۸ – بهمن ۱۴۰۲

برونداد تخصصی

انرژی‌های تجدیدپذیر

ویژه‌نامه فناوری‌های برق‌آبی

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

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 حمیدرضا لاری

ناظر پژوهشگاه: دکتر محمد چمنی

ناظر کارفرما: دکتر اکبر شعبانی‌کیا

همکاران این گزارش:

مهندس ثریا رستمی – مهندس سارا جوکار

شماره ۸– بهمن ماه ۱۴۰۲

فهرست مطالب

جایگاه نیروگاه‌های برق‌آبی در صنعت برق ایران ٤

تحولات صنعت حمل و نقل با انرژی‌های تجدیدپذیر برای آینده‌ای پاک‌تر ٧

تحلیل روند و ارزیابی اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ ..... ۱۳

ده روند برتر برق‌آبی در سال ۲۰۲۳ ..... ۲۳

آمار فناوری‌های برق‌آبی در جهان و افق پیش‌رو ۲۹

چاینا تری‌گورجز پیشتاز برق‌آبی ۳۵

دوقلوهای دیجیتال در برق‌آبی ٤۳

فناوری‌های برق‌آبی و چالش‌های آن ٤٦

پتانسیل فتوولتائیک خورشیدی برای تقویت نیروگاه‌های آبی ٥٦

چین و هند و بزرگ‌ترین بحران انرژی آبی آسیا ٥۹

سیستم تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره‌ساز انرژی چندمنظوره و مقرون‌به‌صرفه ٦۱

رکورد تأسیسات برق تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۳ در آلمان ٦٤

خط لوله آب اپوکسی تقویت‌شده با شیشه برای پروژه تلمبه-ذخیره‌ای در هاتا دبی ٦٦

نصب اولین هیبرید هیدروالکتریک و خورشیدی توسط ایبردرولای اسپانیا ٦۷

افتتاح ۱٦٦۰ نیروگاه خورشیدی ٥ کیلوواتی در دهه فجر ٦۹

افزایش ٦۰ درصدی تولید سالانه بزرگ‌ترین نیروگاه برق آبی ایران ۷۰

تامین حدود ۲۸ درصد برق مصرفی ساتبا از انرژی خورشید ۷۱

سخن آغازین

جایگاه نیروگاه‌های برق‌آبی در صنعت برق ایران

ایران دارای ۶۰ نیروگاه برق‌آبی است که ۹۰ درصد انرژی‌های تجدیدپذیر تولیدشده در سراسر کشور را تشکیل می‌دهند. بر اساس اطلاعات وزارت نیرو، ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر ایران ۱۴ هزار مگاوات است که ۱۲ هزار و ۶۰۰ مگاوات آن از انرژی آبی تأمین می‌شود. بقیه از منابع تجدیدپذیر دیگر، ازجمله پنل‌های خورشیدی، مزارع بادی، نیروگاه‌های انرژی زباله و کارخانه‌های زیست‌توده تولید می‌شود. تولید برق نیروگاه‌های برق‌آبی ایران در شش‌ماهه نخست سال جاری (۳۰ اسفند تا ۳ شهریور۱۴۰۲) به ۴۷۵۰ گیگاوات ساعت رسید که ۸۰ درصد بیشتر از مدت مشابه سال قبل است.

به گفته وحید ایزدی، قائم‌مقام شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران[1]، نیروگاه‌ها با انجام تعمیرات به‌موقع واحدهای نیروگاهی و مدیریت مخازن سدهای در حال بهره‌برداری، حداکثر ظرفیت تولید در دوره اوج تابستان را داشته‌اند.

بر اساس آخرین اطلاعات ارائه‌شده از سوی وزارت نیرو، در حال حاضر ۵۵ نیروگاه برق‌آبی با ظرفیت مجموع ۱۲۱۶۹ مگاوات در سراسر کشور فعال هستند. نیروگاه‌های مذکور، هرساله به طور میانگین ۲۷۶۹۶ گیگاوات ساعت برق تولید می‌کنند. در این میان ۱۶ نیروگاه از ۵۵ نیروگاه مذکور در حوضه دریای خزر، ۲۵ نیروگاه در مجاورت خلیج‌فارس و دریای عمان، یک نیروگاه در مجاورت دریاچه ارومیه و درنهایت ۱۳ نیروگاه در مرکز ایران قرار دارند. به گفته وزارت نیرو، در حال حاضر ۱۷ نیروگاه برق‌آبی جدید با ظرفیت کل ۳۵۱۷ مگاوات نیز در سراسر کشور در حال ساخت است.

ظرفیت فعلی تولید برق ایران حدود ۹۰ گیگاوات است که سهم برق‌آبی نزدیک به ۱۶ درصد است. بیشتر ظرفیت تولید برق ایران از نیروگاه‌های حرارتی تأمین می‌شود. در حال حاضر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بیشترین سهم از کل ظرفیت تولید برق کشور را به خود اختصاص می‌دهند و پس‌ازآن نیروگاه‌های گازی قرار دارند.

[1] Iran Water and Power Resources Development Company (IWPCO)

❖ نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک‌مقیاس ایران

معاونت نیروگاه‌های آبی شرکت مدیریت منابع آب ایران نظارت و هدایت بهره‌برداری بیش از ۹۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب‌شده و همچنین نظارت بر عملکرد بهینه پروژه‌های در دست اجرا با ظرفیت ۵۰۰۰ مگاوات و برنامه‌ریزی و نظارت بر فعالیت‌های حدود ۱۶۰۰۰ مگاوات را بر عهده دارد. ظرفیت در دست مطالعه، مجموعاً با ظرفیت ۳۰۰۰۰ مگاوات است. سهم نیروگاه‌های آبی کوچک (۱ کیلووات تا ۱۰ مگاوات) حدود ۶۷۴ مگاوات شامل ۴۵ مگاوات در دست بهره‌برداری، ۴۷ مگاوات در حال ساخت و ۵۸۲ مگاوات در دست مطالعه و آماده سرمایه‌گذاری می‌باشد. نیروگاه‌های آبی کوچک به‌عنوان یک پتانسیل برجسته برای تولید برق و کاهش مشکلات زیست‌محیطی و منبع تأمین انرژی بی‌نهایت برای توسعه اراضی و اشتغال‌زایی در بازار انرژی جهان مطرح‌شده است. گفتنی است در استانداردهای جهانی معمولا نیروگاههای کمتر از ۱۰۰ کیلووات به نام نیروگاههای میکرو، نیروگاههای بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات به نام نیروگاههای مینی و نیروگاههای بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلووات به نام نیروگاههای کوچک شناخته می شوند.

پتانسیل نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در ایران

ظرفیت (MW)	فاز
۴۵	در حال بهره برداری
۴۷	در حال ساخت
۵۸۲	در حال مطالعه
٦٧٤	**کل**

ظرفیت اسمی نیروگاه‌های آبی بر اساس بزرگ، متوسط و کوچک (در دست بهره‌برداری، ساخت و مطالعه)

ظرفیت اسمی برق‌آبی (MW)	طبقه	
۸۱۳۶	بزرگ	در حال بهره برداری
۵۵۸	متوسط	
۵۲	کوچک	
۵۱۱۰	بزرگ	در حال ساخت (تا پایان برنامه پنجم)
۷۵	متوسط	
۱۶	کوچک	
۱۴۳۶۱	بزرگ	در حال مطالعه
۲۰۰۰	متوسط	
۳۰۰	کوچک	
۳۰٦۰۸	**کل**	

❖ پنج نیروگاه برق‌آبی درحال‌توسعه در ایران

بر اساس گزارش گلوبال دیتا[2]، در سال ۲۰۲۱، ۱۶.۷ درصد از کل تاسیسات نیروگاهی در سراسر جهان، از ظرفیت آبی تشکیل شده بود. ظرفیت کلی آبی ثبت شده در این تاریخ، ۱۳۵۷ گیگاوات بوده است. هم‌چنین، انتظار می‌رود تا پایان سال ۲۰۳۰، ظرفیت نصب تجمعی برق‌آبی تا ۱۵۵۵ گیگاوات افزایش یابد که ۱۲.۶ درصد از تأسیسات نیروگاهی در سراسر جهان را شامل خواهد شد. ۰.۹۲ درصد از کل ظرفیت آبی جهان در ایران قرار دارد. بر اساس پایگاه داده نیروگاه‌های گلوبال دیتا، پنج نیروگاه بزرگ آبی آینده ایران از نظر ظرفیت، در زیر فهرست شده‌اند.

۱. گتوند علیا: گتوند علیا یک پروژه برق‌آبی با ظرفیت ۲۰۰۰ مگاوات است که در خوزستان، ایران واقع شده است. این پروژه، توسط توسعه منابع آب و نیروی ایران[3] درحال‌توسعه است. این پروژه در حال حاضر در مرحله نیمه فعال قرار دارد.

۲. بختیاری: بختیاری یک پروژه برق‌آبی ۱۵۰۰ مگاواتی در لرستان، ایران است. توسعه منابع آب و نیروی ایران، درحال‌توسعه این پروژه است. انتظار می‌رود این پروژه تا سال ۲۰۲۷ آنلاین شود. پروژه بختیاری در حال حاضر در مرحله ساخت قرار دارد.

۳. کارون ۲: کارون ۲، پروژه ۶۶۹ مگاواتی در خوزستان، ایران قرار دارد و متعلق به توسعه منابع آب و نیروی ایران است. این پروژه آبی در حال حاضر در مرحله ساخت است. بهره‌برداری تجاری از این پروژه تا پایان سال ۲۰۲۳ پیش‌بینی شده بود.

۴. آزادPSP : آزاد PSP، یک پروژه برق‌آبی ۵۱۰ مگاواتی است و در کردستان ایران واقع شده است. این پروژه در حال حاضر در مرحله ساخت است. این پروژه نیز توسط توسعه منابع آب و نیروی ایران توسعه خواهد یافت. پس از اتمام ساخت، پیش‌بینی می‌شود این پروژه تا سال ۲۰۲۶ به بهره‌برداری برسد.

۵. خرسان سوم: پروژه آبی ۴۰۰ مگاواتی خرسان سوم توسط توسعه منابع آب و نیروی ایران درحال‌توسعه است. مطابق پیش‌بینی‌ها این پروژه، می‌بایست تا پایان سال ۲۰۲۳ به بهره‌برداری می‌رسید.

افزایش ظرفیت تولید برق کشور و جلوگیری از خاموشی در دوره‌های پیک مصرف، از اولویت‌های وزارت نیرو از زمان روی کار آمدن دولت فعلی در سال ۲۰۲۱ بوده است.

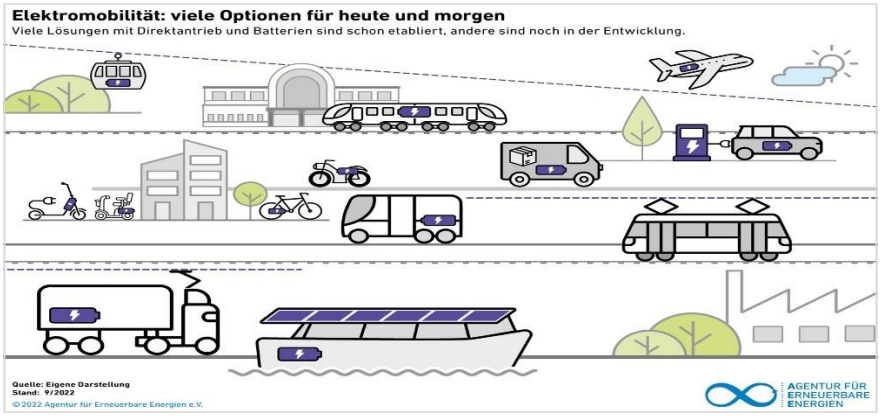
منابع:

- tehrantimes.com - Hydropower output up over 80% in 6 months on year – 7 October 2023
- financialtribune.com - Hydropower Accounts for 90% of Iran’s Renewable Energy Output – 9 November 2022
- wrm.ir - Hydropower Plants in Iran
- power-technology.com - Top five hydro power plants in development in Iran - July 19, 2023

[2] GlobalData
[3] Iran Water and Power Resources Development

تحولات فناورانه

تحولات صنعت حمل و نقل با انرژی‌های تجدیدپذیر برای آینده‌ای پاک‌تر

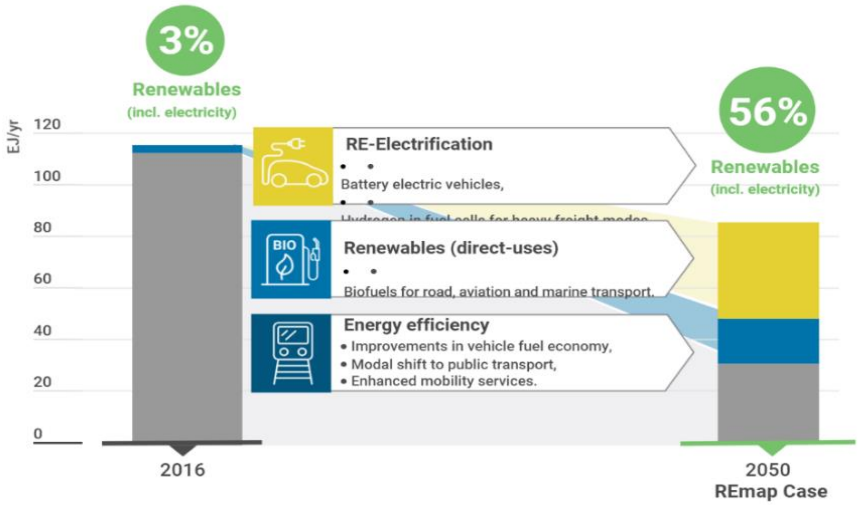


کربن‌زدایی بخش حمل و نقل همچنان یک چالش است. در چند سال گذشته، با افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بخش برق پیشرفت‌های مهمی در کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید داشته است. بااین‌حال، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش حمل‌ونقل هنوز بسیار کم‌تر از سطوح موردنیاز برای تحقق اهداف توافق‌نامه پاریس است. حمل‌ونقل مسئول مصرف حدود ۳۰ درصد از مصرف جهانی انرژی است و انتظار می‌رود مصرف انرژی آن تا سال ۲۰۵۰ رشد قابل‌توجهی داشته باشد.

ترکیبی از رویکردهای کم‌کربن می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل را از ۸.۵ گیگاتن کربن‌دی‌اکسید امروزی به ۲.۴ گیگاتن کربن‌دی‌اکسید در سال، تا سال ۲۰۵۰ کاهش دهد(۸۰٪ کاهش). گذار موفق در بخش حمل‌ونقل نیازمند اقدام در حال حاضر است. اقدامات اولیه در این بخش باید شامل موارد زیر باشد:

- کاهش حجم حمل‌ونقل و ازدحام با ترویج ارتباطات دیجیتال
- راه‌حل‌های بهره‌وری انرژی، ازجمله تغییر به حمل‌ونقل عمومی و اشتراک وسایل نقلیه[۴]
- بهبود ارتباطات چندحالته[۵] و برنامه‌ریزی شهری
- افزایش انرژی‌های تجدیدپذیر در استفاده انرژی نهایی در حمل‌ونقل، از حدود ۳ درصد به ۵۶ درصد در سال ۲۰۵۰

[4] Vehicle Sharing
[5] Multi-Mode Connections



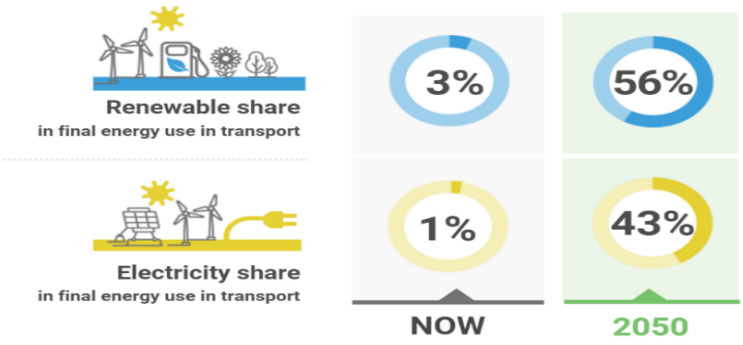
مصرف نهایی انرژی (EJ/year) در بخش حمل‌ونقل

❖ راه‌کارهایی برای حرکت به‌سوی آینده‌ای پاک‌تر

راه‌حل‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در حال حاضر در دسترس هستند و هزینه و عملکرد آن‌ها در طول زمان بهبود می‌یابد. کربن‌زدایی کامل به ترکیبی از موارد زیر نیاز دارد:

- برق‌رسانی مستقیم
- سوخت‌های زیستی
- سوخت‌های الکتریکی حاصل از هیدروژن تجدیدپذیر

تراموا‌ها، اتوبوس‌ها و وسایل نقلیه مسافربری که با برق تجدیدپذیر کار می‌کنند، می‌بایست به شکل غالب حمل‌ونقل شهری تبدیل شوند. در بخش‌هایی مانند حمل‌ونقل هوایی، کشتیرانی و حمل‌ونقل جاده‌ای در مسافت‌های طولانی، سوخت‌های زیستی و سوخت‌های الکتریکی که از هیدروژن تجدیدپذیر به دست می‌آیند، نقش محوری خواهند داشت.



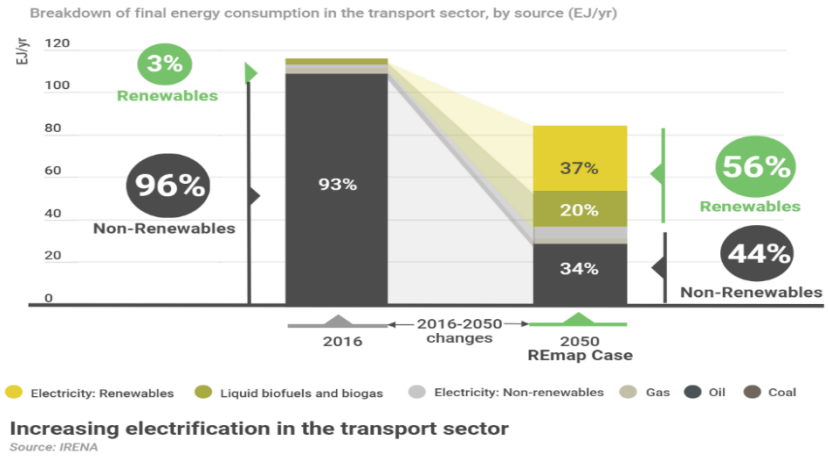
انرژی‌های تجدیدپذیر و برقی‌سازی

❖ برقی‌سازی[6]، کلید اصلی تحقق هدف آینده پاک‌تر

سهم برق در حمل‌ونقل باید از حدود ۱٪ به ۴۳٪ در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد و ۸۶ درصد انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین خواهد شد. به این ترتیب، ۳۷ درصد انرژی حمل‌ونقل از برق تجدیدپذیر تأمین می‌شود.

اقدامات لازم برای تسریع تحرک الکتریکی[7] عبارت‌اند از:

- ایجاد استانداردهای آلایندگی برای وسایل نقلیه
- اولویت‌بندی وسایل نقلیه الکتریکی برای شهرها و استقرار کامیون‌های شهری کم آلاینده
- تشویق زیرساخت‌های شارژ الکتریکی[8]
- تقویت پیوند بین بخش‌های برق و حمل‌ونقل از طریق خدمات وسیله نقلیه به شبکه[9]

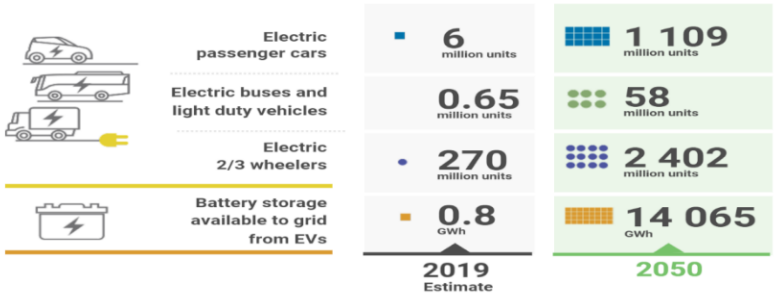


تفکیک مصرف نهایی انرژی در بخش حمل‌ونقل، بر اساس منبع (EJ/year)

❖ پیشتازیِ خودروهای برقی

فروش جهانی خودروهای الکتریکی[10] در حال افزایش است. اگر سیاست‌گذاران امروز اقدامات لازم را انجام دهند، تا سال ۲۰۵۰، بیش از یک میلیارد خودروی الکتریکی در معابر وجود خواهد داشت. اقدامات فعلی، در سطح محلی قابل مشاهده است. به‌عنوان‌مثال، شنزن[11]، کلان‌شهر چین با ۲۰ میلیون نفر جمعیت، ۱۶۰۰۰ اتوبوس عمومی را برقی‌سازی نموده است.

[6] Electrification
[7] Electric Mobility
[8] E-Charging
[9] Vehicle-to-Grid Services(V2G)
[10] Electric vehicles (EVs)
[11] Shenzhen



آینده خودروهای الکتریکی

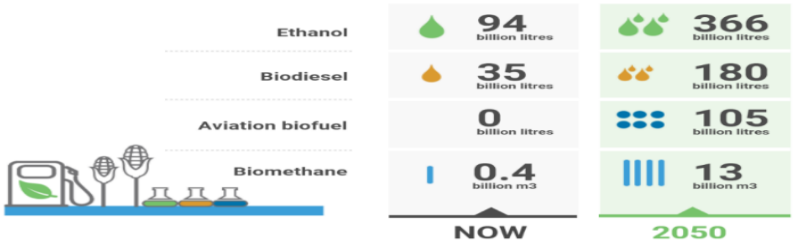
❖ نیاز به زیرساخت شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی

شارژ هوشمند، شامل تنظیم چرخه شارژ خودروهای برقی برای در نظر گرفتن نیازهای سیستم برق و رانندگان خودرو است. تأمین شارژ هوشمند برای وسایل نقلیه الکتریکی، راهکاری برای ارائه حمل‌ونقل پاک و کم‌کربن است. این امر تأثیر خودروهای الکتریکی بر تقاضای برق را به حداقل می‌رساند و انعطاف‌پذیری لازم برای ادغام بیشتر انرژی خورشیدی و بادی در شبکه‌ها را فراهم می‌آورد. شارژ خودرو به شبکه[12] به خودروهای برقی این امکان را می‌دهد که نه‌تنها برق را از شبکه دریافت کنند، بلکه برق را مجدداً به شبکه تزریق نمایند و درنتیجه درآمد بیشتری برای صاحبان خودرو به همراه داشته باشند.

❖ اهمیت گذار به گزینه‌های سوخت تجدیدپذیر

سوخت‌های زیستی باید سهم خود را در تأمین انرژی حمل‌ونقل از کمتر از ۳ درصد امروز به حدود ۳۰ درصد در سال ۲۰۵۰ افزایش دهند. اقدامات لازم برای تقویت سوخت‌های زیستی در جاده، هوانوردی و کشتیرانی عبارت‌اند از:

- حذف یارانه سوخت‌های فسیلی و اجرای قیمت‌گذاری کربن
- اتخاذ سیاست‌هایی برای افزایش تولید پایدار سوخت‌های زیستی نسل اول و دوم
- معرفی مشوق‌های مالی مستقیم به همراه اقدامات کاهش ریسک مالی



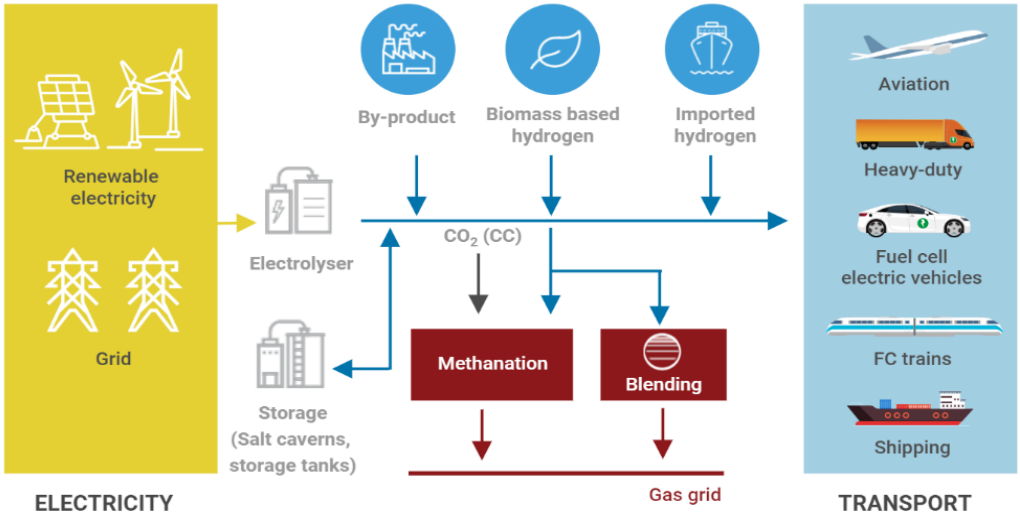
آینده سوخت زیستی

[12] Vehicle-to-Grid (V2G)

❖ ظهور هیدروژن سبز

هیدروژن می‌تواند به مقابله با چالش‌های مختلف انرژی در بخش‌هایی که کربن‌زدایی آن‌ها به‌سختی انجام می‌شود(مانند کشتی‌رانی و هوانوردی)، کمک کند. بااین‌حال، تأثیر آب و هوایی هیدروژن، به نحوه تولید آن بستگی دارد.

پیش‌بینی می‌شود که هیدروژن تجدیدپذیر (هیدروژن سبز)، که حاصل از الکترولیز با انرژی تجدیدپذیر است، در سال‌های آینده به‌سرعت رشد نماید. استفاده از هیدروژن به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل می‌تواند منجر به کاهش ۷۰ درصدی مصرف نفت تا سال ۲۰۵۰ گردد. همچنین، هیدروژن سبز می‌تواند تا سال ۲۰۵۰ به ۸ درصد از مصرف انرژی جهانی تبدیل شود.



ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در مصارف نهایی با استفاده از هیدروژن

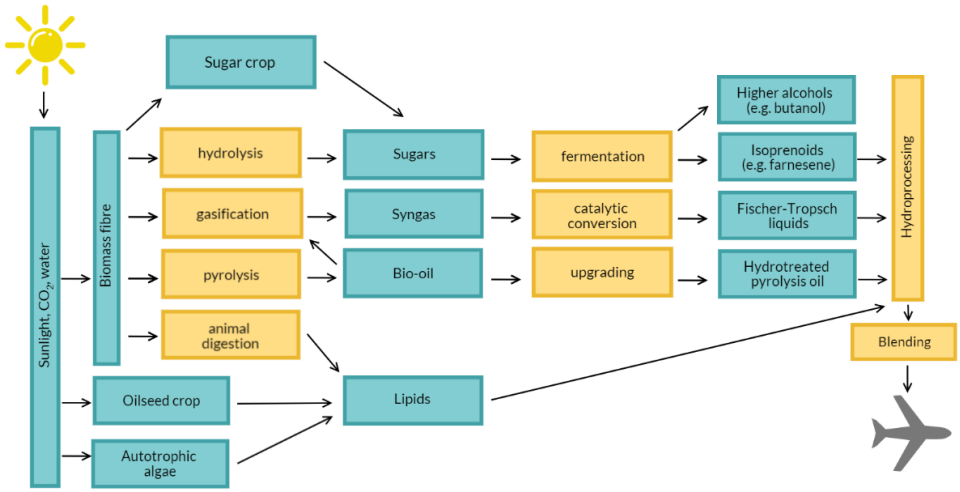
❖ کاهش ۵۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل‌ونقل دریایی تا سال ۲۰۵۰

حمل‌ونقل دریایی مسئول ۳ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی و ۹ درصد از انتشارات مربوط به حمل‌ونقل است. با افزایش حجم صادرات و واردات، این رقم به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. ازآنجایی‌که نفت کوره سنگین ۸۲ درصد از نیازهای انرژی این بخش را پوشش می‌دهد؛ کربن‌زدایی کشتیرانی جهانی، نقش مهمی در دستیابی به اهداف آب و هوایی ایفا خواهد کرد. راه‌حل‌های کلیدی این بخش برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به نصف تا سال ۲۰۵۰ عبارت‌اند از:

- گذار از سوخت‌های فسیلی به جایگزین‌ها
- به‌روزرسانی زیرساخت‌ها
- برقی‌سازی
- کاهش تقاضای سوخت با بهبود عملکرد عملیاتی

❖ عدم پیشرفت در بخش هوانوردی

بخش هوانوردی یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای در جهان است که مسئول ۲ درصد از انتشار کربن می‌باشد. هوانوردی حدود ۱۲ درصد از مصرف سوخت جهانی برای حمل‌ونقل را به خود اختصاص داده است. در حال حاضر، بسیاری از خطوط هوایی اهداف داوطلبانه خود را برای دستیابی به رشد کربن خنثی تا سال ۲۰۳۰ و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ به نصف، تعیین کرده‌اند. انتشار گازهای گلخانه‌ای هوانوردی را می‌توان از طریق بهبود بهره‌وری سوخت، اصلاحات در هواپیما و سیستم‌های ناوبری بهینه‌شده، سالانه ۱.۵ درصد کاهش داد. کاهش بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق استفاده از سوخت‌های زیستی پیشرفته، به نام «بایوجت[۱۳]» میسر می‌شود. اجرای این فناوری امکان‌پذیر است، اما نیازمند تجاری‌سازی بیشتر و بهبود هزینه‌ها است.



بهره‌گیری از سوخت زیستی در هوانوردی

ترکیبی از رویکردهای کم‌کربن می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای حمل‌ونقل را تا سال ۲۰۵۰ تقریباً ۸۰ درصد کاهش دهد. بااین‌حال، اقدام فوری برای تسریع رشد حمل‌ونقل مبتنی بر برق و تقویت توسعه بیشتر سوخت‌های زیستی و سوخت‌های الکتریکی موردنیاز است. حرکت به‌سوی آینده‌ای پاک با انرژی‌های تجدیدپذیر امکان‌پذیر است.

منبع: Moving to a cleaner future – www.irena.org

[13] Biojet

تحولات اقتصاد و بازار

تحلیل روند و ارزیابی اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲

برق‌آبی یک فناوری تولید برق تجدیدپذیر باسابقه و قابل‌اعتماد است. همچنین در سال ۲۰۲۲ گسترده‌ترین استقرار در سراسر جهان متعلق به این فناوری بوده است. اگرچه سهم برق‌آبی از ظرفیت انرژی تجدیدپذیر جهانی به‌آرامی در حال کاهش است. درواقع، بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، سهم نیروگاه‌های آبی از ۷۲ درصد به ۴۱ درصد کاهش یافته است. مجموع ظرفیت جهانی نیروگاه آبی نصب‌شده (به‌استثنای فناوری تلمبه ای–ذخیره ای[۱۴]) 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. نیروگاه‌های آبی یک منبع برق کم‌هزینه را فراهم می‌آورند. همچنین، انعطاف‌پذیری شبکه برق را (به‌ویژه اگر نیروگاه دارای مخزن ذخیره باشد)، بهبود می‌بخشند. این امر، نیروگاه را قادر می‌سازد تا خدماتی مانند پاسخ فرکانسی[۱۵]، قابلیت بلک استارت[۱۶] و ذخایر چرخشی[۱۷] ارائه دهد. این قابلیت‌ها با افزایش درآمد، دوام نیروگاه را افزایش می‌دهند. همچنین امکان ادغام بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر و ناپایدار، به‌منظور دستیابی به اهداف کربن‌زدایی، فراهم می‌شود. علاوه بر خدمات انعطاف‌پذیری شبکه که نیروگاه آبی ارائه می‌دهد، ذخیره انرژی نیز در طول هفته‌ها، ماه‌ها، فصول یا حتی سال‌ها(بسته به اندازه مخزن) امکان‌پذیر است.

[14] Pumped Hydro
[15] Frequency Response
[16] Black Start Capability
[17] 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. بااین‌حال، تجزیه‌وتحلیل LCOE[18] انجام‌شده 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 به‌اندازه و محدوده پروژه و همچنین سایر ویژگی‌های مؤثر بر پروژه، متفاوت است. همچنین مشخصات فنی کلیدی وجود دارد که نوع و اندازه توربین مورداستفاده را تعیین می‌کند. این پارامترهای کلیدی عبارت‌اند از:

- هد[19]
- اندازه مخزن
- حداقل نرخ جریان پایین‌دست
- جریان‌های فصلی

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

- نیروگاه انرژی آبی مخزن یا ذخیره[20]، که جداسازی جریان‌های آبی ورودی از توربین‌ها را فراهم می‌کند. ذخیره آب به‌عنوان حائلی عمل می‌کند که سدها می‌توانند از آن برای ذخیره یا تنظیم جریان‌های آبی استفاده کنند.
- نیروگاه آبی جریان رودخانه[21]، 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–ذخیره ای[22]، 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 موردنیاز نیست، استفاده کرد.

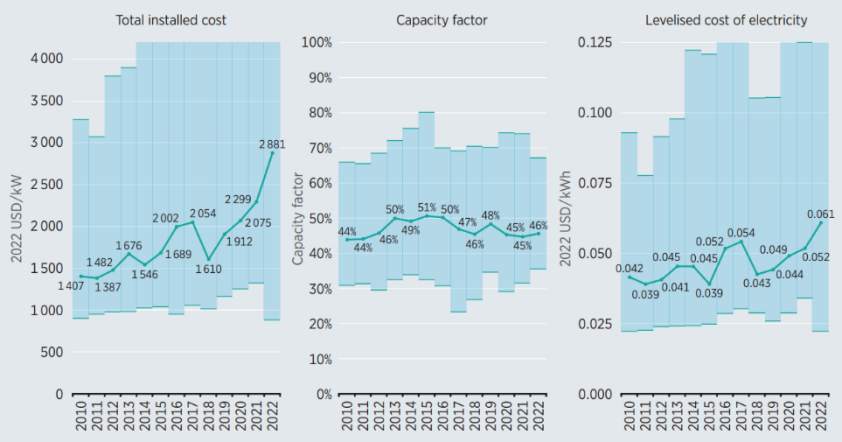
[18] Levelised Cost of Electricity
[19] Head
[20] Reservoir or Storage Hydropower
[21] Run-of-River Hydropower
[22] Pumped Storage Hydropower

در ادامه، هزینه‌های انرژی آبی مخزن و جریان رودخانه پوشش داده می‌شود و هزینه‌های تلمبه–ذخیره ای از همه داده‌ها مستثنی می‌گردد، زیرا این فناوری، یک فناوری ذخیره‌سازی است، نه یک فناوری تولید برق‌آبی.

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 راشامل 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. به‌طورکلی، 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.

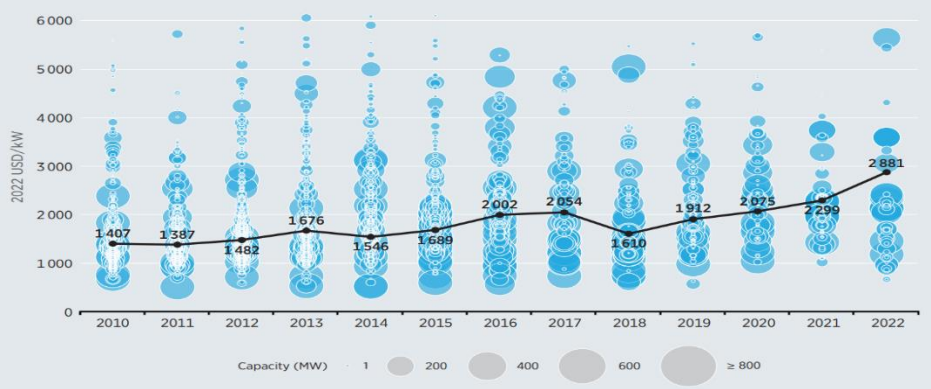
• هزینه‌های تدارکات مربوط به تجهیزات الکترومکانیکی: بخش‌های عمرانی (شامل سد، تونل، کانال و ساخت نیروگاه) معمولاً بیشترین سهم را از کل هزینه‌های نصب برای نیروگاه‌های آبی بزرگ دارند. پس‌ازاین، هزینه‌های تجهیز نیروگاه (شامل شفت و تجهیزات الکترومکانیکی) بزرگ‌ترین هزینه موردنیاز است که حدود ۳۰٪ از کل هزینه‌ها را شامل می‌شود.



میانگین وزنی کل هزینه‌های نصب، ضریب ظرفیت و LCOE برای نیروگاه‌های آبی، ۲۰۱۰–۲۰۲۲

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 قابل‌توجهی از هزینه‌های کلی باشد. موارد اضافی که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی 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 نصب 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 غیرعادی نیست. به‌عنوان‌مثال، 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.



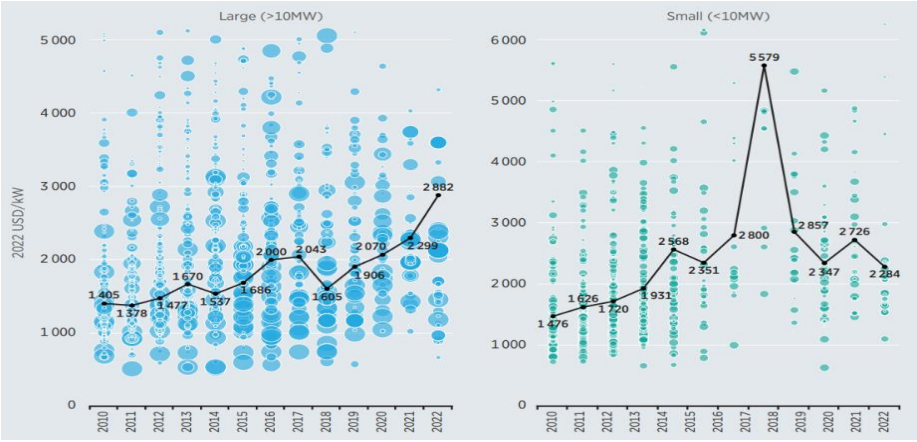
مجموع هزینه‌های نصب بر اساس پروژه و میانگین وزنی جهانی برای نیروگاه‌های آبی، ۲۰۱۰–۲۰۲۲

بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، میانگین وزنی کل هزینه نصب نیروگاه‌های آبی جدید از ۱۴۰۷ دلار به ازای هر 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 نصب به ۱۶۱۰ دلار در کیلووات کاهش یافت، اما پس‌ازآن شاهد افزایش مداوم آن بودیم. سال ۲۰۲۲ نشان‌دهنده یک سطح هزینه جدید و بالاتر بود، با افزایش‌هایی که نه‌تنها به دلیل سهم استقرار در مناطق مختلف، بلکه همچنین یک روند صعودی در هزینه‌های خاص پروژه بود.

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

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

این افزایش به دلیل افزایش هزینه‌های نصب برای پروژه‌ها در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی و جنوبی بوده است. داده‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از کشورهای این مناطق اکنون درحال‌توسعه 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، به‌طورکلی منجر به هزینه‌های نصب بالاتر می‌شود. روند میانگین وزنی کل هزینه نصب جهانی برای نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ (با ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات) و برق‌آبی‌های کوچک (۱۰ مگاوات یا کمتر) نشان می‌دهد که میانگین هزینه‌های نصب برای برق‌آبی‌های کوچک با سرعت بیشتری نسبت به پروژه‌های برق‌آبی بزرگ افزایش یافته است.

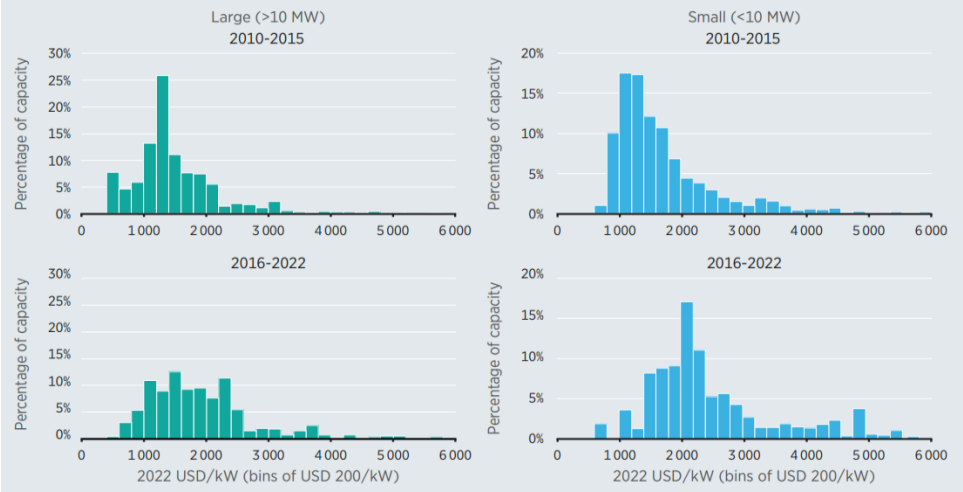


مجموع هزینه‌های نصب برای پروژه‌های کوچک و بزرگ برق‌آبی و میانگین وزنی جهانی، ۲۰۱۰–۲۰۲۲

2000-2022			
Capacity (MW)	5th percentile (2022 USD/kW)	weighted average (2022 USD/kW)	95th 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.

مجموع هزینه‌های نصب برای نیروگاه‌های آبی بر اساس میانگین وزنی و محدوده ظرفیت، ۲۰۰۰–۲۰۲۲



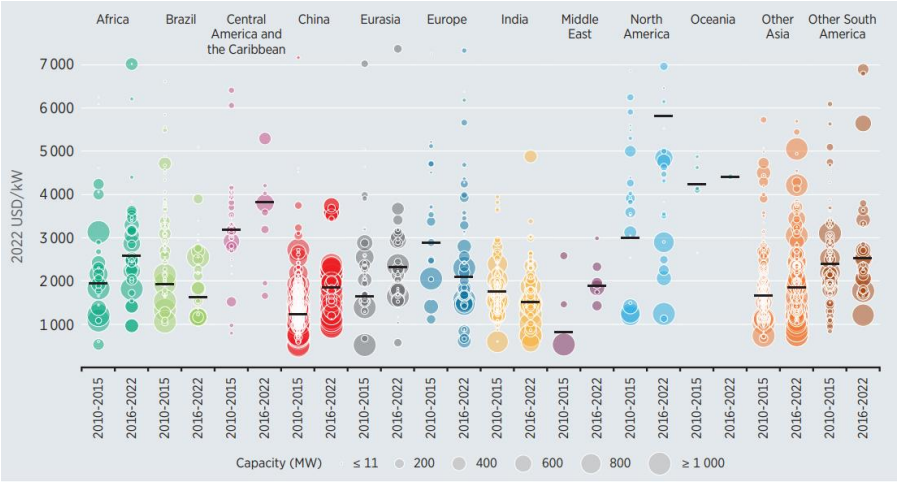
توزیع کل هزینه‌های نصب پروژه‌های بزرگ و کوچک برق‌آبی بر اساس ظرفیت، ۲۰۱۰–۲۰۱۵ و ۲۰۱۶–۲۰۲۲

برای دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، کل هزینه‌های نصب 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 نصب به ترتیب ۵۸۲۵ دلار بر کیلووات و ۲۶۰۴ دلار بر کیلووات بود. بالاترین هزینه کلی نصب بعدی در اروپا، با میانگین وزنی ۲۱۰۱ دلار بر کیلووات بود. کمترین میانگین وزنی هزینه نصب 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 نصب 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 نصب به ترتیب ۲۵۳۷ ، ۳۸۲۶ و ۴۴۱۷ دلار بر کیلووات بود. بدیهی است که مناطق با هزینه‌های نصب بالاتر، نرخ استقرار کمتری دارند.

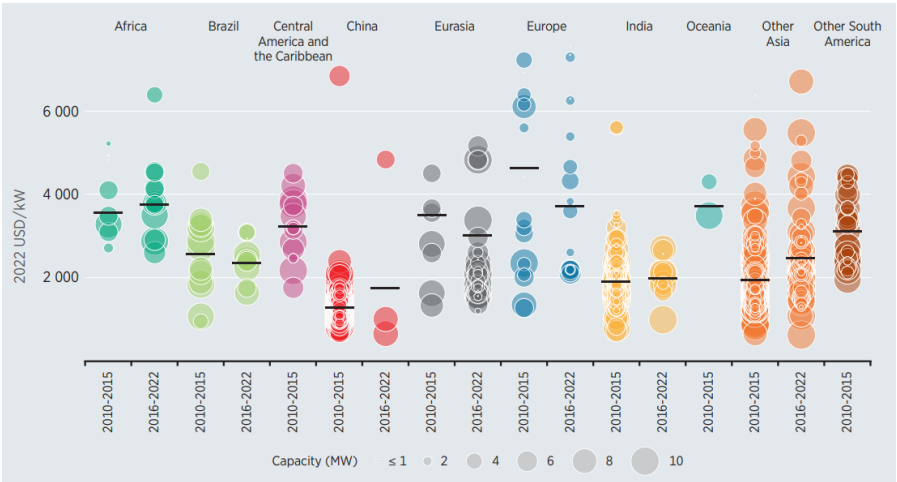
با توجه به اینکه هزینه‌های توسعه پروژه‌های برق‌آبی بسیار وابسته به سایت است، دامنه هزینه‌های نصب برای نیروگاه‌های آبی گسترده است. بخشی از این هزینه‌ها به دلیل تغییرات در هزینه توسعه، مهندسی عمران، تدارکات و اتصال به شبکه است. برخی از تغییرات نیز ممکن است ناشی از نیازهای غیر انرژی ادغام شده در پروژه‌های 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 درازای آن دریافت نمی‌گردد.

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

بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، کل هزینه‌های نصب 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 نصب 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 نصب 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 نصب 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 نصب بر اساس پروژه و میانگین وزنی ظرفیت پروژه‌های بزرگ نیروگاه برق‌آبی بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۱۰–۲۰۲۲



مجموع هزینه‌های نصب بر اساس پروژه و میانگین وزنی ظرفیت پروژه‌های کوچک برق‌آبی بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۱۰–۲۰۲۲

❖ هزینه‌های تعمیرات و نگهداری[۲۳]

هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه، اغلب به‌عنوان درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر کیلووات در سال ذکر می‌شود. این مقدار به‌طورمعمول از ۱٪ تا ۴٪ متغیر است. ایرِنا داده‌های هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را در ۲۵ پروژه جمع‌آوری نمود و اعلام کرد که میانگین هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها بین ۱٪ تا ۳٪ از کل هزینه‌های نصب در سال متغیر است. جدول زیر، توزیع هزینه اقلام 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٪ تا ۶۱٪ از کل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و حقوق افراد از ۱۳٪ تا ۷۴٪ متغیر است. تخمین زده می‌شود که مواد و متریال حدود ۴٪ 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[۲۴]، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را برای پروژه‌های بزرگ برق‌آبی ۲.۲٪، برای پروژه‌های کوچک‌تر ۲.۲٪ تا ۳٪ و برای میانگین جهانی نیز حدود ۲.۵٪ در نظر گرفته است. این ارقام، نیروگاه‌های برق‌آبی در مقیاس بزرگ را در محدوده هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مشابه هزینه‌های باد قرار می‌دهد. هنگامی‌که مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها در امتداد رودخانه نصب 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. بااین‌حال، 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[۲۵]، ۰.۰۶٪ از کل هزینه‌های نصب 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.

[23] Operation and Maintenance (O&M)
[24] International Energy Agency (IEA)
[25] Energy Information Agency (EIA)

مطالعات دیگر نشان می‌دهد که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری ثابت ۴٪ 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٪ به‌عنوان معیار برای پروژه‌های مقیاس بزرگ در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری معمولاً شامل هزینه‌ای برای نوسازی دوره‌ای تجهیزات مکانیکی و الکتریکی مانند تعمیرات اساسی توربین[۲۶]، چرخش مجدد ژنراتور[۲۷] و سرمایه‌گذاری مجدد در سیستم‌های ارتباطی و کنترل می‌شود.

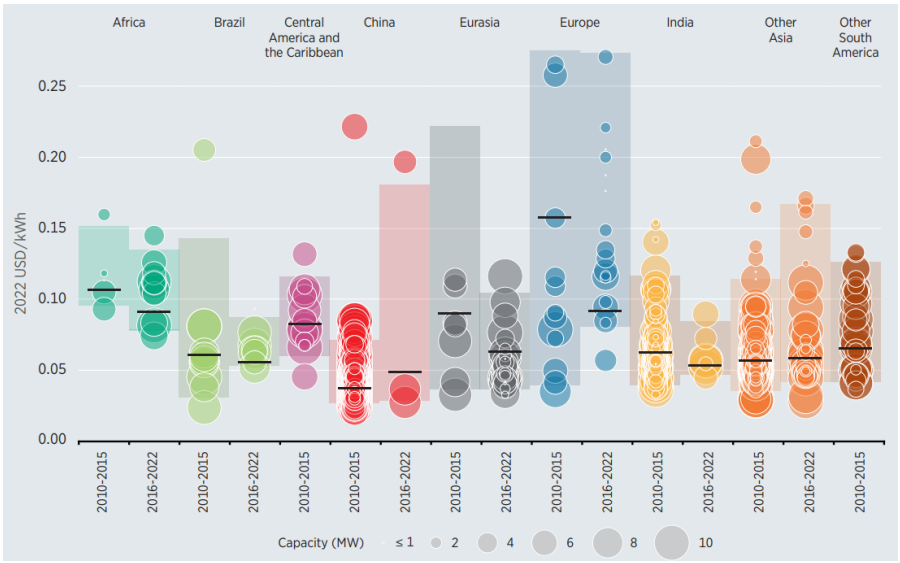
❖ جمع‌بندی

نیروگاه‌های برق‌آبی در طول تاریخ رکن اساسی برق کم‌هزینه را در تعداد قابل‌توجهی از کشورهای جهان فراهم کرده‌اند. میانگین وزنی هزینه تراز شده جهانی برق در پروژه‌های نیروگاه آبی تازه راه‌اندازی شده، ۰.۰۶۱ دلار آمریکا 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 نصب‌شده پروژه‌های برق‌آبی، دارای LCOE کمتر از میانگین وزنی هزینه ویژه کشور یا منطقه[۲۸] برای ظرفیت جدید سوخت فسیلی بودند.

افزایش LCOE از سال ۲۰۱۰ ناشی از افزایش هزینه‌های نصب، 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 نصب 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 کل هزینه نصب جهانی 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 به‌طورکلی هزینه‌های نصب 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.

[26] Turbine Overhaul
[27] Generator Rewinding
[28] Country- Or Region-Specific Weighted Average Cost

پروژه LCOE بزرگ برق‌آبی و میانگین وزنی ظرفیت بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۱۰–۲۰۲۲



پروژه انرژی آبی کوچک LCOE و میانگین وزنی ظرفیت بر اساس کشور/منطقه، ۲۰۱۰–۲۰۲۲ ۲۰۲۲ دلار در کیلووات ساعت

منبع: IRENA Renewable power generation costs in 2022

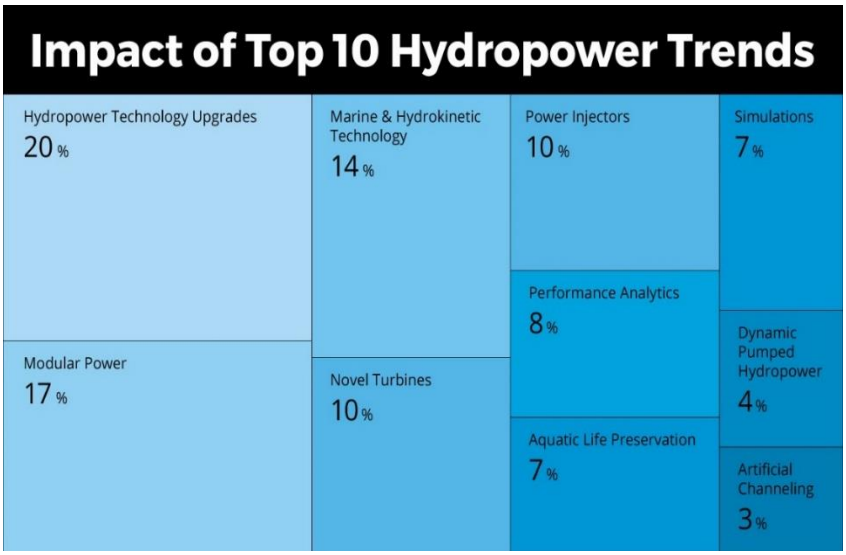
تحولات فناورانه

ده روند برتر برق‌آبی در سال ۲۰۲۳

استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های بزرگ درحال‌توسعه راه‌حل‌هایی برای پیشرفت در تولید برق و ذخیره انرژی هستند. به‌روزرسانی نیروگاه‌های برق‌آبی موجود یکی از گرایش‌های اصلی در این صنعت است که به نیروگاه‌ها اجازه می‌دهد برق بیشتری را با انعطاف‌پذیری بیشتر تولید کنند. برای مثال، نیروگاه‌ها از دیافراگم قابل تنظیم[۲۹]، نیروگاه‌های اجکتوری[۳۰] یا پنستاک هلیکوئیدی[۳۱] برای بهبود کارایی بهره می‌برند. اجزای برق مانند روتورهای کنترل شده با جریان[۳۲]، ماشین‌های القایی با تغذیه دوبل[۳۳]، توربین‌های هیدروکینتیک[۳۴] و پمپ‌ها به‌عنوان توربین[۳۵] به بهبود کنترل جریان ورودی و خروجی برق کمک می‌کنند. روندهای دیگر در توسعه، تجزیه‌وتحلیل عملکرد و پیش‌بینی تعمیر و نگهداری، تضمین نظارت و ایمنی نیروگاه‌های برق‌آبی است. فناوری دوقلوی دیجیتال، شبیه‌سازی آنی و شبیه‌سازی عددی، زیرساخت‌ها و راه‌اندازی ماشین‌های سنگین را بهبود می‌بخشد. نوآوری‌ها در نیروگاه‌های آبی مانند نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس، ذخیره‌تلمبه‌ای، مدرن‌سازی و ارتقای فناوری، کارایی عملیاتی و ظرفیت تولید برق را بهبود می‌بخشند. این گزارش بر ۱۰ روند برتر انرژی آبی تمرکز دارد. این روندها، شامل حفظ حیات آبزیان و توربین‌های جدید و همچنین تجزیه‌وتحلیل عملکرد و کانال‌های مصنوعی هستند.

[29] Adjustable Diaphragm
[30] Ejector Power Plants
[31] Helicoid Penstocks
[32] Current-Controlled Rotors
[33] Double-Fed Induction Machines
[34] Hydrokinetic Turbines
[35] Pumps As Turbines(PAT)

❖ ۱۰ روند برتر برق‌آبی در سال ۲۰۲۳ و میزان تاثیر آنها



- به‌روزرسانی فناوری برق‌آبی
- برق ماژولار
- فناوری دریایی و هیدروکینتیک
- توربین‌های جدید
- انژکتورهای برق
- تجزیه‌وتحلیل عملکرد
- حفظ حیات آبزیان
- شبیه‌سازی‌ها
- برق‌آبی پمپ شده دینامیک
- کانال‌سازی مصنوعی

۱. ارتقاء فناوری برق‌آبی

تولید برق از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل تغییرات آب و هوایی و ردپای کربن چالش‌برانگیز است. فن‌آوری‌های جدید نیروگاه‌های آبی انعطاف‌پذیری بیشتری را در طیف گسترده‌ای از شرایط هیدرولیکی فراهم می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در فناوری توربین‌ها، مانند ژنراتورهای آهنربای دائمی[۳۶] و توربین‌های ایمن برای ماهی[۳۷]، ظرفیت و بازده تولید را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی و هیبریدی‌های باتری، مصرف بعدی برق تولیدشده را امکان‌پذیر می‌سازند و آن را کارآمدتر و قابل‌اعتمادتر می‌کنند.

۲. برق ماژولار[۳۸]

سیستم‌های تولید برق ماژولار استقرار و مقیاس بندی نیروگاه‌های برق‌آبی را امکان‌پذیر می‌سازند. برای کمک به این امر، استارت‌آپ‌ها سیستم‌های برق ماژولار مانند ماشین‌های هیدرولیک گرانشی[۳۹]، چرخ‌های آب[۴۰] و پیچ‌های ارشمیدس[۴۱] را توسعه

[36] Permanent Magnet Generators
[37] Fish-Safe Turbines
[38] Modular Power
[39] Gravity Hydraulic Machines
[40] Water Wheels
[41] Archimedes Screws

می‌دهند. توربین‌هایی مانند توربین‌های لوهد[۴۲] و هیدروکینتیک[۴۳] و PATs[۴۴] نیز برق بیشتری تولید می‌کنند و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند. فن‌آوری‌هایی مانند روتورهای کنترل شده با جریان[۴۵] و ماشین‌های القایی با تغذیه دوبل[۴۶] به توربین‌ها اجازه می‌دهد تا به‌سرعت به تغییرات بار پاسخ دهند و فرکانس ثابتی را حفظ نمایند. بنابراین راه‌حل‌های ماژولار به اطمینان از پایداری شبکه برق کمک می‌کند و کنترل دقیق تولید انرژی را فراهم می‌آورد.

۳. تکنولوژی دریایی و هیدروکینتیک[۴۷]

نیروی موج و جزر و مد فرصت بزرگی برای ایجاد انرژی قابل‌اعتماد و پاک است. انرژی MHK به‌عنوان ارزش‌افزوده امیدوارکننده به منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه در مناطق ساحلی، در حال افزایش است. این فناوری انرژی حاصل از جریان‌های اقیانوسی، جزر و مد و امواج را برای تولید الکتریسیته مهار می‌کند. فناوری رگبار[۴۸]، ژنراتورهای جریان جزر و مدی[۴۹] و فناوری هیدروکینتیک درون جریان[۵۰] برخی از پیشرفت‌های اخیر در فناوری MHK هستند.

٤. توربین‌های جدید

نیروگاه‌های برق‌آبی در حال اجرای طرح‌های توربین جدید برای افزایش کارایی، مقرون‌به‌صرفه بودن و پایداری هستند. طرح‌های نوآورانه‌ای مانند توربین‌های لوهد[۵۱]، توربین‌های گردابی[۵۲]، توربین‌های آلدن[۵۳] و توربین‌های حداقل شکاف[۵۴]، نیروگاه‌ها را قادر می‌سازند تا برق بیشتری را (بدون تغییر در نرخ جریان آب) تولید کنند. به‌عنوان‌مثال، توربین‌های لوهد در محیط‌های کم‌آب به‌طور مؤثر کار می‌کنند و برای مکان‌هایی که منابع آب کمی در اختیاردارند، ایده‌آل هستند. توربین‌های آلدن آسیب ماهی را به حداقل می‌رسانند و کارایی را بهبود می‌بخشند، درحالی‌که توربین‌های گردابی برای جریان‌های با سرعت‌پایین عالی هستند. علاوه بر این، توربین‌های حداقل شکاف، از فناوری شکاف متغیر[۵۵] برای افزایش کارایی و به حداقل رساندن هزینه‌های مواد استفاده می‌کنند.

[42] Low-Head
[43] Hydrokinetic
[44] Pumps As Turbines (PATs)
[45] Current-Controlled Rotors
[46] Double-Fed Induction Machines
[47] Marine and Hydrokinetic Technology
[48] Barrage Technology
[49] Tidal Stream Generators
[50] Instream Hydrokinetic Technology
[51] Very-Low-Head Turbines
[52] Vortex Turbines
[53] Alden Turbines
[54] Minimum Gap Runner Turbines
[55] Variable Gap Technology

۵. برق انژکتور[۵۶]

فشار و جریان آب دو عامل مهم تعیین‌کننده ظرفیت توربین هستند. در سطوح پایین‌تر، جریان محدود آب، بر عملکرد توربین‌ها تأثیر می‌گذارد. انژکتورهای برق مانند تزریق آب محوری[۵۷]، تزریق آب مماس[۵۸]، و تزریق دو فاز هوا–آب[۵۹] با واردکردن یک جت آب پرفشار به ورودی توربین کار می‌کنند. این امر، یک اثر ونتوری[۶۰] ایجاد می‌کند که آب بیشتری را جذب می‌نماید و در هر دو سیستم برق‌آبی با هد پایین و بالا برای افزایش برق خروجی کلی نیروگاه استفاده می‌شوند.

٦. تجزیه‌وتحلیل عملکرد[۶۱]

نیروگاه‌ها از تجزیه‌وتحلیل عملکرد برای ارزیابی جنبه‌های مختلف و تعیین کارایی، قابلیت اطمینان و پایداری استفاده می‌کنند. فن‌آوری‌هایی مانند تجزیه‌وتحلیل راندمان آبی[۶۲] و بهینه‌سازی منحنی ترکیبی[۶۳] به تجزیه‌وتحلیل عملکرد خروجی و استفاده از ظرفیت نیروگاه‌ها کمک می‌کند. همچنین بر تجزیه‌وتحلیل نرخ جریان آب و همچنین راندمان هد و توربین برای تعیین برق خروجی نیروگاه نیز مؤثر است. شبیه‌سازی عددی به نیروگاه‌های برق‌آبی این امکان را می‌دهد تا نمونه‌های دیجیتالی نیروگاه‌های آبی را ایجاد و رفتار آن‌ها را تحت شرایط عملیاتی مختلف مطالعه نمایند. چنین راه‌حل‌هایی مسائل طراحی بالقوه را شناسایی کرده و عملکرد کلی را بهینه می‌سازد.

۷. حفظ حیات آبزیان[۶۴]

توسعه نیروگاه‌های آبی به‌طور قابل‌توجهی بر جامعه ازنظر اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تأثیرگذار است. حفظ حیات آبزیان یک اولویت کلیدی در استقرارهای موجود و جدید است. پیشرفت‌ها در طراحی توربین‌ها مانند توربین‌های هیدروکینتیک، با تولید گرمای بسیار کم، و توربین‌های حداقل شکاف، به آبزیان کمک می‌کند تا به‌راحتی از طریق نیروگاه‌های آبی مهاجرت کنند. استفاده روزافزون از پمپ‌ها به‌عنوان توربین و همچنین نردبان ماهی[۶۵]، تولید برق و حفظ تعادل اکولوژیکی را ممکن می‌سازد.

[56] Power Injectors
[57] Axial Water Injection
[58] Tangential Water Injection
[59] Two-Phase Air-Water Injection
[60] Venturi Effect
[61] Performance Analytics
[62] Hydro Efficiency Analysis
[63] Combination Curve Optimization
[64] Aquatic Life Preservation
[65] Fish Ladders

۸. شبیه‌سازی[۶۶]

استارت‌آپ‌ها با استفاده از شبیه‌سازی آنی[۶۷]، دوقلوهای دیجیتال[۶۸] و مدل‌سازی و کنترل هوشمند[۶۹]، هزینه‌های عملیاتی نیروگاه‌های آبی را به حداقل می‌رسانند. این فناوری‌ها همچنین تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌شده آنی را با داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل‌ها امکان‌پذیر می‌سازند و به اپراتورها اطلاعات آنی در مورد شرایط و بهبود برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری ارائه می‌دهند. همچنین به اپراتورهای نیروگاه کمک می‌کند تا هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش ، زمان کار را افزایش و طول عمر تجهیزات را با اجازه دادن به تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و هدفمند افزایش دهند.

۹. برق‌آبی تلمبه–ذخیره ای پویا[۷۰]

نیروگاه آبی پمپی نوعی سیستم ذخیره انرژی برق‌آبی است که دو مخزن آب را در ارتفاعات مختلف ترکیب می‌کند تا با پایین آمدن آب از یکی به دیگری برق تولید کند. فن‌آوری‌هایی مانند برق‌آبی هیبریدی، برق‌آبی با سرعت متغیر[۷۱] و همچنین هیبریدی‌های باتری[۷۲]، ذخیره و توزیع برق را آسان‌تر و کارآمدتر می‌سازند. نوآوری در طراحی پمپ و مواد باعث افزایش راندمان سیستم‌های برق‌آبی تلمبه–ذخیره ای می‌شود و مقدار انرژی موردنیاز برای پمپاژ آب را کاهش می‌دهد. سیستم‌های اسکادا[۷۳] همچنین امکان نظارت و کنترل به‌صورت آنی را فراهم می‌سازد و کارایی و انعطاف‌پذیری را بهبود می‌بخشد.

۱۰. کانال‌سازی مصنوعی[۷۴]

کانال‌سازی مصنوعی از کانال‌های انسان‌ساخت مانند کانال‌ها یا تونل‌ها برای هدایت جریان آب در راستای بهینه‌سازی پتانسیل تولید برق نیروگاه‌ها استفاده می‌کند. قنات‌ها[۷۵]، مخازن زیرزمینی با بالشتک هوا[۷۶]، برق لوله[۷۷]، حوضه برق‌آبی[۷۸]، و سرریزها[۷۹] برخی از فناوری‌هایی هستند که از تولید برق در سایر منابع آبی پشتیبانی می‌کنند. این فناوری‌ها، به تأمین‌کنندگان انرژی اجازه می‌دهد تا برق را به مناطق دورافتاده(بدون ایجاد اختلال در اکوسیستم خود)، برسانند.

---

66 Simulations
67 Real-time Simulations
68 Digital Twins
69 Smart Modeling and Control
70 Dynamic Pumped Hydropower
71 Variable-Speed Hydropower
72 Battery Hybrids
73 SCADA Systems
74 Artificial Channeling
75 Aqueducts
76 Air-Cushioned Underground Reservoirs
77 Pipe Power
78 Hydroelectric Basin
79 Spillways

صنعت برق‌آبی از هوش مصنوعی، دوقلوهای دیجیتال و شبیه‌سازی عددی برای بهبود عملکرد و نظارت نیروگاه استفاده می‌کند. این امر تولید برق کنترل شده تر با هزینه‌های کم را تضمین می‌نماید. انرژی آبی همچنین نقش مهمی در کربن‌زدایی شبکه و رفع متناوب بودن منابع تجدیدپذیر ایفا می‌کند. هدف نوآوری‌های آینده در انرژی آبی، آوردن دستگاه‌ها به‌طور مستقیم به خطوط خانگی برای تولید برق در مقیاس کوچک‌تر است. روندهای برق‌آبی که در این گزارش توضیح داده‌شده‌اند، فقط سطح روندهای دارای نوآوری را نشان می‌دهند. شناسایی فرصت‌های جدید و فن‌آوری‌های نوظهور برای پیاده‌سازی در کسب‌وکار، راه زیادی تا به دست آوردن مزیت رقابتی در پیش دارد.

منبع:

- startus-insights.com - Explore the Top 10 Hydropower Trends in 2023
- hydropower.org - Six emerging hydropower technology trends – 15 April 2020

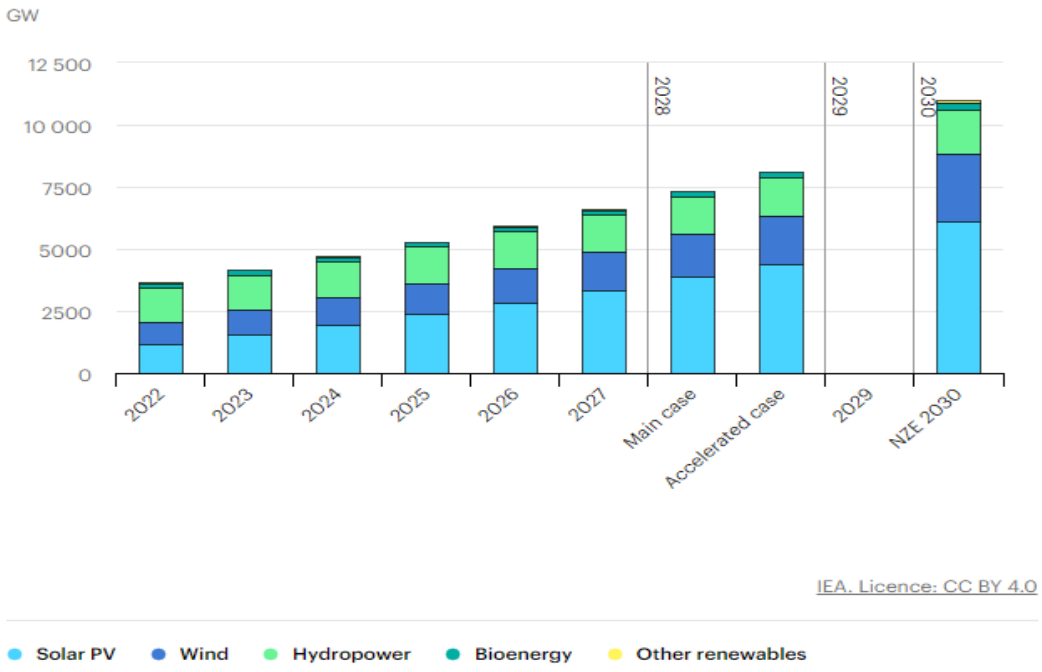
تحولات راهبردی

آمار فناوری‌های برق‌آبی در جهان و افق پیش‌رو

در حال حاضر نیروگاه‌های برق‌آبی بیش از همه فن‌آوری‌های تجدیدپذیر دیگر برق تولید می‌کنند و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۳۰ بزرگ‌ترین منبع تولید برق تجدیدپذیر در جهان باقی بمانند. این فناوری، نقش مهمی در کربن‌زدایی سیستم برق و بهبود انعطاف‌پذیری سیستم ایفا خواهد کرد. درحالی‌که انتظار می‌رود فناوری‌های باد و خورشید از برق‌آبی پیشی بگیرند، اما همچنان فناوری برق‌آبی نقش کلیدی را به‌عنوان منبع انرژی قابل‌توزیع برای پشتیبانی از انرژی‌های تجدید پذیر متناوب، ایفا خواهد کرد. فناوری ذخیره ای–تلمبه ای می‌تواند نقش مهمی در متعادل کردن تغییرات در تولید خورشیدی و بادی داشته باشد. بدون تغییر سیاست‌های عمده، انتظار می‌رود که گسترش جهانی نیروگاه‌های آبی در این دهه کند شود. ظرفیت جهانی برق‌آبی بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ به میزان ۱۷درصد یا ۲۳۰ گیگاوات افزایش می‌یابد. بااین‌حال، پیش‌بینی می‌شود که افزایش ظرفیت خالص در این دوره نسبت به دهه قبل، ۲۳درصد کاهش یابد. این امر، ناشی از کاهش سرعت توسعه پروژه‌ها در چین، آمریکای لاتین و اروپا است. بااین‌حال، افزایش رشد در آسیا و اقیانوسیه، آفریقا و خاورمیانه تا حدی این کاهش را جبران می‌کند. بارندگی‌های نامنظم[80] به دلیل تغییرات آب و هوایی، نیز تولیدات برق‌آبی را در بسیاری از نقاط جهان مختل می‌کند. آژانس بین‌المللی انرژی اولین پیش‌بینی دقیق جهان را تا سال ۲۰۳۰ برای سه نوع نیروگاه آبی نیروگاه‌های مخزن[81]،

[80] Erratic Rainfall
[81] Reservoir Plants

جریان رودخانه[۸۲] و تلمبه–ذخیره ای[۸۳]. ارائه می‌دهد. در این پیش‌بینی، نیروگاه‌های برق‌آبی مخزنی نیمی از ظرفیت اضافه‌شده به انرژی برق‌آبی تا سال ۲۰۳۰ را تشکیل می‌دهند. هم‌چنین، نیروگاه‌های برق‌آبی تلمبه–ذخیره ای ۳۰ درصد از ظرفیت اضافه‌شده تا سال ۲۰۳۰ را تشکیل می‌دهند. برق‌آبی رودخانه‌ای، کوچک‌ترین سهم را خواهد داشت زیرا شامل بسیاری از پروژه‌های کوچک‌مقیاس زیر ۱۰ مگاوات می‌باشد.

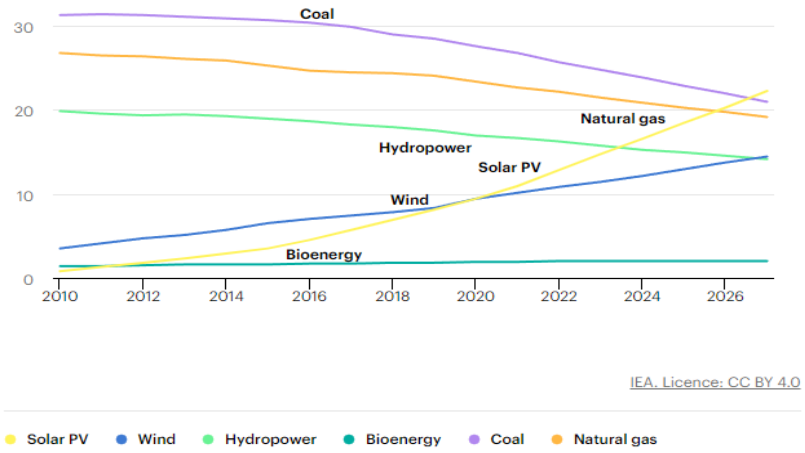


ظرفیت تجمعی برق تجدیدپذیر در راستای سناریوی انتشار صفر خالص

❖ تا سال ۲۰۲۸، برق‌آبی بزرگ‌ترین منبع برق تجدیدپذیر باقی خواهد ماند

در آینده، ظرفیت تجمعی فتوولتائیک خورشیدی تقریباً سه برابر شده و تا سال ۲۰۲۷ به بیش از ۲۳۵۰ گیگاوات می‌رسد و از انرژی آبی در سال ۲۰۲۴، گاز طبیعی در سال ۲۰۲۶ و زغال‌سنگ در سال ۲۰۲۷ پیشی می‌گیرد و به بزرگ‌ترین ظرفیت برق نصب‌شده در سراسر جهان تبدیل می‌شود. نیروگاه‌های برق‌آبی به دلیل گسترش سریع باد به رتبه سوم از نظر ظرفیت تجدیدپذیر نصب‌شده سقوط می‌کنند. انتظار می‌رود که تولید کلی برق تجدیدپذیر تقریباً ۶۰ درصد افزایش یابد و به بیش از ۱۲۴۰۰ تراوات ساعت برسد، درحالی‌که نیروگاه آبی منبع اصلی تولید برق تجدیدپذیر در طول دوره پیش‌بینی‌شده باقی می‌ماند، حتی اگر ظرفیت آن کمتر از بادی و فتوولتائیک خورشیدی افزایش یابد.

[82] Run_of_River Plants
[83] Pumped Storage Plants



توزیع ظرفیت تجمعی برق به تفکیک فناوری – ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۷

گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۳ به‌شدت در ده کشور متمرکزشده است که مسئول ۸۰٪ از ارتقا سالانه جهانی هستند. برای دستیابی به سه برابر شدن ظرفیت جهانی تجدیدپذیر، سرعت استقرار بسیار سریع‌تر در بسیاری از کشورهای دیگر ضروری است. علاوه بر این، بسیاری از اقتصادهای نوظهور و درحال‌توسعه عمدتاً به انرژی آبی متکی هستند. رسیدن به سه برابر شدن انرژی‌های تجدیدپذیر تا سال ۲۰۳۰ مستلزم راه‌اندازی تقریباً ۳۰۰۰ گیگاوات ظرفیت تجدیدپذیر جدید در سال‌های ۲۰۲۹ و ۲۰۳۰ است. برای نیروگاه‌های آبی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش سالانه باید در مقایسه با سال‌های ۲۰۲۷ و ۲۰۲۸ سه برابر شود.

افزایش ظرفیت شبکه جهانی برق‌آبی برحسب کشور/مناطق – ۱۹۹۱ تا ۲۰۳۰

❖ ردیابی برق آبی

در سال ۲۰۲۲، تولید برق‌آبی تقریباً ۷۰ تراوات ساعت (نزدیک به ۲ درصد) افزایش یافت و به ۴۳۰۰ تراوات ساعت رسید. نیروگاه‌های برق‌آبی همچنان بزرگ‌ترین منبع تجدیدپذیر برق هستند که بیش از مجموع تمام فن‌آوری‌های تجدیدپذیر دیگر، برق تولید می‌کنند. در سناریوی انتشار خالص صفر تا سال ۲۰۵۰، نیروگاه‌های آبی متوسط نرخ رشد تولید سالانه نزدیک به ۴ درصد را در سال‌های ۲۰۲۳–۲۰۳۰ حفظ می‌کنند تا تقریباً ۵۵۰۰ تراوات ساعت برق در سال تولید نمایند. در پنج سال گذشته متوسط نرخ رشد کمتر از یک‌سوم میزان موردنیاز بود، که نشان‌دهنده نیاز به تلاش‌های قوی‌تر، به‌ویژه برای ساده‌سازی روند اخذ مجوزها و تضمین پایداری پروژه است. نیروگاه‌های آبی باید به‌عنوان رکن قابل‌اعتماد سیستم‌های برق پاک آینده شناخته شوند و بر این اساس موردحمایت قرار گیرند.

❖ نکات برجسته کشوری و منطقه‌ای

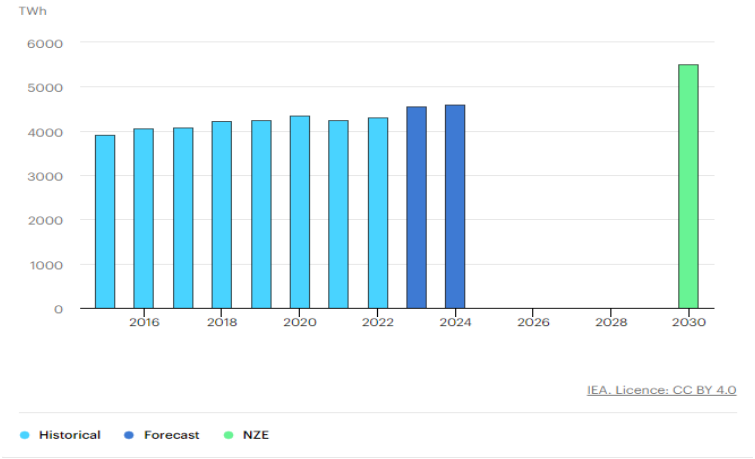
تقریباً سه‌چهارم افزایش ظرفیت جهانی انرژی آبی در سال ۲۰۲۲ در چین اتفاق افتاد. کشورها و مناطقی که پیشرفت قابل‌توجهی در پیشرفت برق‌آبی دارند عبارت‌اند از:

- چین همچنان از نظر افزایش ظرفیت با ۲۴ گیگاوات افزوده‌شده در سال ۲۰۲۲، پیشتاز است که معادل سه‌چهارم کل رشد جهانی است. انرژی آبی بخش مهمی از چهاردهمین برنامه پنج‌ساله انرژی‌های تجدیدپذیر[۸۴] است که در سال ۲۰۲۲ منتشر شد، اما انتظار می‌رود افزایش ظرفیت در سال‌های آینده به دلیل کاهش تعداد سایت‌های مناسب و محدودیت‌های زیست‌محیطی کند شود.
- هند به توسعه چندین پروژه بزرگ برق‌آبی ادامه می‌دهد که انتظار می‌رود ظرفیت قابل‌توجهی از آن در سال‌های آینده آنلاین شود. برق‌آبی یکی از فناوری‌های حیاتی برای تحقق تعهد دستیابی به ظرفیت ۵۰۰ گیگاوات برق غیرفسیلی در سال ۲۰۳۰ است.
- اروپا در سال ۲۰۲۲ تقریباً ۲ گیگاوات ظرفیت انرژی آبی ذخیره_تلمبه‌ای راه‌اندازی نمود که بیشترین مقدار از سال ۱۹۹۰ تاکنون است. هدف دو پروژه در سوئیس و پرتغال تسهیل ادغام فتوولتائیک خورشیدی و باد است.
- در آگوست ۲۰۲۲، ایالات‌متحده قانون کاهش تورم[۸۵] را تصویب کرد، که حمایت را در قالب اعتبار مالیاتی برای فناوری‌های برق‌آبی افزایش و گسترش می‌دهد.

[84] 14th Five-Year Plan for Renewable Energy
[85] Inflation Reduction Act

❖ انرژی

تولید در سال ۲۰۲۲ افزایش یافت، اما به دلیل تداوم خشک‌سالی همچنان زیر سطح رکورد ۲۰۲۰ باقی‌مانده است.



تولید براق آبی در سناریو انتشار خالص صفر – ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰

در سال ۲۰۲۲ تولید برق‌آبی جهانی تقریباً ۷۰ تراوات ساعت (نزدیک به ۲٪) افزایش یافت و به ۴۳۰۰ تراوات ساعت رسید. میزان تولیدات به دلیل استقرار ظرفیت بالا در سال‌های ۲۰۲۱–۲۰۲۲ افزایش یافت، اما ضریب استفاده از ظرفیت جهانی[۸۶] به دلیل خشک‌سالی‌های مداوم در کشورهای غنی از انرژی آبی مانند کانادا، چین، ترکیه و ایالات‌متحده و همچنین در اروپای غربی کمتر از سطوح گذشته باقی می‌ماند. ظرفیت افزوده‌شده در سال ۲۰۲۲ به ۳۲ گیگاوات رسید که ۴۰ درصد بیشتر از میانگین پنج سال قبل بود اما کمتر از ۳۵ گیگاوات اضافه‌شده در سال ۲۰۲۱ بود. چین مسئول سه‌چهارم رشد ظرفیت بود. بااین‌حال، سیر توسعه فعلی پروژه‌ها نشان‌دهنده کاهش سرعت در سال‌های آینده به دلیل کمبود در دسترس بودن سایت‌های مناسب در پویاترین بازارهای انرژی آبی، به‌ویژه چین است. اگرچه انرژی آبی از نظر ظرفیت (۳۸٪ از کل انرژی‌های تجدیدپذیر) و تولید (۵۰٪)، بزرگ‌ترین فناوری برق تجدیدپذیر باقی می‌ماند، اما روند رشد ظرفیت فعلی، برای سناریوی انتشار خالص صفر کافی نیست. رسیدن به حدود ۵۵۰۰ تراوات ساعت تولید برق سالانه تا سال ۲۰۳۰ تقریباً به ۴ درصد رشد متوسط سالانه تولید بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۰ نیاز دارد، که ممکن است با توجه به تسریع اختلالات در دسترس بودن آب ناشی از تغییرات آب و هوایی و ناوگان فرسوده نیروگاه‌های آبی چالش‌برانگیز باشد. از نظر ظرفیت، به طور متوسط سالانه ۵۰ گیگاوات نیروگاه آبی جدید می‌بایست تا سال ۲۰۳۰ به شبکه متصل شوند که تقریباً دو برابر میانگین پنج سال گذشته است. تلاش بسیار بیشتری در سطح جهانی، به‌ویژه در بازارهای درحال‌توسعه و نوظهور، برای دستیابی به این رشد موردنیاز است.

[86] Global Capacity Utilisation Factor

❖ استقرار فناوری

حفظ خروجی نیروگاه‌های برق‌آبی قدیمی نیازمند تلاش قابل‌توجهی است. باوجود ناوگان برق‌آبی در بسیاری از اقتصادهای پیشرفته از موج بزرگ ساخت‌وساز دهه ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰، تقریباً ۴۰ درصد (۴۷۶ گیگاوات) ناوگان جهانی حداقل ۴۰ سال سن دارند (متوسط سن ۳۳ سال). نیروگاه‌های برق‌آبی ۴۵ تا ۶۰ سال عمر می‌کنند. بنابراین، برای حفظ یا بهبود عملکرد و افزایش انعطاف‌پذیری این نیروگاه‌ها، نیاز به نوسازی اساسی وجود دارد. علاوه بر نوسازی تجهیزات اصلی مانند توربین‌ها و ژنراتورها، سرمایه‌گذاری در نوسازی و دیجیتالی‌سازی می‌تواند انعطاف‌پذیری نیروگاه را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد، نیروگاه را ایمن‌تر سازد و مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی مانند خشک‌سالی و کنترل سیل را بسته به مقررات کشور برطرف کند. برنامه‌ریزی پیشرفته برای نوسازی نیروگاه برق‌آبی بسیار مهم است، زیرا علاوه بر مقررات زیست‌محیطی، جریان آب نیز ممکن است از زمانی که نیروگاه برای نخستین بار به بهره‌برداری رسید، تغییر کرده باشد.

❖ خط‌مشی

مشارکت بخش عمومی برای توسعه نیروگاه‌های آبی حیاتی بوده است. بااین‌حال، توجه سیاست انرژی تجدیدپذیر در دو دهه گذشته عمدتاً بر افزایش استقرار فن‌آوری بادی و فتوولتائیک خورشیدی و کاهش هزینه‌های آن‌ها، عمدتاً از طریق طرح‌های حمایتی مانند مشوق‌های مالی و قراردادهای خرید برق بلندمدت متمرکز بوده است. بیش از ۱۰۰ کشور اهداف کوتاه‌مدت و بلندمدت و مشوق‌های مالی برای بادی و خورشیدی معرفی کرده‌اند، اما کمتر از ۳۰ کشور سیاست‌هایی برای هدف قرار دادن نیروگاه‌های برق‌آبی جدید و موجود دارند. ازآنجایی‌که پروژه‌های نیروگاه‌های آبی نسبتا دارای زمان‌بندی‌های پیش‌توسعه[87]، ساخت و عملیاتی طولانی‌تر هستند، ریسک‌های سرمایه‌گذاری بیشتر است و به ابزارها و مشوق‌های سیاستی خاص و همچنین چشم‌انداز سیاستی بلندمدت نیاز دارد. نیروگاه‌های برق‌آبی باید به‌عنوان منابع انرژی تجدید پذیر شناخته شوند. دولت‌ها باید آنها را در اهداف استقرار بلندمدت، هم‌تراز با انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر قرار دهند.

❖ سرمایه‌گذاری

سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های آبی به روند نزولی خود ادامه می‌دهد و نیاز به تلاش‌های بسیار بیشتر برای دستیابی به سناریوی خالص صفر را برجسته می‌کند. در سال ۲۰۲۲، سرمایه‌گذاری در ظرفیت نیروگاه‌های آبی با بیش از ۱۰ درصد کاهش، به کمتر از ۶۵ میلیارد دلار رسید. با در نظر گرفتن پروژه‌های در حال اجرا، کاهش بیشتر سرمایه‌گذاری در سال‌های آینده پیش‌بینی می‌شود این امر، نیاز به تلاش برای قرار دادن انرژی آبی در سناریوی انتشار صفر خالص را نمایان می‌سازد.

منبع: iea.org – Hydroelectricity

[87] Pre-Development

غول‌های فناوری

چاینا تری‌گورجز پیشتاز برق‌آبی

چاینا‌تری‌گورجز[88] در سال ۱۹۹۳ تأسیس شد. این شرکت مستقر در ووهان چین است. چین در تجارت نیروگاه‌های برق‌آبی برتری جهانی دارد. شرکت دولتی چاینا‌تری‌گورجز، یکی از نوآورترین شرکت‌های برق‌آبی است. در ۲۷ سپتامبر ۱۹۹۳، شرکت پروژه تری‌گورجز برای ساخت سد تریگورجز[89] تأسیس شد و در ۲۷ سپتامبر ۲۰۰۹، به شرکت چاینا‌تری‌گورجز تغییر نام داد. در ۲۸ دسامبر ۲۰۱۷، این شرکت از یک شرکت متعلق به‌کل مردم به یک شرکت کاملاً دولتی تبدیل شد. CTG طی ۳۰ سال توسعه مستمر، به بزرگ‌ترین شرکت توسعه و بهره‌برداری انرژی آبی جهان و یک گروه پیشرو انرژی پاک در چین تبدیل شده است.

تا پایان سال ۲۰۲۲، ظرفیت نصب تلفیقی CTG به ۱۲۵ گیگاوات و مجموع دارایی‌ها به ۱.۲۷ تریلیون یوان می‌رسد. CTG رتبه اعتباری ملی خود را در سطح ملی حفظ کرده است و همچنان در بین شرکت‌های دولتی مرکزی در شاخص‌های مختلف کلیدی پیشتاز است. این شرکت، در ارزیابی عملکرد سالانه شرکت‌های دولتی مرکزی برای ۱۶ سال متوالی رتبه "A" را دریافت کرده است.

[88] China Three Gorges(CTG)
[89] Three Gorges Project

مشخصات کلیدی شرکت CTG

❖ هدف CTG : تلاش برای انرژی پاک و حفاظت از رودخانه یانگ تسه و رفاه عمومی

CTG به خوبی از نیروهای مادر طبیعت برای تولید انرژی پاک در راستای رفاه عمومی استفاده می‌کند. همچنین از رودخانه یانگ تسه حافظت می‌نماید. با انجام این کار، همزیستی هماهنگ بین بشر و طبیعت ترویج می‌یابد، تحول سبز همه‌جانبه، توسعه اقتصادی و اجتماعی را پیش می‌برد و به تحقق آرمان‌های مردم برای زندگی بهتر کمک می‌کند.

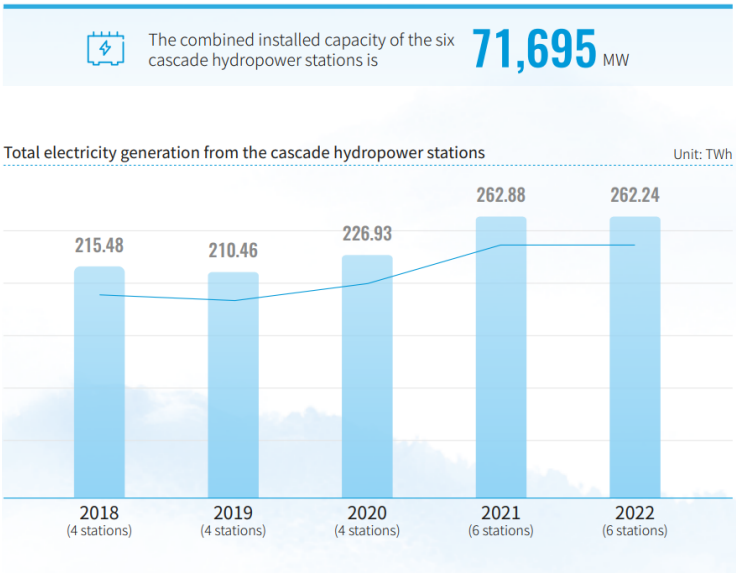
❖ شعار CTG : توانمندسازی دنیای سبزتر

CTG از مسیر توسعه سبز پیروی می‌کند و حفاظت از محیطزیست را در اولویت قرار می‌دهد. هم‌چنین، با افزایش ظرفیت خود برای ارائه انرژی پاک و محصولات زیست‌محیطی باکیفیت، از توسعه پایدار حمایت می‌کند.

❖ بزرگ‌ترین کریدور انرژی پاک جهان

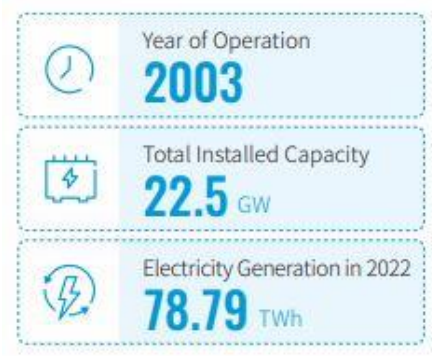
پروژه‌های انرژی آبی در مقیاس بزرگ CTG، به‌عنوان ستون‌های انرژی کشور چین، شناخته می‌شوند. در سال ۲۰۲۲، بزرگ‌ترین کریدور انرژی پاک جهان واقع در امتداد جریان اصلی رودخانه یانگ تسه به طور کامل عملیاتی شد. این کریدور شامل شش نیروگاه برق‌آبی است: Wudongde، Baihetan، Xiluodu، Xiangjiaba، Three Gorges و Gezhouba. ظرفیت نصب‌شده این نیروگاه‌ها، مجموعاً ۷۱۶۹۵ مگاوات است. از طریق برنامه‌ریزی علمی و رهاسازی آب به شکل کارآمد،

متوسط خروجی تولید برق سالانه به ۳۰۰ تراوات ساعت می‌رسد. این امر پشتیبانی قابل‌توجهی را برای عملکرد پایدار شبکه برق و انتقال برق از مناطق غربی به شرقی فراهم کرده است.



این شش نیروگاه یک سیستم مخزن آبشاری با ظرفیت کل ذخیره‌سازی ۹۱.۹ میلیارد مترمکعب را تشکیل می‌دهند که هم به‌عنوان یک مخزن استراتژیک منابع آب شیرین و هم مکانیزم کنترل سیل عمل می‌کند. این مراکز، دارای ظرفیت ترکیبی کنترل سیل ۳۷.۶ میلیارد مترمکعب هستند که به بیش از ۵۳ درصد از کل ظرفیت کنترل سیل در مدیریت کنترل سیل حوضه رودخانه یانگ تسه کمک می‌کند. این نیروگاه‌ها علاوه بر کنترل سیل، نقش حیاتی در استفاده از منابع آب و برنامه‌ریزی اکولوژیکی دارند. مخازن در تنظیم منابع آب ضروری هستند و هرکدام به‌عنوان یک مخزن مهم برای ذخیره آب شیرین عمل می‌کنند.

تا پایان سال ۲۰۲۲، تولید تجمعی برق از بزرگ‌ترین کریدور انرژی پاک جهان از ۳۳۰۰ تراوات ساعت فراتر رفت که معادل صرفه‌جویی در بیش از ۹۰۰ میلیون تن زغال‌سنگ استاندارد و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به میزان بیش از ۲.۸ میلیارد تن بود. در سال ۲۰۲۲، عملکرد کلی عملیاتی پروژه تری‌گورجز عالی بود. مزایای جامع آن در منابع آب، تولید برق، ناوبری و اکولوژی کاملاً محقق شد. این پروژه به‌عنوان ستون فقرات در ساخت بزرگ‌ترین کریدور انرژی پاک جهان در امتداد رودخانه یانگ تسه نقش اساسی داشت.



از مزایای مهم این پروژه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کنترل سیل و استفاده از منابع آب
- تولید انرژی پاک
- بهبود شرایط ناوبری
- حفاظت از محیطزیست

نمایی از پروژه تری‌گورجز شرکت CTG

❖ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

CTG به‌عنوان بزرگ‌ترین شرکت توسعه و بهره‌برداری از نیروگاه‌های آبی جهان و پیشرو گروه انرژی پاک در چین، فعالانه به استراتژی ملی انرژی این کشور خدمت می‌کند. این شرکت به طور فعال در حال گسترش کسب‌وکار ذخیره‌سازی تلمبه‌ای خود است. CTG به‌سرعت پروژه‌های انرژی ذخیره‌سازی تلمبه‌ای را پیش می‌برد. در سال ۲۰۲۲، پروژه‌ها در مکان‌های مختلف ازجمله Tiantai و Songyang در استان ژجیانگ، Pingtanyuan، Qingjiang، و Baohuasi در استان هوبی، Zhangye در استان گانسو، و Shitai در استان آنهویی، همگی در حال ساخت بودند و مجموعاً میزان نصب را به ۹.۵گیگاوات افزایش داده است.

❖ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای چانگلونگشان

نیروگاه ذخیره تلمبه‌ای چانگلونگشان[۹۰] در شهر تیان هوانگ پینگ، شهرستان آنجی، استان ژجیانگ واقع شده است. این ایستگاه که در مرکز بارگیری شبکه برق چین شرقی واقع شده است، به شش واحد ذخیره‌سازی تلمبه‌ای ۳۵۰ مگاواتی مجهز است که مجموعاً ظرفیت نصب‌شده ۲.۱ گیگاوات را شامل می‌شود. کارکردهای اصلی این مراکز، شامل کاهش پیک[۹۱]، پرکردن شکاف[۹۲]، مدولاسیون فرکانس و فاز[۹۳] و پشتیبانی از سیستم برای شبکه برق شرق چین است. به طور متوسط، این ایستگاه می‌تواند در طول دوره‌های اوج تقاضا به تولید برق اضافی ۲.۴۳۵ تراوات ساعت کمک کند، که قابلیت تنظیم شبکه را افزایش می‌دهد، ساختار منبع برق را بهینه می‌کند، و شرایط

[90] Changlongshan Pumped Storage Power Station
[91] Peak-Shaving
[92] Valley-Filling
[93] Frequency and Phase Modulation

عملیاتی شبکه برق چین شرقی را بهبود می‌بخشد. در ۳۰ ژوئن ۲۰۲۲، تمام شش واحد نیروگاه ذخیره‌سازی پمپ چانگلونگشان برای تولید برق راه‌اندازی شد.

نیروگاه ذخیره تلمبه‌ای چانگلونگشان

❖ اجرای مؤثر حالت مدیریت هوشمند آب

CTG به طور مداوم به تعمیق مدیریت جامع محیط‌زیست آب پایبند بوده است. این شرکت با تکیه بر سیستم‌های یکپارچه شبکه‌های خط لوله فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، مدل «مدیر هوشمند آب شهری[۹۴]» را تهیه و عملی کرده است. بهبود مستمر طراحی سطح بالای حالت مدیریت هوشمند آب، منجر به یک مرکز نمایشی معیار در لوآن[۹۵] شده است. در سپتامبر ۲۰۲۲، طی جلسه‌ای برای حفاظت از رودخانه یانگ تسه، حالت مدیریت هوشمند آب در لوآن به‌اتفاق آرا از سوی شهرداری به رسمیت شناخته شد. ارتقای حالت مدیریت هوشمند آب نتایج عملی به همراه داشت که منجر به تأسیس شرکت‌های مدیریت آب در مکان‌های مختلف ازجمله Yueyang در هونان، Jiujiang در Jiangxi، Yichang و Xiantao در Hubei، Wuhu و Lu'an در Anhui شد. این شرکت‌ها دارایی‌ها و عملیات پروژه را با شرکت مدیریت آب هوشمند لوآن که به عملیات اساسی دست یافت، هماهنگ کردند.

❖ حفاظت از محیط‌زیست

CTG به‌عنوان بزرگ‌ترین شرکت توسعه و بهره‌برداری انرژی آبی جهان و یک گروه انرژی پاک پیشرو در چین، به طور مداوم مفهوم اولویت اکولوژیکی و توسعه سبز را در کل فرآیند توسعه، ساخت و بهره‌برداری انرژی پاک ادغام و استانداردهای بالا و ملاحظات سختگیرانه را برای اجرای اقدامات مختلف حفاظت از محیط زیست رعایت می‌کند. تلاش‌های این شرکت در حفاظت از محیط‌زیست برای نیروگاه‌های آبی آبشاری[۹۶] به طور مداوم در خط مقدم صنعت بوده و از مقامات ملی زیست‌محیطی و مدیریت آب به رسمیت شناخته‌شده است.

[94] Smart Urban Water Manager"
[95] Lu'an
[96] Cascade Hydropower Stations

❖ حفاظت از گیاهان خشکی[97] در معرض خطر

CTG با به‌کارگیری استراتژی‌هایی مانند حفاظت در محل[98]، حفاظت از جابجایی[99]، و تحقیقات اصلاح نژاد مصنوعی[100]، به طور فعالانه درگیر تحقیق در موردحفاظت از منابع گیاهی کمیاب و منحصربه‌فرد در بخش میانی و بالایی رودخانه یانگ تسه[101] است. از طریق فعالیت‌هایی مانند بررسی منابع و توسعه فن‌آوری‌های جمع‌آوری و حفاظت، گیاهان وحشی در حال انقراض که تحت تأثیر تخریب زیستگاه قرارگرفته‌اند، جابه‌جا و محافظت می‌شوند. باغ‌های گیاهان کمیاب نیز ایجادشده است. تا پایان سال ۲۰۲۲، مؤسسه تحقیقات گیاهان کمیاب یانگ تسه[102] به طور تجمعی، از ۲۹.۸ هزار گیاه از ۱۳۸۰ گونه متعلق به ۴۹۱ جنس در ۱۴۰ خانواده از منابع گیاهی کمیاب و منحصربه‌فرد محافظت کرده است. این دستاورد نقطه عطفی تاریخی در مقیاس حفاظت از منابع گیاهی است.

❖ حفاظت از جانوران آبزی در حال انقراض

CTG متعهد به حفاظت و تحقیق در مورد ماهیان خاویاری چینی و دیگرگونه‌های ماهی کمیاب و منحصربه‌فرد در رودخانه یانگ تسه بوده است. با تمرکز بر تکنیک‌های پرورش[103] و مقررات رشد در ساخت جمعیت مصنوعی ماهیان خاویاری چینی، تحقیقات علمی زیادی انجام شده است. پس از دستیابی موفقیت‌آمیز به فناوری تولیدمثل کامل مصنوعی نسل دوم برای ماهیان خاویاری چینی، این شرکت موفق به پرورش ۲۵۰۰۰۰ بچه ماهی در مقیاس بزرگ شد. از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۲، CTG ۶۵ رهاسازی متوالی ماهیان خاویاری چینی را با رهاسازی تجمعی نزدیک به ۵.۳ میلیون ماهی انجام داده است.

حفاظت از جانوران آبزی در حال انقراض

[97] Terrestrial Plants
[98] On-Site Protection
[99] Relocation Protection
[100] Artificial Breeding Research
[101] Yangtze River
[102] Yangtze Rare Plant Research Institute
[103] Breeding Techniques

برای ۱۲ سال متوالی، CTG مقررات زیست‌محیطی چند هدفه را از مخزن تری‌گورجز تا مخازن آبشار پایین‌دست در رودخانه جینشا[۱۰۴] انجام داده است. هدف از این کار ایجاد شرایط هیدرولوژیکی مطلوب برای پرورش ماهی است. در سال ۲۰۲۲، ۱۷ آزمایش تنظیم زیست‌محیطی انجام شد که باعث ترویج تخم‌ریزی و تولیدمثل ماهی‌ها در شاخه اصلی رودخانه یانگ تسه شد و به طور مؤثری از عملکردهای اکولوژیکی مخازن آبشار استفاده نمود.

❖ سرمایه و امور مالی

در سال ۲۰۲۲، کسب‌وکارهای سرمایه و مالی CTG توسعه ثابتی را تجربه کردند. بازسازی پروژه‌های رودخانه جینشا به طور پیوسته پیشرفت کرد و تلاش‌های مستمری در زمینه نوآوری مالی سبز[۱۰۵] انجام شد. طرح بهبود چرخشی[۱۰۶] برای دارایی‌های سرمایه‌گذاری سهام و طرح ارتقای کیفیت برای شرکت‌های بورسی به طور مؤثر اجرا شد. این شرکت بازده سرمایه‌گذاری بیش از ۱۳ میلیارد یوان در سال را به دست آورد.

Key Financial Indicators

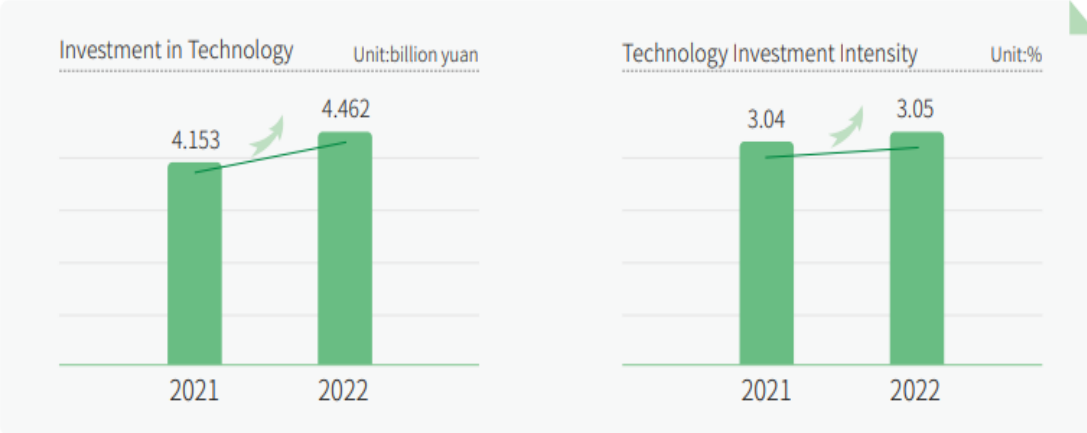
Project	2018	2019	2020	2021	2022
Total Assets (RMB billion)	750.41	837.83	969.97	1154.31	**1,268.78**
Owner's Equity Attributable to the Parent Company (RMB billion)	290.27	305.24	335.91	364.28	**383.91**
Operating Revenue (RMB billion)	93.94	99.26	111.70	138.31	**146.26**
Net Profit after Tax (RMB billion)	35.26	35.22	45.40	50.98	**42.53**
Ratio of Total Cost and Expenses to Operating Revenue (%)	65.3	66.1	61.7	68.6	**73.3**
EBITDA (RMB billion)	64.77	66.61	77.76	86.47	**94.59**

شاخص‌های کلیدی مالی

❖ نوآوری فناورانه

CTG از استراتژی توسعه مبتنی بر نوآوری حمایت می‌کند و پلت فرم فناوری‌های دارای نوآوری را در سطح ملی ایجاد کرده است. تلاش‌ها در اجرای پروژه‌های فناوری بزرگ نتایج قابل‌توجهی را به همراه داشته است که نمونه آن دستاوردهای مهمی مانند جایزه ملی پیشرفت علم و فناوری[۱۰۷] است. در سال ۲۰۲۲، CTG به طور پیوسته سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه را از طریق راه‌های مختلف افزایش داده است و حمایت مالی برای پیشرفت پروژه‌های فناوری را تضمین می‌کند.

[104] Jinsha River
[105] Green Finance Innovation
[106] Rotational Improvement Plan
[107] National Science and Technology Progress Award



سرمایه‌گذاری در فناوری ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲

❖ حصول اطمینان از کمک مؤثر در مناطق مخزن

منطقه مخزن تری گورجز[۱۰۸]:انجام مستمر اقدامات کمکی مانند توسعه زیرساخت‌ها و احیای محیطزیست، با تمرکز بر ایجاد یک منطقه مخزن قابل سکونت، تجاری پسند و زیبا صورت پذیرفته است. این تلاش‌ها به طور مؤثر رفاه ساکنان جابجا شده را افزایش می‌دهد و باعث رونق و توسعه منطقه مخزن می‌شود.

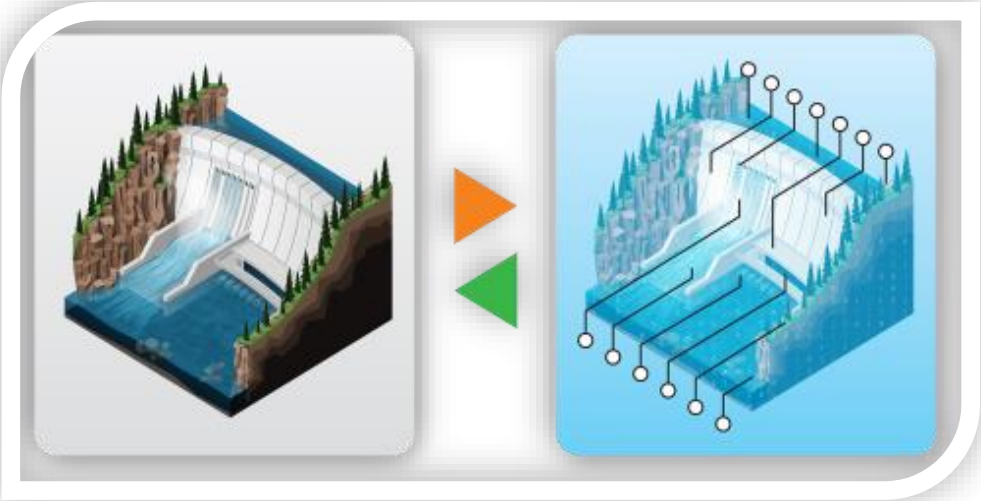
منطقه مخزن رودخانه جینشا[۱۰۹]: تثبیت و گسترش دستاوردهای بهبود معیشت از قبیل مسکن و بهداشت، اجرای فعال پروژه‌های کمکی آموزش محور و ارتقای همه‌جانبه کیفیت زندگی ساکنان جابجا شده در منطقه مخزن.

CTG به ساخت یک پایگاه فتوولتائیک در استان هاینان[۱۱۰] کمک کرد و به طور مؤثر توسعه صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر محلی را ارتقا داد. CTG همچنین پروژه‌هایی مانند کمک به بیماری‌های مادرزادی قلبی، حمایت بیمارستانی، رفاه عمومی و زیست‌محیطی را اجرا کرد که به طور مؤثر زیرساخت‌های روستایی و سطح خدمات عمومی را افزایش داد.

منبع:2022 Annual Report - China Three Gorges Corporation

[108] Three Gorges Reservoir Area
[109] Jinsha River Reservoir Area
[110] Hainan

دوقلوهای دیجیتال در برق آبی



دوقلوی دیجیتال یک نمایش مجازی از یک موجود فیزیکی است که با استفاده از منابع داده‌های مختلف مانند حسگرها، شبیه‌سازی‌ها و داده‌ها ایجادشده است. ارکان اصلی دوقلوهای دیجیتال به قرار زیر هستند:

- نمایش دیجیتال[۱۱۱]: یک مدل مجازی از تأسیسات برق‌آبی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرها، دستگاه‌ها، داده‌های تاریخی، سوابق تعمیر و نگهداری و سایر منابع ایجاد می‌شود.
- یکپارچه‌سازی داده‌ها[۱۱۲]: داده‌های حسگرها، دستگاه‌ها و سایر منابع برای به‌روزرسانی و حفظ دقت و ارتباط دوقلوی دیجیتال استفاده می‌شود.
- تجزیه‌وتحلیل و شبیه‌سازی[۱۱۳]: یک دوقلوی دیجیتال، شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل را با هدف پیش‌بینی رفتار، آزمایش تغییرات و بهینه‌سازی عملکرد انجام دهد.
- ارتباط[۱۱۴]: اطلاعات بین یک دوقلوی دیجیتال و جسم فیزیکی از طریق حسگرها و سایر اتصالات داده تبادل می‌شود.

[111] Digital Representation
[112] Data Integration
[113] Analytics and Simulation
[114] Communication

❖ نقش دوقلوی دیجیتال در برق‌آبی نسل بعدی

دوقلوهای دیجیتال نقش مهمی در بهینه‌سازی بهره‌برداری، نگهداری و عملکرد کلی تأسیسات برق‌آبی ایفا می‌کنند.

- پایش و تجزیه‌وتحلیل عملکرد[۱۱۵]: تجزیه‌وتحلیل داده‌ها به‌صورت آنی[۱۱۶] به اپراتورها اجازه می‌دهد تا بر عملکرد یک مرکز نظارت کنند و انحرافات را از شرایط عملیاتی بهینه شناسایی کنند.
- تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌کننده[۱۱۷]: دوقلوهای دیجیتال خرابی تجهیزات و نیازهای تعمیر و نگهداری را از طریق تجزیه‌وتحلیل داده‌های حسگر تاریخی و آنی، فعال کردن فعالیت‌های تعمیر و نگهداری در زمان مناسب، کاهش زمان خرابی و اجتناب از قطعی‌های غیرمنتظره‌ی پرهزینه، پیش‌بینی می‌کنند.
- بهینه‌سازی تولید انرژی[۱۱۸]: با تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و شبیه‌سازی شرایط عملیاتی مختلف، اپراتورها می‌توانند راه‌هایی را برای بهینه‌سازی تولید انرژی، مانند تنظیم تنظیمات توربین، مدیریت سطوح مخزن آب، و هماهنگی تولید انرژی با نوسانات تقاضا، شناسایی کنند.
- مدیریت منابع و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی[۱۱۹]: دوقلوهای دیجیتال منابع آب را با مدل‌سازی جریان‌های آب ورودی، سطح مخزن و عوامل محیطی، به طور موثرتری مدیریت می‌کنند. این امر به کمینه‌سازی مصرف آب و اثرات بالقوه استراتژی‌های عملیاتی مختلف بر محیط‌زیست کمک می‌کند. همچنین به اپراتورها کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای اتخاذ کنند که اثرات منفی را به حداقل برساند.

❖ مطالعه موردی

دفتر فناوری‌های انرژی آب وزارت انرژی ایالات‌متحده[۱۲۰] چارچوب دوقلوهای دیجیتال برای برق‌آبی را برای ایجاد یک پلت فرم مجازی با هدف تسریع توسعه فناوری برای صنعت برق‌آبی راه‌اندازی می‌کند. با میانگین سنی ۶۴ سال، ناوگان برق‌آبی ایالات‌متحده نیاز به نوسازی هوشمند[۱۲۱] دارد تا هزینه‌ها را کاهش دهد و قابلیت اطمینان و ارزش کلی فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر این کشور را افزایش دهد. ازآنجایی‌که شبکه برق، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری را در اولویت قرار می‌دهد و ترکیبی از منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر درحال‌توسعه را ارزش‌گذاری می‌کند، فناوری نیروگاه‌های آبی برای رقابتی ماندن نیازمند یکپارچه‌سازی سیستم‌های کنترل، تجزیه‌وتحلیل، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. دوقلوهای دیجیتال با ایجاد

[115] Performance Monitoring and Analysis
[116] Real-Time
[117] Predictive Maintenance
[118] Optimizing Energy Production
[119] Resource Management and Environmental Impact Assessment
[120] U.S. Department of Energy Water Power Technologies Office
[121] Smart Modernization

پروفایل‌های دیجیتالی نیروگاه‌های برق‌آبی تاریخی و فعلی بر اساس داده‌های مجازی و آنی و بازخورد برای بهینه‌سازی عملیات برق‌آبی، چالش‌های موجود را برطرف می‌کند.

توسعه هیدروالکتریک آلدر[۱۲۲] بخشی از پروژه هیدروالکتریک نیسکوالی[۱۲۳] است که در رودخانه نیسکوالی[۱۲۴] در ایالت واشنگتن واقع شده است. این پروژه، متعلق به اداره خدمات عمومی شهر تاکوما[۱۲۵] است و یکی از اجزای مهم پروژه هیدروالکتریک رودخانه نیسکوالی است.

نمای هوایی دیوار بتنی سد دریاچه آلدر

سد آلدر در سال ۱۹۴۵ تکمیل شد. ۳۳۰ فوت بالاتر از سنگ بستر، ۱۶۰۰ فوت امتداد دارد. دو ژنراتور توربین ۲۵۰۰۰ کیلوواتی در این نیروگاه انرژی تجدیدپذیر آبی پاک تولید می‌کنند تا به ۱۸۰۰۰ خانه در سال خدمات‌رسانی شود.

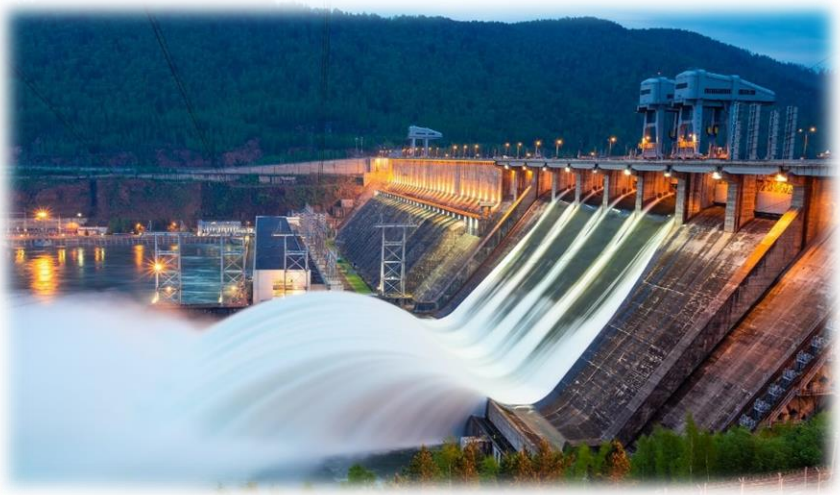
پروژه دوقلوی دیجیتال آلدرا برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد سطح آب، نرخ جریان و سایر پارامترهای مهم برای آموزش یک دوقلوی دیجیتال صورت گرفت و پس‌ازاینکه آموزش داده شد، مدل‌سازی و درنهایت بر اساس داده‌های واقعی اعتبارسنجی شد. هدف از این پروژه نظارت اپراتورها بر عملکرد تأسیسات و شناسایی هرگونه انحراف از شرایط بهینه بهره‌برداری است. دوقلوهای دیجیتال قادر به شبیه‌سازی رویدادها و شرایط، پیش‌بینی تعمیر و نگهداری و تعمیرات و بررسی نتایج با استفاده از داشبورد دوقلوی دیجیتال هستند.

منبع:pnnl.gov - Digital Twins for Hydropower – October2023

[122] Alder Hydroelectric Development
[123] Nisqually Hydroelectric Project
[124] Nisqually River
[125] Tacoma’s Public Utilities Department

تحولات فناورانه

فناوری‌های برق‌آبی و چالش‌های آن



انرژی آبی بزرگ‌ترین راه‌حل تجدیدپذیر در سراسر جهان است که بیش از دو برابر انرژی بادی و بیش از چهار برابر انرژی خورشیدی تولید انرژی دارد. روش پمپاژ آب به ارتفاع مشخص (همانند یک تپه)، با نام «نیروی آبی ذخیره تلمبه‌ای[۱۲۶]»، بیش از ۹۰ درصد از کل ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی جهان را شامل می‌شود. برق‌آبی همچنین کانون نوآوری‌های مداوم است. این امر علاوه بر کمک به تثبیت شبکه برق، به احیای زمین و آبیاری در مواقع خشک‌سالی کمک می‌کند. در سطح بین‌المللی، چین با ساخت هزاران سد جدید برق‌آبی در چند دهه گذشته، به توسعه اقتصادی روی آورده است. آفریقا، هند و سایر کشورهای آسیایی و اقیانوسیه نیز قرار است همین روند را پیش بگیرند.

توسعه بدون نظارت دقیق زیست‌محیطی، می‌تواند منجر به مشکلاتی شود؛ زیرا سدها و مخازن، اکوسیستم رودخانه‌ها و زیستگاه‌های اطراف را مختل می‌کنند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که مخازن می‌توانند دی‌اکسید کربن و متان بیشتری نسبت به آنچه تصور می‌شد، منتشر نمایند. به‌علاوه، خشک‌سالی ناشی از اقلیم باعث شده است که آب به‌عنوان منبع انرژی، کمتر قابل‌اعتماد باشد؛ زیرا سدها مقدار قابل‌توجهی از ظرفیت تولید برق خود را ازدست‌داده‌اند.

با این حال برق‌آبی برای توسعه با چالشهایی روبروست:

[126] pumped storage hydropower

- **چالش صدور مجوز تأسیسات نیروگاه برق‌آبی**

در سال ۲۰۲۱، برق‌آبی حدود ۶ درصد از تولید برق در مقیاس شهری در ایالات‌متحده و ۳۲ درصد از تولید برق تجدیدپذیر را به خود اختصاص داده است. این فناوری، تا سال ۲۰۱۹ بزرگ‌ترین تجدیدپذیر در ایالات‌متحده بود، اما سپس، انرژی باد از آن پیشی گرفت. بنابر پیش‌بینی‌ها، ایالات‌متحده در دهه آینده شاهد رشد زیادی در انرژی آبی نخواهد بود. این امر تا حدی به دلیل فرآیند سخت صدور مجوزهای مربوطه است. برای طی فرآیند صدور مجوز ده‌ها میلیون دلار و سال‌ها تلاش هزینه می‌شود. حدود ده‌ها سازمان مختلف درگیر صدور مجوز یا صدور مجوز مجدد برای یک واحد نیروگاهی هستند و این فرآیند بیشتر از صدور مجوز یک نیروگاه هسته‌ای به طول می‌انجامد.

- **نوسازی و تقویت نیروگاه‌های قدیمی و گسترش انرژی آبی ذخیره‌تلمبه‌ای**

با گذشت سال‌های طولانی از فعالیت نیروگاه‌های برق‌آبی، نیاز به بررسی، پایش و نوسازی این واحدها و درنهایت اخذ مجوزهای مجدد وجود دارد. به‌طور مثال در ایالات‌متحده، میانگین نیروگاه‌های برق‌آبی بیش از ۶۰ سال قدمت دارند؛ بنابراین بسیاری از آن‌ها به‌زودی نیازمند اخذ مجوز مجدد هستند. از طریق ارتقاء نیروگاه‌های قدیمی و افزودن نیرو به سدهای موجود، امکان افزایش پتانسیل رشد برق‌آبی وجود دارد. به‌طور مثال، در ایالات‌متحده ۹۰۰۰۰ سد وجود دارد که بیشتر آن‌ها برای کنترل سیل، آبیاری، ذخیره آب و تفریح ساخته‌شده‌اند. تنها ۳ درصد از این سدها برای تولید برق استفاده می‌شوند.

سد شستا[۱۲۷] در شهرستان شستا، کالیفرنیا، آغاز فعالیت تولید برق در سال ۱۹۴۵

رشد در این بخش، به گسترش انرژی آبی ذخیره‌تلمبه‌ای متکی است. این فناوری، به‌عنوان راهی برای تقویت انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین ذخیره انرژی اضافی برای استفاده در مواقعی که خورشید نمی‌تابد و باد نمی‌وزد، موردتوجه قرار می‌گیرد. درحالی‌که امروزه ظرفیت ذخیره‌تلمبه‌ای در ایالات‌متحده حدود ۲۲ گیگاوات تولید برق است، بیش از ۶۰ گیگاوات پروژه پیشنهادی در راستای توسعه وجود دارد. از منظر پروژه‌های پیشنهادی در این حوزه، چین در رتبه نخست و ایالات‌متحده در

[127] Shasta

رتبه دوم جای دارند. در سال‌های اخیر، مجوزها و درخواست‌های مجوز برای سیستم‌های ذخیره‌سازی پمپی به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است و فناوری‌های جدید در حال بررسی هستند. این فناوری‌ها شامل تأسیسات «حلقه بسته[۱۲۸]» است که در آن هیچ یک از مخزن‌ها به منبع آب خارجی متصل نیستند و یا تأسیسات کوچک‌تری وجود دارند که از تانک‌ها[۱۲۹] به‌جای مخازن استفاده می‌کنند. هر دو روش اختلال کمتری برای محیط اطراف ایجاد می‌نمایند.

- **تهدید آبزیان و بر هم زدن اکوسیستم**

احداث سد بر روی رودخانه‌ها یا ایجاد مخازن جدید می‌تواند مانع مهاجرت ماهی‌ها و آبزیان شود و اکوسیستم‌ها و زیستگاه‌های اطراف را تخریب نماید. سدها و مخازن حتی منجر به آوارگی و جابه‌جایی ده‌ها میلیون نفر(اغلب در جوامع بومی یا روستایی) در طول تاریخ شده‌اند.

- **انتشار گازهای گلخانه‌ای**

آسیب‌های فوق‌الذکر به‌طور گسترده‌ای پذیرفته‌شده است. اما چالش جدید، انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. ایلیسا اوکو[۱۳۰]، دانشمند ارشد آب‌وهوا در صندوق دفاع از محیط‌زیست[۱۳۱]، می‌گوید:«آنچه مردم متوجه نمی‌شوند این است که این مخازن درواقع مقدار زیادی دی‌اکسید کربن و متان را به جو منتشر می‌کنند که هر دو گازهای گلخانه‌ای قوی هستند. انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تجزیه پوشش گیاهی و سایر مواد آلی است که در هنگام غرقاب شدن منطقه برای ایجاد یک مخزن، متان را تجزیه کرده و آزاد می‌کند. معمولاً متان سپس به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود، اما برای انجام این کار به اکسیژن نیاز است. اگر آب گرم باشد، لایه‌های پایینی از اکسیژن تهی می‌شوند. به این معنی که متان سپس در جو آزاد می‌شود.» وقتی صحبت از گرم شدن جهان به میان می‌آید، متان در ۲۰ سال اول پس از انتشار، بیش از ۸۰ برابر قوی‌تر از دی‌اکسید کربن است. تاکنون، تحقیقات نشان می‌دهد که مناطق گرم‌تر جهان، مانند هند و آفریقا، گیاهان آلوده‌کننده بیشتری دارند ولی در چین و ایالات‌متحده نگرانی خاصی ندارند. اما باید راه‌حل دقیق‌تری برای اندازه‌گیری انتشار وجود داشته باشد.

- **خشک‌سالی**

یکی دیگر از مشکلات عمده برای نیروگاه‌های آبی، خشک‌سالی ناشی از اقلیم است. مخازن کم‌عمق انرژی کمتری تولید می‌کنند. به‌طور مثال، این موضوع در غرب آمریکا که خشک‌ترین دوره ۲۲ ساله را در ۱۲۰۰ سال گذشته داشته است، نگران‌کننده است.

[128] Closed-loop
[129] Tank
[130] Ilissa Ocko
[131] Environmental Defense Fund

کاهش سطح آب دریاچه مید، مخزن بزرگ واقع در نوادا و آریزونا برای تغذیه سد هوور

ازآنجایی‌که مخازنی مانند دریاچه پاول[۱۳۲]، که سد گلن کانیون[۱۳۳] را تغذیه می‌کند، و دریاچه مید[۱۳۴]، که سد هوور[۱۳۵] را تغذیه می‌کند، الکتریسیته کمتری تولید می‌کنند، مصرف سوخت‌های فسیلی در حال افزایش هستند. یک مطالعه نشان داد که از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵، ۱۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن اضافی در ۱۱ ایالت در غرب منتشر شد، زیرا خشک‌سالی باعث کاهش تولیدات انرژی آبی شد. بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، مطالعه دیگری برای کالیفرنیا تخمین زد که تولید برق‌آبی ازدست‌رفته ۲.۴۵ میلیارد دلار برای این ایالت هزینه داشته است. برای اولین بار در تاریخ، کمبود آب در دریاچه مید اعلام و باعث کاهش تخصیص آب در آریزونا، نوادا و مکزیک شد. سطح آب در حال حاضر در ارتفاع ۱۰۴۷ فوتی است و انتظار می‌رود بیش از این نیز کاهش یابد، زیرا اداره احیاء[۱۳۶] گامی بی‌سابقه برای مهار آب در دریاچه پاول، واقع در بالای دریاچه مید برداشته است، تا سد گلن کانیون بتواند به تولید برق ادامه دهد. اگر ارتفاع آب دریاچه مید به زیر ۹۵۰ فوت برسد، دیگر برق تولید نخواهد کرد.

❖ مزایای انرژی برق‌آبی

مانند سایر منابع سبز، مزایای برق‌آبی نیز در طول زمان افزایش می‌یابد؛ زیرا عملکرد و کارایی تجهیزات بهبود می‌یابد. با تسهیل بازیافت مواد، هم هزینه‌ها و هم اثرات زیست‌محیطی کاهش می‌یابند. بااین‌حال، برخی ویژگی‌ها، نیروی آب را از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر متمایز می‌سازد. ۱۰ دلیل اهمیت نیروگاه آبی در تعادل انرژی جهان عبارتند از.

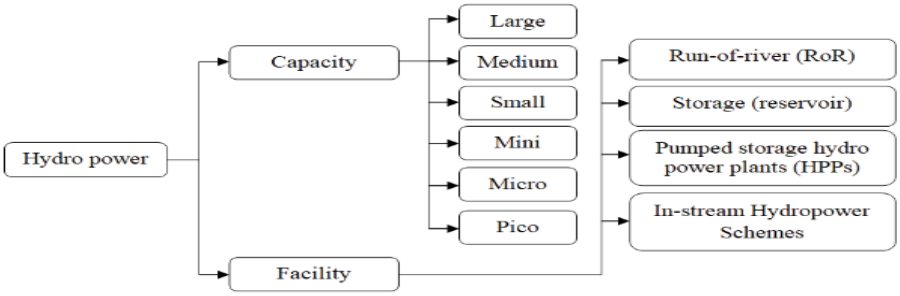
۱.تمیز، پایدار و در دسترس

[132] Powell
[133] Glen Canyon Dam
[134] Mead
[135] Hoover Dam
[136] Bureau of Reclamation

۲. منبع انرژی بسیار انعطاف‌پذیر
۳. تثبیت شبکه برق با جلوگیری از تناوب
۴. کاهش خطر سیل
۵. کمک به بازیابی مناطق باتلاقی
۶. افزایش مناطق توریستی و ورزش‌های آبی
۷. محافظت از تنوع زیستی
۸. انرژی عظیم نهفته در آب
۹.جزو به صرفه‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر
۱۰. نوآوری مستمر

❖ طبقه‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی

برق‌آبی، الکتریسیته‌ای است که توسط ژنراتورهایی تولید می‌شود که توسط حرکت آب رانده می‌شوند. آب مینیاتوری[۱۳۷] کلمه‌ای است که برای تأسیسات نیروی برق‌آبی که معمولاً تا ۳۰۰ کیلووات برق تولید می‌کنند، استفاده می‌شود. این نیروگاه‌ها می‌توانند ظرفیتی را به یک خانه یا شبکه کوچکی از مناطق بدهند. تعداد قابل‌توجهی از این تأسیسات در سراسر جهان، به‌ویژه در کشورهای دارای مناطق گسترده کشاورزی، وجود دارد. نیروگاه‌های برق‌آبی بر اساس نوع تأسیسات و ظرفیت طبقه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، نوع تأسیسات مجدداً به چهار نوع ذخیره یا مخزن[۱۳۸]، جریان رودخانه[۱۳۹]، نیروگاه‌های برق‌آبی ذخیره‌تلمبه‌ای[۱۴۰] و طرح‌های برق‌آبی درون جریان[۱۴۱]طبقه‌بندی می‌شود. نیروگاه‌های برق‌آبی از نظر ظرفیت به پیکو، میکرو، مینی، کوچک، متوسط و بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند.



طبقه‌بندی انواع نیروگاه‌های برق‌آبی

[137] Miniature Hydro
[138] Storage or Reservoir
[139] Run-of-River (RoR)
[140] Pumped Storage Hydro Power Plants (HPPs)
[141] In-stream Hydropower Schemes

❖ طبقه‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی بر اساس ظرفیت

نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ[۱۴۲] در مخازن ذخیره‌سازی و سدهای بزرگ مستقر هستند. این نیروگاه‌ها معمولاً به شبکه متصل هستند. سرمایه‌گذاری بالایی برای احداث این نوع نیروگاه‌ها موردنیاز است. ۱۰ مگاوات تا صدها مگاوات برق در این نیروگاه‌ها تولید می‌شود که می‌تواند انرژی چند هزار خانه را تأمین نماید. نیروگاه‌های برق آبی کوچک[۱۴۳] معمولاً از جریان[۱۴۴] یا جریان رودخانه[۱۴۵] هستند که می‌توانند تا چند مگاوات برق تولید کنند. این نیروگاه‌ها، دستاوردهای برق‌آبی را با دستاوردهای تولید برق غیرمتمرکز[۱۴۶] ادغام می‌کنند. این نیروگاه‌ها بیشتر به سه دسته پیکو، میکرو و مینی طبقه‌بندی می‌شوند که می‌توانند به ترتیب تا ۵ کیلووات، ۱۰۰ کیلووات و ۱ مگاوات برق تولید کنند. جدول زیر ظرفیت نیروگاه‌های آبی کوچک در کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.

طبقه بندی نیروگاه های برق آبی برحسب ظرفیت

Category of Hydro	Power Range	No. of Homes Powered
Large	100 MW+	100,000+
Medium	10 MW – 100 MW	10,000 – 100,000
Small	1 MW – 10 MW	1,000 – 10,000
Mini	100 kW – 1 MW	100 – 1,000
Micro	5 kW – 100 kW	5 – 100
Pico	0 kW – 5 kW	0 – 5

ظرفیت نیروگاه‌های آبی کوچک در کشورهای مختلف

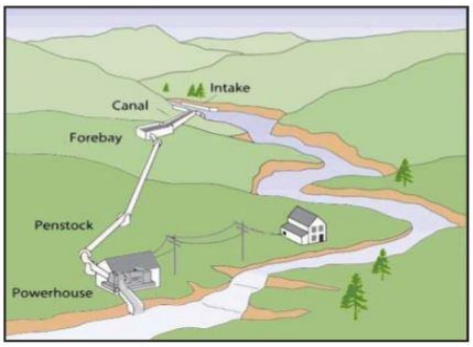
Country	Capacity
China	25 MW
India	15 MW
Sweden	1.5 MW
Canada	20 and 25 MW
United States	30 MW

[142] Large Hydropower Plants
[143] Small hydropower plants
[144] Run-Of-The-Stream
[145] Run-Of-River
[146] Decentralized Power

❖ طبقه‌بندی بر اساس نوع تأسیسات

• جریان رودخانه[۱۴۷]

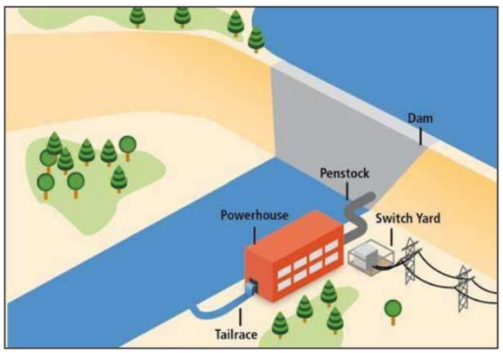
این نیروگاه‌ها با کمک جریان آب جاری یا از طریق سقوط آن، جریان برق تولید می‌کنند. این نوع نیروگاه برای رودخانه‌هایی که در طول سال با هر سرعتی جریان دارند، مناسب است. به‌منظور بالا بردن قدرت توربین، آب به‌طور مداوم به داخل لوله‌ها هدایت می‌شود و سپس به جریان برمی‌گردد.



اجزای نیروگاه برق‌آبی جریان رودخانه

• نیروگاه آبی با ذخیره (مخزن)[۱۴۸]

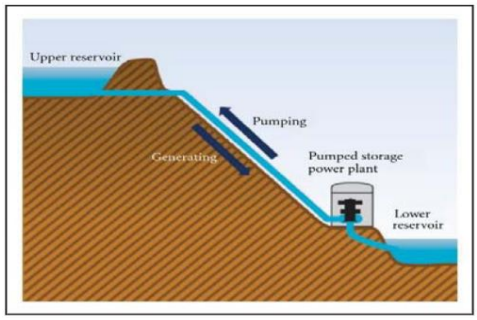
نیروگاه آبی با ذخیره‌سازی، عموماً با آب ذخیره‌شده در پشت سدی که جریان در آن قطع شده است، ساخته می‌شود. در این استراتژی، برق تولیدشده نسبت به نیروگاه‌های RoR ثابت و پایدارتر است. در اینجا ایستگاه‌های ژنراتور در کنار پنجه سد[۱۴۹] قرار می‌گیرند که با ذخیره‌سازی از طریق خطوط لوله مرتبط هستند. این نیروگاه‌های آبی می‌توانند اثرات کلیدی زیست‌محیطی و اجتماعی را به دلیل آب‌گرفتگی زمین مورداستفاده برای ذخیره‌سازی در پی داشته باشند.



اجزای نیروگاه برق‌آبی با مخزن ذخیره

• نیروگاه برق‌آبی تلمبه ذخیره‌ای[۱۵۰]

PSHP منبع انرژی نیست، بلکه صرفاً منابع ذخیره‌سازی هستند. در ساعات اوج بار، آب از مخزن پایینی به مخزن بالایی پمپ می‌شود. علیرغم مشکلات چرخه پمپاژ، این نوع نیروگاه به‌عنوان یک خریدار خالص انرژی شناخته می‌شود، که دامنه وسیعی از چارچوب بازپرداخت مجدد انرژی را فراهم می‌سازد. تلمبه–ذخیره‌ای بزرگ‌ترین نوع ذخیره انرژی چارچوب در حال حاضر است که به‌سرعت در سراسر جهان قابل‌دسترسی است.

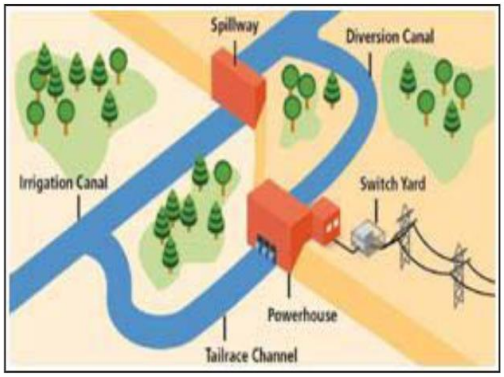


اجزای نیروگاه برق‌آبی تلمبه‌ای ذخیره‌ای

[147] Run-of-River (RoR)
[148] Hydropower Plant with Storage (Reservoir)
[149] Dam-Toe
[150] Pump Storage Hydropower Plant (PSHP)

- **طرح برق‌آبی درون جریان[۱۵۱]**

ظرفیت‌های انرژی آبی درون جریانی مشابه ظرفیت RoR است. بااین‌حال توربین در این نیروگاه معمولاً در داخل سد در بستر رودخانه کار می‌کند. به‌طورمعمول، جریان دوباره هدایت نمی‌شود. برای ارتقاء سرریزها، سیلاب‌ها، کانال‌ها یا سقوط‌های موجود، می‌توان توربین‌های هیدروکینتیک[۱۵۲] یا توربین‌های کوچک را به کار گرفت. در آبراه‌های نزدیک به اقیانوس، پیشروی‌ها ممکن است باعث ایجاد جریان دوجهته غیرمعمول نیروگاه برق‌آبی درون جریان شود.

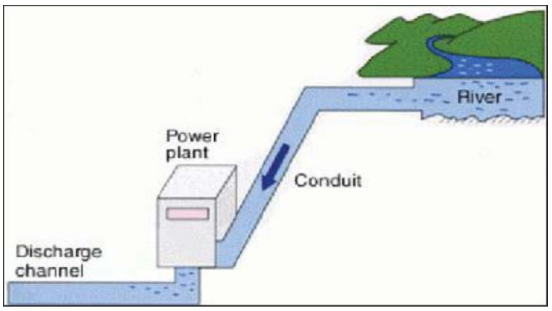


اجزای نیروگاه برق‌آبی درون جریان

❖ نیروگاه‌های برق‌آبی مدرن

- **نیروگاه‌های آبی زیرزمینی[۱۵۳]**

این نیروگاه‌های آبی، نیروگاه‌های کم ارتفاع[۱۵۴] هستند که در زیر سطح بالایی آب ساخته‌شده‌اند. این نوع تأسیسات شامل یک سرریز[۱۵۵] در عرض رودخانه است و نیروگاه‌ها در داخل سرریز مستقر می‌شوند.

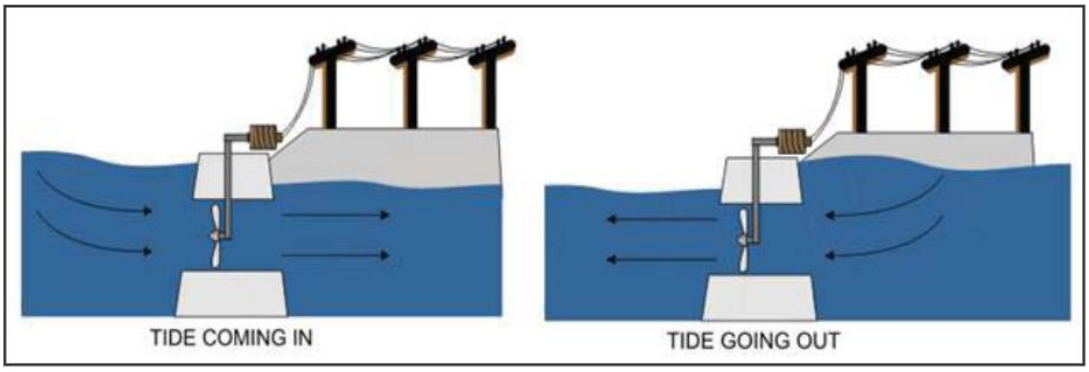


اجزای نیروگاه برق‌آبی زیرزمینی مدرن

- **نیروگاه‌های جزر و مد[۱۵۶]**

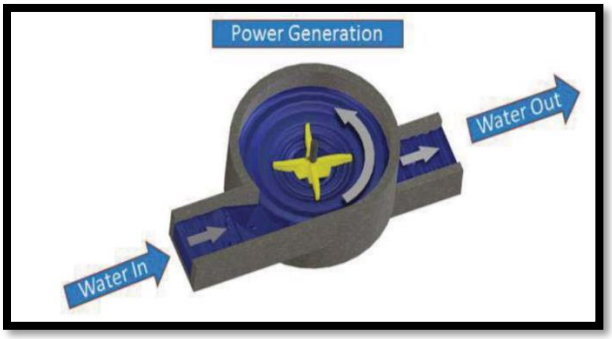
انرژی در این نیروگاه‌ها با تغییر قدرت از جزر و مد به کلاس‌های ارزشمند نیرو تولید می‌شود. در میان منابع تجدیدپذیر، انرژی جزر و مدی با هزینه قابل‌توجه و محدودیت دسترسی به جریان‌های با سرعت کافی مواجه است که بر این اساس سهولت بهره‌گیری از آن را محدود می‌کند. بااین‌وجود، تعداد زیادی از رویدادها و به‌روزرسانی‌های نوآورانه جدید، در طراحی و توربین نشان می‌دهد که دسترسی به انرژی جزر و مدی ممکن است بسیار بیشتر از حد انتظار باشد و هزینه‌های مالی و زیست‌محیطی می‌تواند تا سطوح جدی کاهش یابد.

[151] In-stream Hydropower Scheme
[152] Hydrokinetic Turbines
[153] Underground Hydropower Plant
[154] Low Head Plants
[155] Weir
[156] Tidal Power Plants



اجزای نیروگاه برق‌آبی جزر و مدی

- **انرژی گرداب گرانشی[۱۵۷]**



انرژی گرداب گرانشی

نیروگاه برق‌آبی گرداب گرانشی، با بهره‌گیری از جریان رودخانه و همچنین گرداب گرانشی، توربین را می‌چرخاند و انرژی تولید می‌کند. توربین‌های گرداب گرانشی در آب در ارتفاع پایینی در حدود ۰.۷–۲ متر کار می‌کنند و همچنین دارای بازدهی قابل‌مقایسه با توربین‌های هیدروالکتریک سنتی هستند. به همین ترتیب، تأثیر طبیعی مثبتی بر رودخانه دارد زیرا توربین هنگام عبور آب آن را هوادهی می‌کند.

❖ طبقه‌بندی توربین‌ها

توربین‌ها را می‌توان بر اساس اصل عملکرد آن‌ها طبقه‌بندی نمود.

- توربین ایمپالس[۱۵۸]، که توسط یک جریان آب با سرعت بالا هدایت می‌شود.
- توربین واکنشی[۱۵۹]، با پره‌های دوار خمیده [۱۶۰]و چیده شده[۱۶۱] به‌گونه‌ای که از کاهش مداوم فشار جریان از ورودی به خروجی، گشتاور تولید کند.
- توربین گرانشی[۱۶۲] اساساً توسط سنگینی آبی که وارد بالاترین نقطه توربین می‌شود و به سمت پایه سقوط می‌کند، هدایت می‌شود.

[157] Gravitational Vortex Energy
[158] Impulse Turbine
[159] Reaction Turbine
[160] Rotating Blades Curved
[161] Arranged
[162] Gravity Turbine

❖ آینده انرژی آبی

مدرن‌سازی زیرساخت‌های برق‌آبی موجود می‌تواند کارایی را افزایش داده و برخی از خسارات ناشی از خشک‌سالی را جبران نماید. همچنین از کارکرد نیروگاه‌ها برای چندین دهه آینده نیز اطمینان حاصل می‌شود. از هم‌اکنون تا سال ۲۰۳۰، ۱۲۷ میلیارد دلار برای نوسازی نیروگاه‌های قدیمی در سطح جهان هزینه خواهد شد. این میزان، تقریباً یک‌چهارم کل سرمایه‌گذاری جهانی انرژی آبی و نزدیک به ۹۰ درصد سرمایه‌گذاری در اروپا و آمریکای شمالی را تشکیل می‌دهد. مفهوم نوسازی در هر نیروگاه با توجه تجهیزات و سن آن معنای متفاوتی دارد. در اکثر نقاط جهان، اکثر سرمایه‌گذاری‌ها به سمت نیروگاه‌های جدید می‌رود. انتظار می‌رود پروژه‌های بزرگ دولتی در آسیا و آفریقا بیش از ۷۵ درصد از ظرفیت جدید نیروگاه‌های آبی را تا سال ۲۰۳۰ تشکیل دهند. اما برخی نگران تأثیر چنین پروژه‌هایی بر محیط‌زیست هستند. انتظار می‌رود که انرژی آبی رودخانه‌ای حدود ۱۳ درصد از کل ظرفیت افزوده‌شده در این دهه را تشکیل دهد، درحالی‌که برق‌آبی سنتی ۵۶ درصد و آب پمپاژ شده ۲۹ درصد خواهد بود. اما به طور کلی، رشد نیروگاه‌های آبی در حال کاهش است و قرار است تا سال ۲۰۳۰ حدود ۲۳ درصد کاهش یابد. معکوس کردن این روند تا حد زیادی به ساده کردن فرآیندهای نظارتی و اعطای مجوز، و تنظیم استانداردهای پایداری بالا و برنامه‌های اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای برای اطمینان از پذیرش جامعه بستگی دارد.

منبع:

- www.cnbc.com - Why hydropower is the forgotten giant of clean energy - JUN 2 2022
- energyeducation.ca – Waterwheel
- R. K. Karre, K. Srinivas, K. Mannan, B. Prashanth and C. R. Prasad, "A review on hydro power plants and turbines," 2022.
- enelgreenpower.com - All the benefits of hydropower

تحولات راهبردی

پتانسیل فتوولتائیک خورشیدی برای تقویت نیروگاه‌های آبی

افزودن پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی شناور به نیروگاه‌های برق‌آبی می‌تواند بازده تولید برق را به حداکثر برساند. رشد تأسیسات فتوولتائیک خورشیدی شناور[۱۶۳] در سراسر جهان باعث توسعه سیستم‌های تجدیدپذیر هیبریدی شده است که پنل‌های خورشیدی را با نیروگاه‌های برق‌آبی بر روی مخازن[۱۶۴] ترکیب می‌کند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر(ایرنا)[۱۶۵]، تولید برق‌آبی بزرگ‌ترین ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر جهان را داراست. برق‌آبی ۱.۳ تراوات از مجموع ۲.۸ تراوات تولید برق تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۰ را به خود اختصاص داده است. انتظار می‌رود ظرفیت آبی در سال‌های آینده رشد بیشتری نیز داشته باشد. علاوه بر این، حدود یک‌سوم ظرفیت برق‌آبی از طریق نیروگاه‌های جریان رودخانه[۱۶۶] تولید می‌شود و مابقی مبتنی بر مخزن[۱۶۷] است و همین بخش زمینه را برای حجم زیادی از تأسیسات خورشیدی فراهم می‌آورد. مساحت سطح مخازن نیروگاه‌های آبی در سراسر جهان این پتانسیل را دارد که میزبان بیش از ۴.۴ گیگاوات پانل‌های فتوولتائیک خورشیدی شناور با پوشش سطح ۲ درصد باشد که حدود ۶۲۷۰ تراوات ساعت برق تولید می‌کند. این امر برای کشورهای کوچک با دسترسی محدود به زمین برای تأسیسات خورشیدی در مقیاس کاربردی، مانند سنگاپور، راه‌کار کلیدی است. مخازن برق‌آبی مزیت مهمی را برای پروژه‌های خورشیدی به ارمغان می‌آورند؛ زیرا دسترسی به شبکه برق و همچنین زیرساخت‌های محلی مانند جاده‌ها، از پیش تأمین شده است.

[163] Floating Solar Photovoltaic (FPV)
[164] Reservoirs
[165] International Renewable Energy Agency (IRENA)
[166] Run-Of-River
[167] Reservoir-Based

نصب فتوولتائیک خورشیدی در نیروگاه‌های مبتنی بر مخزن، انعطاف‌پذیری هر دو شکل تولید انرژی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد. با ایجاد یک «باتری مجازی[۱۶۸]»، شبکه از طریق برق خورشیدی در ساعات اوج نور روز، و برق‌آبی در زمان تابش کم خورشید و در طول شب، تأمین انرژی می‌شود. انرژی خورشیدی معمولاً در طول فصل خشک افزایش می‌یابد؛ در همین زمان، سطح مخازن پایین‌تر است.

در برخی از کشورهای متکی به انرژی آبی، تغییرات آب و هوایی شاهد افزایش شرایط خشک‌سالی است. این امر، تولید برق‌آبی را کاهش و تهدید خاموشی را افزایش داده است. پنل‌های خورشیدی شناور با پوشاندن سطح یک مخزن، تبخیر آب را کاهش می‌دهند. این راهکار، منجر به افزایش دسترسی به آب تا حدود ۶.۳ درصد و افزایش تولید برق‌آبی تا بیش از ۱۴۰ تراوات ساعت می‌گردد. درعین‌حال، قرار دادن پنل‌های فتوولتائیک روی آب، اثر خنک‌کنندگی در پی دارد که باعث افزایش راندمان پنل‌ها می‌شود. کشورهای سراسر جهان در حال اتخاذ سیاست‌هایی برای حمایت از استقرار سیستم‌های هیبریدی خورشیدی نیروگاه‌های آبی[۱۶۹] برای افزایش بازده تجدیدپذیر و پاسخگویی به تقاضای فزاینده برق هستند. همچنین از این طریق، وابستگی خود را به انرژی آبی به‌تنهایی کاهش می‌دهند.

❖ خورشیدی شناور در آسیا

خورشیدی شناور به‌سرعت در سراسر آسیا در حال رشد است؛ چرا که فتوولتائیک می‌تواند سطوح پایین مخزن را در طول فصل خشک زمستان و انرژی آبی می‌تواند خروجی خورشیدی پایین را در طول فصل باران‌های موسمی جبران نماید. بزرگ‌ترین سیستم هیبریدی نصب‌شده جهان در چین است.

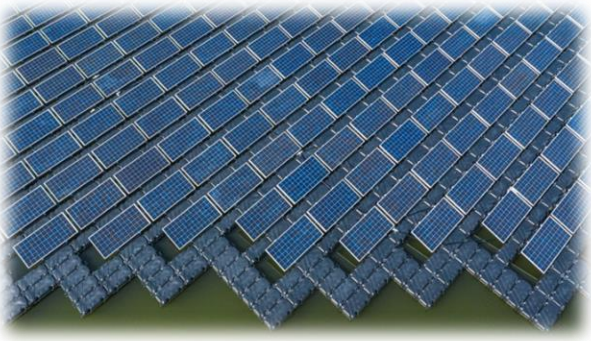
این سیستم ۳۲۰ مگاوات بر روی مخازن چنگه[۱۷۰] و ژوکسیانگ[۱۷۱] در استان ژجیانگ[۱۷۲] ساخته و در سال ۲۰۲۰ تکمیل شد. آسیای جنوب شرقی در سال ۲۰۲۳ پیشرفت‌های زیادی در توسعه پروژه‌های فتوولتائیک شناور داشته است. خورشیدی شناور یک گزینه مقرون‌به‌صرفه است که توسعه‌دهندگان را قادر می‌سازد تا فرآیندهای پیچیده تصاحب زمین و صدور مجوز را تغییر دهد و زمین را برای کشاورزی در دسترس بگذارند و درعین‌حال زمان‌بندی پروژه را تسریع نمایند.

[168] Virtual Battery
[169] Hybrid Hydropower Solar Systems
[170] Changhe
[171] Zhouxiang
[172] Zhejiang

سنگاپور، مالزی، تایلند و ویتنام، و همچنین فیلیپین و اندونزی در حال برنامه‌ریزی و نصب سیستم‌های فتوولتائیک شناور بر روی سدها و مخازن برق‌آبی هستند. یک مطالعه توسط موسسه اقتصاد انرژی و تحلیل مالی[۱۷۳] در سال گذشته تخمین زد که پتانسیل نصب حداقل ۲۴ گیگاوات فتوولتائیک شناور در سراسر منطقه ASEAN[174] وجود دارد.

❖ سیراتا[۱۷۵]، بزرگ‌ترین نیروگاه خورشیدی برق‌آبی جنوب شرق آسیا

سیراتا، بزرگ‌ترین نیروگاه خورشیدی برق‌آبی جنوب شرق آسیا، در جاوه اندونزی در سال ۲۰۲۳ افتتاح شد. این نیروگاه، سومین نیروگاه بزرگ خورشیدی شناور جهان است. سیستم فتوولتائیک شناور سیراتا از ۳۴۰۰۰۰ پنل فتوولتائیک تشکیل شده است و ۱۹۲ مگاوات برق پاک تولید می‌نماید. این نیروگاه خورشیدی می‌تواند انرژی کافی برای تأمین سالانه ۵۰۰۰۰ خانوار اندونزیایی تولید کند. این نیروگاه خورشیدی شناور با سرمایه‌گذاری ۱۰۰ میلیون دلاری، بر روی یک مخزن ۲۰۰ هکتاری با ظرفیت ۱ گیگاوات برق‌آبی ساخته شده است. سیراتا، توسط نوسانتارا پارو[۱۷۶] و توسعه‌دهنده انرژی‌های تجدیدپذیر مصدر[۱۷۷]، مستقر در امارات متحده عربی، توسعه‌یافته است. این پروژه از مؤسسات مالی بین‌المللی ازجمله شرکت بانکی سومیتومو میتسویی[۱۷۸]، سوسیته جنرال[۱۷۹] و استاندارد چارترد[۱۸۰] تامین مالی شده است. در سپتامبر ۲۰۲۳، مصدر و نوسانتارا پارو توافق کردند که فاز دوم پروژه را تا ۵۰۰ مگاوات توسعه دهند. این کشور قصد دارد تا سال ۲۰۶۰ به انتشار خالص صفر برسد.



نیروگاه خورشیدی شناور سیراتا

منابع:

- ratedpower.com - The potential for solar PV to enhance hydropower plants – May 9 2023
- power-technology.com - Cirata, SE Asia’s largest floating solar plant, opens in Indonesia - November 9 2023

[173] Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA)
[174] Association of Southeast Asian Nations (ASEAN)
آسیای جنوب شرقی از یازده کشور با تنوع چشمگیر مذهبی، فرهنگ و تاریخ تشکیل شده است: برونئی، برمه (میانمار)، کامبوج، تیمور–لست، اندونزی، .لائوس، مالزی، فیلیپین، سنگاپور، تایلند و ویتنام.
[175] Cirata
[176] PLN Nusantara Power
[177] Masdar
[178] Sumitomo Mitsui Banking Corporation
[179] Société Générale
[180] Standard Chartered

تحولات راهبردی

چین و هند و بزرگ‌ترین بحران انرژی آبی آسیا

نیروگاه برق‌آبی بایتان[۱۸۱] استان سیچوان، چین

داده‌ها نشان می‌دهد که تولید برق‌آبی در آسیا با سریع‌ترین نرخ در دهه‌های اخیر، در پی کاهش شدید در چین و هند، سقوط کرده است. این دو کشور حدود سه‌چهارم از تولید برق آسیا و بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای آن را دارند و برای جبران کمبود برق‌آبی و پاسخگویی به افزایش تقاضای برق، کمتر از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کنند. اقتصادهای بزرگ آسیایی در سال‌های اخیر به دلیل شرایط بحرانی آب‌وهوا، ازجمله گرمای شدید و بارندگی کمتر در بخش‌های وسیعی از شمال چین و ویتنام، و همچنین در شرق و شمال هند، با کمبود برق مواجهند. استفاده بیشتر از سوخت‌های آلاینده مانند زغال‌سنگ برای پاسخگویی به افزایش تقاضای برق و کمبود عرضه، چالش‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای را نمایان می‌کند. داده‌های اندیشکده انرژی امبر[۱۸۲] نشان داد که تولید انرژی آبی آسیا در طول هفت ماه منتهی به جولای۲۰۲۳، ۱۷.۹ درصد کاهش یافته است، درحالی‌که انرژی سوخت فسیلی ۴.۵ درصد افزایش یافته است. کارلوس تورس دیاز[۱۸۳]، مدیر بازار برق و گاز ریستاد انرژی[۱۸۴] می‌گوید: "علیرغم رشد شدید تولید برق خورشیدی و بادی در آسیا، عرضه از نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی نیز در سال جاری افزایش یافته است که در نتیجه‌ی کاهش شدید تولید برق آبی است. موج گرمای شدید و طولانی در سراسر منطقه منجر به کاهش سطح مخازن و نیاز به منابع جایگزین انرژی برای کمک به تامین تقاضا شده است."

[181] Baihetan
[182] Energy think tank Ember
[183] Carlos Torres Diaz
[184] Rystad Energy's director of power and gas markets

تجزیه‌وتحلیل داده‌های اداره ملی آمار[۱۸۵] نشان داد تولید برق آبی چین طی هشت ماه منتهی به آگوست ۲۰۲۳ با شدیدترین نرخ کاهش از سال ۱۹۸۹، ۱۵.۹ درصد کاهش یافته است. چین کمبود برق‌آبی و تقاضای بیشتر برق را عمدتاً با افزایش تولید برق از سوخت‌های فسیلی به میزان ۶.۱ درصد در هشت ماه منتهی به آگوست جبران کرد. هند نیز تولید برق با سوخت فسیلی را ۱۲.۴ درصد افزایش داد. در هند، تولید برق آبی در هشت ماه منتهی به آگوست۲۰۲۳، ۶.۲ درصد کاهش یافت که شدیدترین کاهش از سال ۲۰۱۶ بود.

داده‌های امبر و آژانس بین‌المللی انرژی[۱۸۶] نشان می‌دهند که تولید انرژی برق‌آبی در دیگر اقتصادهای آسیایی ازجمله هند و ویتنام، و همچنین فیلیپین و مالزی کاهش یافته است که عمدتاً به دلیل آب‌وهوای خشک‌تر است. در ویتنام، سهم نیروگاه‌های برق‌آبی از تولید برق تا ماه جولای ۲۰۲۳، بیش از ۱۰ درصد کاهش یافت، درحالی‌که سهم زغال‌سنگ تقریباً به همان میزان افزایش یافت. در برخی موارد، کاهش تولید برق آبی نتیجه تلاش‌ها برای حفظ آب و تغییر الگوهای عرضه بود. لوری میلیویرتا[۱۸۷]، تحلیلگر ارشد در مرکز تحقیقات انرژی و هوای پاک[۱۸۸]، گفت که مقامات چینی اپراتورهای سد را تحت‌فشار قراردادند تا سطح آب را حفظ کنند زیرا مصرف برق به دلیل موج گرما افزایش یافته است. در حقیقت مسئولین بیشتر در راستای متعادل کردن شبکه، به‌جای به حداکثر رساندن تولید، تلاش کردند.

البته داده‌های امبر نشان می‌دهد که تولید برق آسیایی از باد و خورشید در هفت ماه منتهی به جولای۲۰۲۳، ۲۱ درصد افزایش یافته است و از ۱۱.۵ درصد در سال گذشته به ۱۳.۵ درصد از کل تولید رسیده است. هند علیرغم تقاضای بی‌سابقه، عمدتاً به دلیل افزایش انرژی‌های تجدیدپذیر طی سال‌های گذشته، در سال ۲۰۲۳ قطع برق روزانه را تقریباً به صفر رسانده است. بااین‌حال، هند مجبور شد به دنبال واردات گاز طبیعی گران‌تر در تلاش برای کاهش فشار بر ناوگان نیروی زغال‌سنگ خود باشد. ویکتور وانیا[۱۸۹]، مدیر شرکت تجزیه‌وتحلیل انرژی EMA Solutions می‌گوید: «کاربرد اصلی آب، پشتیبانی از باد و خورشید است. اگر خود منبع انرژی آب غیرقابل‌اعتماد شود، هند ممکن است به فکر جایگزینی ازجمله افزودن انرژی بیشتر با سوخت زغال‌سنگ باشد.»

منبع:

- reuters.com - China, India lead Asia's biggest hydropower crunch in decades – 22 September 2023

185 National Bureau of Statistics
186 International Energy Agency
187 Lauri Myllyvirta
188 Centre for Research on Clean Energy and Air
189 Victor Vanya

تحولات فناورانه

سیستم تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره‌ساز انرژی چندمنظوره و مقرون‌به‌صرفه

عکس طرح Hohenwarte II در آلمان. Vattenfall/Flickr

جهان تا سال ۲۰۵۰ به سمت انتشار کربن صفر حرکت خواهد کرد و این امر، گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر را تسریع می‌کند. با افزایش تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر، برای حل مساله متناوب بودن انرژی خورشیدی و بادی جهان به‌شدت به نوآوری در فناوری ذخیره انرژی متکی است. پتانسیل بزرگی در ذخیره‌سازی انرژی آبی نیروگاههای تلمبه ذخیرای[۱۹۰] (PHES) برای حمایت از تلاش‌های جهانی در راستای گسترش تولید انرژی تجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نهفته است. طبق گزارش انجمن بین‌المللی انرژی آبی[۱۹۱] ، PHES بیش از ۹۴ درصد از ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی جهانی نصب‌شده را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان یک «باتری آب[۱۹۲]» غول‌پیکر عمل می‌کند که از آب و گرانش برای ذخیره و آزادسازی انرژی استفاده می‌کند. برخلاف انرژی آبی معمولی، این روش شامل یک مخزن دوم در زیر نیروگاه است تا آب بارها و بارها استفاده شود. به بیان بهتر، PHES نوعی ذخیره‌سازی برق آبی با دو مخزن (بالا و پایین) است که در ارتفاعات مختلف قرار دارند. هنگامی‌که تقاضای برق کم است (در زمان‌های خارج از پیک)، آب از مخزن پایینی به مخزن بالایی پمپ می‌شود و از طریق یک موتورپمپ (فرایند شارژ مجدد) برق را از شبکه مصرف می‌کند. در زمان اوج تقاضا، آب از مخزن بالایی به مخزن پایینی رها می‌شود و از طریق توربین ژنراتور (فرایند تخلیه) برق تولید می‌کند. این روند در هر چرخه تکرار می‌گردد. در ادامه برخی از مشخصات فنی یک نمونه PHES آورده شده است:

[190] Pumped Hydro Energy Storage
[191] International Hydropower Association(IHA)
[192] Water battery

مشخصات فنی یک نمونه PHES

Maximum power rating (MW)	3000
Discharge time (total time taken to release the maximum power of an energy storage device)	4 – 16 hours
Maximum cycles/lifetime	>15,000 cycles / 30 – 60 years
Round-trip Efficiency (ratio of electrical output to electrical input)	70–85 %
Specific Energy (Wh/kg) (ratio of energy stored to volume of storage device)	30 – 250

❖ مزایای PHSE

PHES مزایای منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهد. مزیت اصلی PHES توانایی ذخیره مقادیر زیادی انرژی در زمان وجود باد و آفتاب و سپس استفاده از توربین‌ها برای تولید سریع برق در زمان اوج تقاضا است. PHES می‌تواند انرژی را در مقیاس موردنیاز ذخیره کند و شکاف‌ها را در زمانی که انرژی‌های تجدیدپذیر دارای خروجی متغیر هستند برطرف سازد و سیستم‌های انرژی را قادر می‌سازد تا به طور مداوم شهرها را تامین کنند.

با طول عمر بیش از ۴۰ سال و بازده ۷۰ تا ۸۰ درصد، PHES قادر به ارائه خدمات متعدد به شبکه برق است. این امر می‌تواند از انحرافات[۱۹۳] فرکانس و ولتاژ در شبکه پشتیبانی نماید. هم‌چنین می‌تواند با عدم تطابق فصلی در سیستم انرژی تجدیدپذیر در درازمدت، به دلیل قابلیت ذخیره‌سازی حجیم، مقابله کند. علاوه بر این، PHES می‌تواند ذخیره‌سازی متمرکز با مدت‌زمان تخلیه طولانی‌تر (در مقایسه با سایر ESS) فراهم نماید، که همین مزایا آن را به اولین انتخاب برای استقرار در مقیاس بزرگ در پروژه‌های هم‌مکانی تولید[۱۹۴]سیستم انرژی تجدیدپذیر تبدیل می‌کند.

PHES مزیت هزینه‌ای نیز دارد. هزینه سرمایه در هر کیلووات ساعت برای هر ESS متناسب با رتبه‌بندی چگالی انرژی آن‌ها (نسبت کوانتومی انرژی ذخیره‌شده به حجم دستگاه ذخیره‌سازی) است. در مقایسه با ESS دیگر، PHES چگالی انرژی پایینی دارد، به همین دلیل هزینه سرمایه در کیلووات ساعت آن نیز کمتر است (بین ۵ تا ۱۰۰ دلار در کیلووات ساعت). این مزیت، همراه با طول عمر چشم‌گیر، PHES را از نظر اقتصادی نیز انتخاب خوبی نشان می‌دهد.

❖ چالش‌ها و تصورات غلط در حوزه PHSE

برای کسب‌وکارها، تصور غالب این است که پروژه‌های PHES پرخطر هستند و کسب تأییدیه‌های لازم بسیار زمان‌بر است. متأسفانه، تصورات غلط عمومی در ارتباط با موانع بزرگ مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای[۱۹۵]، تداخل با جریان رودخانه‌ها و

[193] Deviations
[194] Co-located RE-generation projects
[195] GreenHouse Gas(GHG)

آبزیان، انحصار بر منابع آب و جابجایی وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، تصور می‌شود که PHES نیاز به آب زیادی دارد. برعکس، این فناوری امکان بازیافت آب را فراهم می‌سازد، برخلاف نمونه معمولی آن‌که مستلزم دوباره پر کردن مداوم است. تصورات نادرست می‌تواند مزایا و پتانسیل‌های گسترده PHES برای سیستم‌های انرژی را پنهان کند. خوشبختانه، فرآیندهای غربالگری در بررسی‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی، اعتماد مشتریان را برای سرمایه‌گذاری و تعهد به توسعه پروژه القا می‌کند.

PHES به طور خاص برای ذخیره‌سازی برق متمرکز[۱۹۶]، ذخیره‌سازی فصلی[۱۹۷]، کاهش تراکم انتقال در شبکه[۱۹۸] و تعویق ارتقاء[۱۹۹] استفاده می‌شود. چالش‌های برجسته‌ای که PHES با آن مواجه است شامل تأخیر در پاک‌سازی محیطی برای توسعه‌های جدید است. از دیگر چالش‌ها می‌توان به نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و زمین و زمان قابل‌توجه برای راه‌اندازی نیروگاه‌ها و هم‌چنین وابستگی زیاد به توپوگرافی اشاره کرد. علاوه بر این، PHES به دلیل مکانیسم قیمت‌گذاری موجود، با مشکل بازیابی کم مواجه است، که خدمات زیادی را که به شبکه ارائه می‌کند، مانند هموارسازی تولید [۲۰۰]سیستم انرژی تجدیدپذیر، کنترل بار اوج[۲۰۱] و خدمات جانبی در نظر نمی‌گیرد.

❖ چشم‌انداز هند در استفاده از PHSE

هند اهداف بلندپروازانه انرژی تجدیدپذیر را برای خود تعیین کرده است. این برنامه شامل ۱۷۵ گیگاوات تا سال ۲۰۲۲ و ۴۵۰ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰می‌باشد. این امر نقش مهمی را به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس شبکه اختصاص می‌دهد تا ادغام نرم سیستم انرژی تجدیدپذیر در شبکه را برای اطمینان از پایداری و تامین برق شبانه‌روزی برای مصرف‌کنندگان پایین‌دستی فراهم کند. از این میان، ذخیره‌سازی انرژی هیدرولیکی به‌عنوان یکی از بالغ‌ترین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی متمرکز و بزرگ‌مقیاس در سطح جهان شناخته می‌شود. در هند، کل ظرفیت PHES توسعه‌یافته تا به امروز ۴۷۸۵.۶ مگاوات است (۳۳۰۵.۶ مگاوات عملیاتی و ۱۴۸۰ مگاوات غیرعملیاتی)، درحالی‌که ۱۵۸۰ مگاوات دیگر در مرحله ساخت می‌باشد.

منابع:

- linkedin - GHD - Supercharge the energy transition with Pumped Hydro Energy Storage - August 16, 2023
- cstep.medium.com - PHES: A Multifunctional and Cost-Effective Energy Storage System - Jul 29, 2021

[196] Bulk power storage
[197] Seasonal storage
[198] Transmission-congestion relief in the grid
[199] Upgrade deferral
[200] RE smoothing
[201] Peak-load shaving

خبر خارجی

رکورد تأسیسات برق تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۳ در آلمان

داده‌ها نشان می‌دهند که تأسیسات انرژی خورشیدی و بادی آلمان در سال ۲۰۲۳ رکوردها را شکست، اما فقط انرژی فتوولتائیک خورشیدی به اهداف دولت رسید. انجمن صنعت خورشیدی آلمان[۲۰۲] با استناد به داده‌های آژانس شبکه فدرال اعلام کرد که بیش از یک‌میلیون سیستم جدید انرژی خورشیدی با خروجی ترکیبی ۱۴ گیگاوات، در سال گذشته در آلمان نصب شد که افزایش قابل‌توجه ۸۵ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۲ داشته است. افزایش ظرفیت فتوولتائیک که عمدتاً ناشی از رونق تقاضای خورشیدی در منازل مسکونی است، این صنعت را در مسیر دستیابی به اهداف دولت برای انرژی خورشیدی تا سال ۲۰۳۰ قرار داده است. انجمن صنعت خورشیدی آلمان اضافه کرد که انتظار دارد افزایش تقاضا تا سال ۲۰۲۴ ادامه یابد و بیش از ۱.۵ میلیون ملک مسکونی خصوصی در سال آینده سیستم‌های انرژی خورشیدی نصب کنند.

کارستن کورنیگ[۲۰۳]، مدیرعامل BSW گفت:«در سال ۲۰۲۴، برای عرصه خورشیدی انتظار یک رونق پایدار داریم. به‌عنوان صنعت خورشیدی، ما به کمک خود در حفاظت از آب‌وهوا و تحقق اهداف دولت برای فتوولتائیک ادامه خواهیم داد. اگر قرار است اهداف رشد محقق شود، می‌بایست بوروکراسی پیرامون تأسیسات انرژی‌های تجدیدپذیر بیش‌ازپیش، کاهش یابد. علاوه بر این، اقدامات بیشتری برای سرعت بخشیدن به این فرآیند به‌منظور ارتقاء سریع‌تر شبکه‌های برق و گرمایش، تغذیه آن‌ها با سهم خورشیدی بالاتر و در دسترس قرار دادن آن‌ها در هر زمان با کمک ظرفیت‌های ذخیره‌سازی بیشتر، موردنیاز است. »

[202] German Solar Industry Association (BSW)
[203] Carsten Körnig

در حال حاضر حدود ۳.۷ میلیون سیستم خورشیدی در آلمان نصب‌شده است. درمجموع، این موارد در سال گذشته حدود ۶۲۰۰۰ گیگاوات ساعت برق تولید کردند که ۱۲ درصد از کل مصرف این کشور است. نزدیک به نیمی از تولیدات خورشیدی تازه نصب‌شده کشور در سال ۲۰۲۳ از بخش خانگی بوده است که ۳۱ درصد آن از پارک‌های خورشیدی سطح زمین[۲۰۴] تامین می‌شود. رشد تأسیسات مسکونی از اوایل سال ۲۰۲۳ ادامه داشته است. بیش از نیمی از صاحبان املاک خصوصی در آلمان به فکر ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی خود تولید[۲۰۵] می‌شوند. همچنین تعداد سیستم‌های ذخیره انرژی خورشیدی در کشور طی چهار سال گذشته، پنج برابر شده است.

انجمن انرژی بادی[۲۰۶] این کشور اعلام کرد، باوجود رشد هدفمند ظرفیت خورشیدی، صنعت برق بادی آلمان همچنان از اهداف عقب‌مانده است. علیرغم اینکه مناقصه‌های اعطاشده در سال ۲۰۲۳ به بالاترین حد خود رسید. مبارزه با کندی صدور مجوز در آلمان و سراسر اتحادیه اروپا، همچنین افزایش هزینه‌ها و یارانه‌های ناکافی برای شرکت‌های بادی، مانع توسعه و تولید برق بادی شده است. بر اساس داده‌های شرکت گلوبال‌دیتا[۲۰۷]، در سال ۲۰۲۲ آلمان هشت برابر بیشتر از ظرفیت باد در حال ساخت، پروژه در مرحله صدور مجوز داشته است.

علیرغم همه رکوردها و ابتکارات خوب، آلمان هنوز در دستیابی به اهداف بسیار بلندپروازانه خود موفق نبوده است. بائربل هایدبروک[۲۰۸]، رئیس انجمن انرژی بادی این کشور در بیانیه‌ای، دلیل این اتفاق را مؤثر نبودن قوانین جدید و فقدان قوانین مهم دیگر، اعلام کرده است. در حال حاضر، آلمان هدفی تعیین کرده است که تا سال ۲۰۳۰، ۸۰ درصد از ترکیب انرژی خود را از انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، زیست‌توده و نیروی برق آبی) تامین نماید. این رقم در سال گذشته به ۵۲ درصد رسید.

منبع:

- power-technology.com - Germany sees record renewable power installations in 2023 – 3 January 2024

[204] ground-level solar parks
[205] self-generated
[206] wind power association(BWE)
[207] GlobalData
[208] Baerbel Heidebroek

خبر خارجی

خط لوله آب اپوکسی تقویت‌شده با شیشه برای پروژه تلمبه–ذخیره‌ای در هاتا دبی

اداره برق و آب دبی قرارداد ۱۰.۹ میلیون درهمی (۳ میلیون دلار آمریکا) با هدف تولید خط لوله آب اپوکسی تقویت‌شده با شیشه[۲۰۹] برای یک نیروگاه آبی تلمبه-ذخیره ای[۲۱۰]در حال ساخت در هاتا، امارات متحده عربی منعقد کرده است. نام شرکت دریافت‌کننده قرارداد افشا نشده است. طول این خط لوله ۵۶۲ متر و قطر آن ۱۵۰۰ میلی‌متر خواهد بود. این پروژه شامل ساخت محفظه شیر جت[۲۱۱] برای امتداد دریچه خروجی پایینی سد هاتا تا منطقه وادی است. مقرر است پس از تکمیل، این ایستگاه تلمبه-ذخیره ای ۲۵۰ مگاواتی، ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۵۰۰ مگاوات ساعت و طول عمر تا ۸۰ سال خواهد داشت. این پروژه قرار است در اوایل سال ۲۰۲۴ به بهره‌برداری برسد. برق تولیدشده توسط این پروژه به شبکه DEWA عرضه خواهد شد. برای ذخیره انرژی، برق پارک خورشیدی محمد بن راشد آل مکتوم[۲۱۲] برای پمپاژ آب از طریق این تونل از سد هاتا به سد بالایی استفاده خواهد شد. این نیروگاه دارای راندمان چرخشی[۲۱۳] ۷۸.۹ درصد خواهد بود و برای پاسخگویی به تقاضای انرژی در عرض ۹۰ ثانیه طراحی‌شده است. سعید محمد الطایر[۲۱۴]، مدیرعامل و مدیر اجرایی DEWA، گفت که این پروژه از طرح جامع توسعه هاتا و رفع نیازهای اجتماعی، اقتصادی، توسعه‌ای و زیست‌محیطی آن پشتیبانی می‌کند.

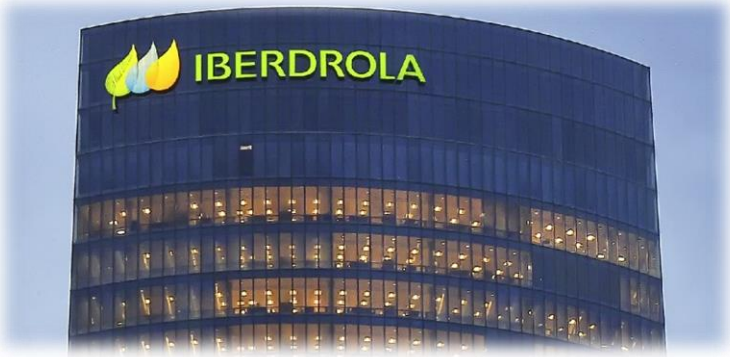
منبع:

- hydroreview.com - DEWA awards contract to construct pipeline for pumped storage project in Hatta - 3january2024

[209] glass-reinforced epoxy water pipeline
[210] pumped storage hydro plant
[211] jet valve chamber
[212] Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park
[213] turnaround efficiency
[214] HE Saeed Mohammed Al Tayer

خبر خارجی

نصب اولین هیبرید هیدروالکتریک و خورشیدی توسط ایبردرولای اسپانیا



ایبردرولا[۲۱۵] اسپانیا مجوز زیست‌محیطی را برای اولین نیروگاه هیبریدی در این کشور دریافت کرده است. این نیروگاه ترکیبی از فتوولتائیک با تأسیسات برق آبی خواهد بود. این پروژه که «هیدرو سدیلو»[۲۱۶] نام دارد در سدیلو اسپانیا واقع خواهد شد و دارای ظرفیت ۸۶.۴ مگاوات، با بیش از ۱۶۰۰۰۰ ماژول فتوولتائیک و ساختار ثابت خواهد بود.

نیروگاه‌های تولید هیبریدی از نقطه اتصال یکسانی به شبکه استفاده می‌کنند و از زیرساخت‌های مشترک مانند پست[۲۱۷] و خط تخلیه[۲۱۸] برای برق تولیدشده بهره می‌برند. علاوه بر این، راه‌های مشترک و امکاناتی را برای بهره‌برداری از هر دو فناوری فراهم می‌آورند. هم‌چنین، تأثیر زیست‌محیطی بسیار کمتری نسبت به دو نیروگاه مستقل دارند. با داشتن دو فناوری با قابلیت متناوب، وابستگی به شرایط و محدودیت‌های محیطی در حال تغییر (ناشی از کمبود احتمالی منابع مانند باد یا خورشید) به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به‌این‌ترتیب، تولید انرژی‌های تجدیدپذیر پایدارتر و کارآمدتر تسهیل می‌گردد. ایبردرولا می‌گوید که پروژه هیدرو سدیلو شامل مجموعه‌ای از اقدامات برای حفاظت از محیط‌زیست است که همگی در راستای ارتقای بهبود تنوع زیستی در محیط‌زیست می‌باشند.

[215] Iberdrola
[216] HIDRO Cedillo
[217] Substation
[218] Evacuation line

برای تسهیل در دسترس بودن آب در بخش‌های مختلف نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک، دو حوضچه[۲۱۹] یا نقطه آب اضافی ساخته خواهد شد. ساخت یک آبخوری دام و سیستم حوضچه‌های طبیعی برای حیات‌وحش اطراف نیز در نظر گرفته‌شده است. برنامه‌ریزی شده است که مناطق محرومی که از مسیرهای رودخانه، حوضچه‌ها، پوشش گیاهی منحصربه‌فرد، درختان و زیستگاه‌های موردعلاقه در اطراف حوضچه بزرگ در منطقه محافظت می‌کنند، علامت‌گذاری شود.

ایبردرولا در سپتامبر امسال اعلام کرده است که اولین نیروگاه هیبریدی بادی و خورشیدی را در بورگوس در اسپانیا با هدف بهبود منابع تجدیدپذیر و استفاده حداکثری از مکان‌های موجود ساخته است. هزینه این نیروگاه، بیش از ۴۰ میلیون یورو (۴۴.۲۱ میلیون دلار) تخمین زده شده است. این پروژه شامل یک نیروگاه خورشیدی ۷۴ مگاواتی است که در مجاورت مجتمع بادی ۶۹ مگاواتی بالستاها و کازتونا[۲۲۰] موجود است.

ایبردرولا دارای ۲۱۰۰۰ مگاوات ظرفیت تجدیدپذیر نصب شده در اسپانیا است و قصد دارد در چهار سال آینده بیش از ۷۶۰۰ مگاوات انرژی تجدیدپذیر دیگر در این کشور اجرا کند تا برقی‌سازی اقتصاد را تسریع بخشد و به کاهش وابستگی انرژی به کشورهای دیگر کمک کند. سدیلو با حدود ۵۲۰۰ مگاوات نصب شده، که ۴۱۰۰ مگاوات آن از جمله ایستگاه‌های برق آبی، خورشیدی و باتری است، به یکی از مناطق رشد ایبردرولا تبدیل شده است.

منبع:

- hydroreview.com - Iberdrola Spain obtains environmental permit for first hybrid hydroelectric and solar installation – 3 january 2024
- power-technology.com - Iberdrola gets environmental permit for hydro-solar plant in Spain - 27 December 2023

[219] ponds
[220] Ballestas and Casetona (BaCa)

خبر داخلی

افتتاح ۱۶۶۰ نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی در دهه فجر

همزمان با دهه فجر، ۱۶۶۰ نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی برای خانواده‌های تحت پوشش نهادهای حمایتی با میزان سرمایه‌گذاری بیش از ۲۲۰ میلیارد تومان با همکاری ساتبا و نهادهای حمایتی شامل بسیج سازندگی، کمیته امداد (ره) و بهزیستی در ۱۷ استان شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان، یزد، بوشهر، فارس، خراسان رضوی، لرستان، چهار محال و بختیاری، گلستان، قزوین، البرز، هرمزگان، گیلان اصفهان، ایلام و سمنان به بهره‌برداری می‌رسند.

ازجمله پروژه‌های آماده افتتاح دفتر سامانه‌های مقیاس کوچک سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) در دهه فجر امسال می‌توان به ساخت ۲۵۰ نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی تحت پوشش شرکت توزیع برق شمال کرمان با همکاری کمیته امداد امام (ره)، ۱۸۵ نیروگاه خورشیدی با همکاری کمیته امداد در استان زنجان، ۵۰ نیروگاه در شهرستان‌های میاندوآب، ارومیه، شاهین دژ و مهاباد در استان آذربایجان غربی و ۱۴۷ نیروگاه در استان یزد اشاره کرد.

همچنین در این ایام ۲۰۰ نیروگاه خورشیدی طرح حمایتی در شهرستان‌های بردسکن، بجستان، خلیل‌آباد، فیروزه و رشتخوار در استان خراسان رضوی با همکاری بسیج سازندگی، بهزیستی و کمیته امداد، ۱۰۰ نیروگاه در شهرستان‌های دهلران، سیروان و چرداول در استان ایلام، ۱۶۰ نیروگاه خورشیدی در استان لرستان و ۲۷۵ نیروگاه در استان هرمزگان افتتاح می‌شوند. از دیگر پروژه‌های آماده افتتاح دفتر سامانه‌های مقیاس کوچک ساتبا در دهه فجر امسال می‌توان به ۶۰ نیروگاه خورشیدی در استان اصفهان اشاره کرد؛ از این تعداد، ۲۰ سامانه خورشیدی به‌تازگی نصب و به شبکه سراسری متصل شده و ۴۰ سامانه تا ۲۲ بهمن وارد مدار می‌شوند. همچنین ۵۰ نیروگاه خورشیدی در شهرستان‌های سمنان، شاهرود، دامغان، مهدی شهر و گرمسار در استان سمنان آماده افتتاح هستند و ۲۰ نیروگاه در استان البرز و ۲۰ نیروگاه در استان گلستان در آستانه افتتاح در دهه فجر هستند.۳۰ نیروگاه خورشیدی طرح حمایتی برای خانواده‌های تحت پوشش در استان گیلان، ۱۰ نیروگاه در استان فارس و ۱۵ نیروگاه در استان قزوین نیز به‌زودی به بهره‌برداری می‌رسند.

منبع: ایرنا–۱۵ بهمن ۱۴۰۲

خبر داخلی

افزایش ۶۰ درصدی تولید سالانه بزرگ‌ترین نیروگاه برق آبی ایران

بزرگ‌ترین نیروگاه برق آبی ایران، سد کارون ۳، از افزایش ۶۰ درصدی تولید برق در سال آبی جاری که از سوم شهریورماه نسبت به مدت مشابه سال گذشته آغازشده، خبر داد. سید حمید صالحی، مدیرعامل شرکت مدیریت تولید و بهره‌برداری سد کارون ۳ روز یکشنبه از رونق تولید انرژی خبر داد. وی با اشاره به نیاز حیاتی به تامین انرژی پایدار در تابستان، بر عملکرد بهینه نیروگاه در سال آبی جاری تأکید کرد.

نیروگاه کارون ۳ با تولید بیش از ۳۴۰۰ گیگاوات برق در سال آبی جاری توانسته است بیشترین سهم را در تولید انرژی برق‌آبی کشور داشته باشد. صالحی خاطرنشان کرد: در تثبیت شبکه برق سراسری نقش مهم و مؤثری دارد. وی افزود: این میزان تولید نسبت به مدت مشابه سال آبی گذشته ۶۰ درصد افزایش و نسبت به میانگین ده سال گذشته ۵۰ درصد افزایش داشته است. وی ابراز امیدواری کرد که ترکیب افزایش بارندگی و مدیریت مؤثر مخزن، کارون ۳ را قادر سازد تا مأموریت خود را در تضمین مشارکت مطمئن و کارآمد در پایداری شبکه ملی انرژی حفظ کند.

منبع:

- irna.ir - Output at Iran’s largest hydroelectric power plant up 60% y/y – 22 OCTOBER 2023

خبر داخلی

تامین حدود ۲۸ درصد برق مصرفی ساتبا از انرژی خورشید

حدود ۲۸ درصد از برق مصرفی ساختمان سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) با مصرف سالیانه حدود ۲۹۰ مگاوات ساعت، از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تامین می‌شود که از میزان مورد تعهد بیشتر است. سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به‌عنوان متولی ترویج و گسترش نیروگاه‌های تجدیدپذیر در سطح کشور، اقدام به تامین بخشی از نیاز خود از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر کرده است.

بدین منظور ابتدا میزان مصرف الکتریکی هر دو ساختمان ساتبا، اندازه‌گیری و بر آن اساس تصمیم گرفته شد، سه سامانه خورشیدی به ظرفیت تجمعی ۴۶ کیلووات بر روی بام ساختمان‌های ساتبا نصب شود. درمجموع سه سامانه خورشیدی با ظرفیت‌های ۲۲، ۱۸ و ۶ کیلووات و حدود ۱۰۴ پنل خورشیدی نصب شده بر روی بام‌های دو ساختمان ساتبا نصب شده که مجموع تولید این سه سامانه سالانه حدود ۸۱ مگاوات ساعت است؛ این میزان تولید الکتریکی پاک، از انتشار حدود ۵۰ تن دی‌اکسید کربن در فضا جلوگیری می‌کند. این سامانه از نوع متصل به شبکه است و تولیدات آن‌ها به شبکه برق داخلی این ساختمان‌ها تزریق و بخشی از نیاز مصرف داخلی ساتبا از این طریق جبران می‌شود.

لازم به ذکر است، در راستای اجرای وظایف قانونی وزارت نیرو در زمینه توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک و با هدف اجرای ماده ۸ مصوبات شورای عالی انرژی کشور، کلیه دستگاه‌های اجرایی موضوع ماده (۵) قانون خدمات کشوری مکلف‌اند سالانه پنج درصد مصرف انرژی الکتریکی خود را تا رسیدن به سهم بیست درصد مصرف سال از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک تامین کنند. به‌منظور اجرایی شدن این مصوبه، رویه اجرایی تأمین حداقل بیست درصد برق مصرفی مشترکان مشمول از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک توسط مقام عالی وزارت ابلاغ‌شده است. مشترکان مشمول از ابتدای سال ۱۴۰۳، پنج

درصد از برق مصرفی خود را طریق انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، تامین و در طول مدت چهار سال تا بیست درصد (سالانه ۵ واحد درصد) افزایش دهند.

در مجموع بیش از ۳۵۰ ساختگاه برای ساخت نیروگاه‌های خورشیدی با ظرفیت بیش از ۱۰ هزار مگاوات با محوریت ۱۶ برق منطقه‌ای در سراسر کشور وجود دارد. به گفته آقای دکتر کمانی، معاون وزیر نیرو در مجموع با جلساتی که با هماهنگی وزارت نیرو، سازمان برنامه و شورای اقتصاد، پیوسته در حال برگزاری است، برای ساخت ۳۰ هزار مگاوات نیروگاه انرژی تجدیدپذیر طی ۵ سال برنامه‌ریزی شده است.

منبع:-dolat.ir ۰۹ بهمن ۱۴۰۲

برونداد تخصصی

انرژی‌های تجدیدپذیر

شماره ۸ – بهمن ۱۴۰۲