نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال یازدهم/ شماره سی و هفتم- ویژه نامه‌ی نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای/ بهار ۱۴۰۳

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
11th Year/ No. 37- Special Issue on Pumped Storage Power Plants/ June 2024

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، ساختار و عملکرد

مجتبی دادخواه تهرانی[۱]
علی مریدی *[۲]
محمد مظلومی موچانی[۳]
رضا خلیلی [۴]

چکیده

تنظیم تولید با مصرف انرژی از ابتدا، مدنظر بهره‌برداران شبکه‌ی تولید و توزیع برق بوده است. از بعد از جنگ جهانی دوم که به مرور انرژی هسته‌ای منبع تأمین مطمئن تولید برق در بسیاری از کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی شد، توسعه‌ی نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای برای تبدیل برق پایه هسته‌ای به برق پیک از طریق ذخیره‌سازی مدنظر قرار گرفت. در دهه‌ی ۱۹۹۰، به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی روزافزون و کاهش توسعه‌ی نیروگاه های هسته‌ای، شاهد کاهش توسعه‌ی نیروگاه‌های جدید PHS بودیم. پس از سال ۲۰۰۰ و با اهمیت پیدا کردن موضوع تغییر اقلیم و افزایش تقاضا، برای منابع انرژی تجدیدپذیر، چشم‌انداز تغییر کرد و علاقه‌ی جدیدی نسبت به PHS پدید آمد. قاره‌ی آسیا با محوریت کشورهای چین، ژاپن و هند با ظرفیت نصب شده‌ای، معادل ۱۳۸ هزار مگاوات، رهبری جهانی را در توسعه‌ی نیروگاه های PHS در اختیار دارد که شامل ۷۷ هزار مگاوات در دست ساخت و ۶۱ هزار مگاوات در حال عملیات است. عمده‌ی ظرفیت PHS کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی، مربوط به توسعه‌ی قبل از قرن ۲۱ است. به طوری که اروپا با ظرفیت کلی ۲۷.۸ هزار مگاوات در رتبه‌ی دوم قرار دارد که شامل ۲.۵ هزار مگاوات در دست ساخت و ۲۵.۳ هزار مگاوات در حال عملیات است. آمریکای شمالی با ظرفیت کلی ۱۴.۶ هزار مگاوات، شامل ۹۰۰ مگاوات در دست ساخت و ۱۳.۷ هزار مگاوات در حال عملیات است. در این مقاله، ضمن بررسی نقش حیاتی سیستم‌های PHS در یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، تأمین تقاضای اوج بار و افزایش پایداری شبکه، تجزیه و تحلیل از روندهای فعلی و در حال ظهور، چالش‌های فنی و اثرات زیست‌محیطی برای شناسایی مناطق بالقوه برای تحقیق و توسعه‌ی آینده، ارائه شده است. همچنین با ارائه‌ی دیدگاهی در مورد چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از سیستم‌های PHS ، پتانسیل کم‌نظیر آن‌ها برای کمک به آینده‌ی انرژی پایدار و قابل اعتماد را بررسی می‌کند.

واژه‌های کلیدی

سیستم ذخیره انرژی تلمبه ذخیره‌ای، انرژی تجدیدپذیر، پایداری شبکه

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
[۲] استادیار دانشکده عمران آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران. Email: a_moridi@sbu.ac.ir
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
[۴] دانشجو دکتری،دانشکده مهندسی عمران،آب و محیط زیست،دانشکده شهید بهشتی ،تهران

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

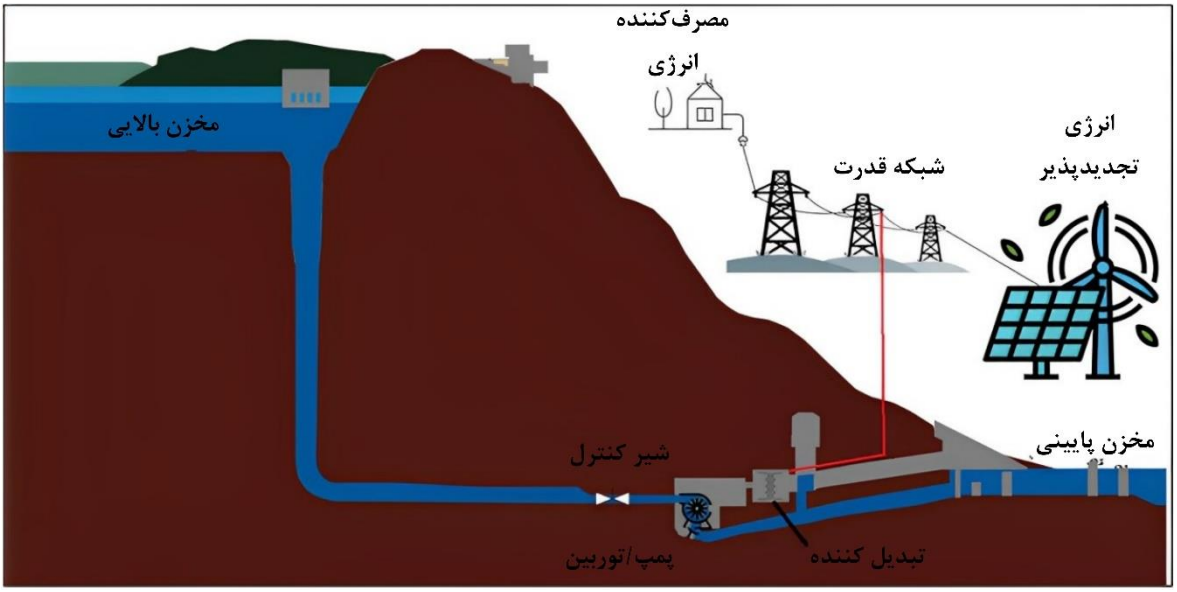
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

مقدمه

پیشینه و اهمیت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تلمبه ذخیره‌ای

چشم‌انداز انرژی جهان در حال تغییر به سمت سیستم‌های پایدار و کم‌کربن است. این تغییرات به دلیل افزایش آگاهی از نیاز به کاهش تغییرات اقلیمی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تأمین امنیت انرژی است. استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی در مرکز این تحول قرار دارد، هرچند این منابع همیشه در دسترس نیستند (هرناندو و همکاران[1] ،۲۰۱۷). عدم دسترسی مداوم به منابع انرژی تجدیدپذیر چالش‌هایی در تأمین انرژی پایدار و اطمینان از پایداری شبکه ایجاد می‌کند. همچنین، تعامل بین آب، انرژی و زمین در راستای توسعه‌ی پایدار و اهداف توسعه‌ی پایدار سازمان ملل متحد (SDGs [2]) اهمیت بیشتری یافته است. این اهداف، بر نیاز به بهینه‌سازی این تعاملات، برای کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی و برآورده کردن نیازهای اجتماعی و اقتصادی تأکید دارند. (گریگز و همکاران[3] ، ۲۰۱۳- رسول و شارما[4] ، ۲۰۱۶ - رینگلر و همکاران[5] ، ۲۰۱۳). سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) به عنوان یک راه‌حل مؤثر برای چالش‌های انرژی ظاهر شده‌اند. این سیستم‌ها با ذخیره‌ی انرژی، حمایت از منابع تجدیدپذیر و حفظ پایداری شبکه، به دستیابی به اهداف توسعه‌ی پایدار کمک می‌کنند.

سیستم تلمبه ذخیره‌ای (PHS) یک فناوری بزرگ‌مقیاس و برگشت‌پذیر است که از انرژی پتانسیل آب برای ذخیره و آزادسازی برق استفاده می‌کند. این سیستم‌ها، با تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی پتانسیل و بالعکس، نقش حیاتی در تعادل تأمین و تقاضای برق و یکپارچگی منابع تجدیدپذیر دارند. شکل (۱) یک نمونه از سیستم PHS متصل به شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۱): طرح احتمالی یک سیستم PHS (نیکولاس و همکاران[6] ، ۲۰۲۳)

در سال‌های اخیر، سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) حدود ۳٪ از کل ظرفیت نصب تولید برق جهان و ۹۹٪ از ظرفیت ذخیره‌ی انرژی برق را تشکیل داده‌اند، که آن‌ها را به پرکاربردترین سیستم‌های ذخیره‌سازی مکانیکی تبدیل کرده است (حسین و همکاران[7] ، ۲۰۲۰). در سال ۲۰۱۹، در ایالات متحده آمریکا، سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) به طور کامل ۹۳ درصد از ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس کاربردی را تشکیل دادند، که معادل ۵۵۳

[1] Huertas-Hernando etc
[2] Sustainable Development Goals
[3] Griggs etc
[4] Rasul , Sharma
[5] Ringler etc
[6] Nikolaos etc
[7] Hossain etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

GWh بود. تا پایان سال ۲۰۱۹، تمام پروژه‌های دیگر ذخیره انرژی نظیر باتری‌ها، چرخ‌های تعادل، ذخیره‌ی انرژی از طریق حرارت خورشید و گاز طبیعی با ظرفیت نصب ۱.۶ GW، مقدار ۱.۷۵ GWh انرژی ذخیره کرده‌اند. سیستم‌های PHS در ایالات متحده آمریکا، نقش بسیار مهمی در ذخیره انرژی دارند.

با این حال، این سیستم‌ها همچنین با چالش‌هایی روبه‌رو هستند. یکی از چالش‌های مهم، نیاز به سازندهای زمین‌شناسی مناسب برای مخازن ذخیره است. همچنین توسعه‌ی پروژه‌های PHS ممکن است با چالش‌های مربوط به تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی، محدودیت‌های فنی در طراحی و بهره‌وری از توربین‌ها و پمپ‌ها، و نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه، مواجه شود.

تاریخچه‌ی مختصر

سیستم ذخیره تلمبه‌ای یک فناوری معتبر تجاری برای ذخیره‌ی انرژی برق است که از اوایل دهه ۱۸۹۰ در منطقه بین سوئیس و ایتالیا به کار گرفته شده است (رحمان و همکاران[1] ، ۲۰۱۵ - ویلانوا و همکاران[2] ، ۲۰۲۰). در سال ۱۹۲۹، اولین سیستم PHS در شمال آمریکا نصب شد. اولین سیستم تجاری PHS در جهان، نیروگاه پدریرا الویتوری[3] در کوباتائو[4]، برزیل بود که از سال ۱۹۳۹ به بهره‌برداری رسید

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) با توجه به شرایط جغرافیایی مساعد و منابع آب فراوانی که در این مناطق وجود داشت، به سرعت به کار گرفته شد. برای دوام سیستم‌های PHS ، شرایط مکانی خاصی نیاز است که شامل هِد مناسب آب، توپوگرافی مفید، شرایط ژئوتکنیکال مناسب، دسترسی به شبکه‌های انتقال برق و در دسترس بودن آب است. (دین و همکاران[5] ،۲۰۱۰).

از دهه‌ی ۱۹۶۰ تا اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، توسعه سیستم‌های PHS، عمدتاً به دلیل نگرانی‌های امنیت انرژی و رشد انرژی هسته‌ای پس از بحران نفت در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ بود. تا دهه‌ی ۱۹۶۰، توسعه‌ی PHS کُند بود، به علت ارتباط نزدیک بین PHS با توسعه‌ی انرژی هسته‌ای، رشد و توسعه PHSها در کشورهایی که به دنبال رشد انرژی هسته‌ای بودند، مشهود بود. نیروگاه‌های PHS در کشورهای مختلفی مانند ایالات متحده و ژاپن ساخته شدند تا به عنوان نیروگاه‌های زمان اوج با واکنش سریع عمل کنند. این همبستگی قوی بین توسعه‌ی PHS و ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای نشان می‌دهد که PHS پشتیبان حیاتی برای این تأسیسات بوده است.

در همین حال، در اروپا، کشورهایی مانند اتریش که فاقد تأسیسات هسته‌ای بودند اما از توپوگرافی مناسب و منابع غنی آب برخوردار بودند، سیستم‌های PHS را توسعه دادند (باربور و همکاران[6] ، ۲۰۱۶ - دین و همکاران ،۲۰۱۰).

در دهه‌ی ۱۹۹۰، شاهد کاهش توسعه‌ی نیروگاه‌های جدید PHS بودیم، که عمدتاً به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی روزافزون، کمبود مکان‌های مناسب برای احداث این نیروگاه‌ها و کاهش رشد تولید انرژی هسته‌ای بوده است (دین و همکاران ،۲۰۱۰). با این حال، پس از سال ۲۰۰۰ علاقهٔ جدیدی نسبت به PHS پدید آمد که تحت تأثیر افزایش تقاضا برای منابع انرژی تجدیدپذیر بود. این تحول منجر به توسعه‌ی چندین نیروگاه بزرگ PHS در اروپا شد، مانند نیروگاه گلدیستال[7] در آلمان با ظرفیت ۱۰۶۰ مگاوات و نیروگاه کوپسورک[8] در اتریش با ظرفیت ۴۵۰ مگاوات. زیرا کشورها به دنبال تنوع بخشیدن به سبد انرژی خود و یکپارچگی سازی منابع انرژی تجدیدپذیر بودند (دین و همکاران ،۲۰۱۰ - رحمان و همکاران ، ۲۰۱۵ – ذاکری و سیری[9] ،۲۰۱۵) .

به طور خلاصه، سیستم‌های PHS اهمیت و تطبیق پذیری بالایی دارند، زیرا آن‌ها به مرور زمان با توجه به محرک‌ها و فناوری‌های مختلف تطبیق یافته‌اند. در ابتدا، با حمایت از توسعه‌ی انرژی هسته‌ای و پس از آن، با مدیریت نگرانی‌های امنیت انرژی، PHS، به یکپارچگی منابع انرژی تجدیدپذیر

[1] Rehman etc
[2] Vilanova etc
[3] Pedreira Elevatory
[4] Cubatão/SP
[5] Deane etc
[6] Barbour etc
[7] Goldisthal
[8] Kopswerk II
[9] Zakeri , Syri

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

کمک کرده است. ارائه‌ی خدمات جانبی مانند تعادل، پایداری شبکه و شروع‌های سیاه[1]، از دیگر مزیت‌های PHS است.

دامنه و هدف بررسی

این مطالعه، با هدف ارائه‌ی تحلیلی جامع از سیستم‌های ذخیره‌سازی آبی تلمبه‌ای (PHS) انجام شده است.

در این مطالعه، به تحلیل آماری وضعیت کنونی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی آبی تلمبه‌ای (PHS) در سراسر جهان پرداخته خواهد شد. همچنین دلایل پیشرفت هر کشور در این صنعت نیز ارائه شده است. در ادامه، پیشرفت‌های فناوری در حوزه‌ی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) برسی خواهد شد. در نهایت چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌روی صنعت سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) را شناسایی می‌کنیم و دیدگاه‌هایی را در مورد رشد و توسعه‌ی آینده این فناوری ارائه خواهیم کرد.

مواد و روش‌ها

۱- ویژگی‌ها و جنبه‌های مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی آبی تلمبه‌ای

۱-۱- ویژگی‌ها و کاربردهای PHS

مطالعات مقایسه‌ای (حسین و همکاران ، ۲۰۲۰- میتالی و همکاران[2] ، ۲۰۲۲ - ندیم و همکاران[3] ، ۲۰۱۹) اخیر بر روی سیستم‌های PHS نشان می‌دهند که این سیستم‌ها، به دلیل ویژگی‌های برجسته‌شان مانند توانایی بالا در ذخیره‌سازی انرژی، پتانسیل ذخیره‌سازی بلندمدت، و کارآیی عملیاتی بسیار بالا، به‌طور گسترده‌ای به کار رفته‌اند. (میتالی و همکاران ، ۲۰۲۲). سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای به عنوان راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی قابل اجرا، به دلیل پتانسیل آن‌ها در ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و تأمین ثبات شبکه، مورد توجه قرار گرفته‌اند (دنهولم و هند[4] ،۲۰۱۱ – کاتساپراکاکیس و همکاران[5] ،۲۰۲۲). در حال حاضر، این سیستم‌ها، عمدتاً برای تولید اوج، ثبات شبکه و خدمات جانبی به کار می‌روند.

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) دارای ویژگی‌های فنی‌ای هستند که آنها را برای ادغام با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر مناسب می‌سازد (آرناوتاکیس و همکاران[6]، ۲۰۲۲ - باربور و همکاران ، ۲۰۱۶ – بودین و همکارن[7] ، ۲۰۱۰ - رحمان و همکاران ، ۲۰۱۵). ظرفیت نصب آن‌ها از ۱۰ تا ۴۰۰۰ مگاوات متغیر استکه انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم را فراهم می‌کند (باربور و همکاران ، ۲۰۱۶ - لوو و همکاران[8] ، ۲۰۱۵ - ندیم و همکاران ، ۲۰۱۹). این سیسستم ذخیره‌سازی انرژی را از چند ساعت تا چند روز ممکن می‌سازد. سیستم‌های PHS با بازدهی رفت و برگشتی ۷۰ تا ۸۵ درصد، بسیار بهینه عمل می‌کنند (لوو و همکاران ، ۲۰۱۵). زمان پاسخ‌دهی بسیار کم PHSها امکان تطبیق سریع با نوسانات تقاضای انرژی را فراهم می‌کند.

ویژگی‌های فنی سیستم‌های ذخیره‌سازی آبی تلمبه‌ای (PHS):

- ذخیره انرژی: با توجه به این ویژگی می‌توانند انرژی اضافی تولید شده در زمان‌های کاهش تقاضا را ذخیره و در زمان‌های اوج مصرف آزاد کنند.
- ثبات شبکه: با توانایی پاسخ سریع به تغییرات عرضه و تقاضا، سیستم‌های PHS به حفظ پایداری شبکه و جلوگیری از خاموشی‌ها کمک می‌کنند.
- ادغام تجدیدپذیرها: قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی بر اساس نیاز، سیستم‌های PHS را برای کمک به ناپایداری منابع انرژی تجدیدپذیر مناسب کرده و به توسعه‌ی بیشتر این منابع کمک می‌نماید.
- عمر طولانی و تأثیر زیست‌محیطی کم دارند

[1] Black Start
[2] Mitali etc
[3] Nadeem etc
[4] Denholm , Hand
[5] Katsaprakakis etc
[6] Arnaoutakis etc
[7] Beaudin etc
[8] Luo etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

جدول(۱): همبستگی بین مزایا و ویژگی های فنی سیستم های تلمبه ذخیره‌ای (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

ویژگی‌های مربوطه	مزایا
دوره رواناب بر نرخ توان : +۲۴ - ۱ ساعت ظرفیت توان تولیدی: ۴۰۰۰ - ۱۰ (MW) ظرفیت ذخیره‌ی انرژی: ۱ (MWh) تا ۱۰۰ (GWh) زمان پاسخگویی: حداقل راندمان رفت و برگشت: ٪ ۸۵ – ۷۰ خود تخلیه‌ای : نا چیز طول عمر: +۶۰ – ۴۰ سال	ذخیره انرژی پایداری شبکه یکپارچه سازی انرژی‌های تجدیدپذیر تعادل بار طول عمر و تاثیر کم بر محیط زیست

۱-۱-۱- خدمات جانبی سیستم‌های PHS

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) قادرند به سرعت به نوسانات فرکانس شبکه پاسخ دهند و در بازه‌ی زمانی بین ۲۰ ثانیه تا چند دقیقه از حالت خاموش به تولید کامل برسند.

همچنین در صورت نوسانات ولتاژ، این سیستم‌ها قادرند به سرعت توان تولیدی راکتیو خود را تنظیم کرده و به حفظ سطوح ولتاژ در محدوده‌ی قابل قبول کمک کنند.

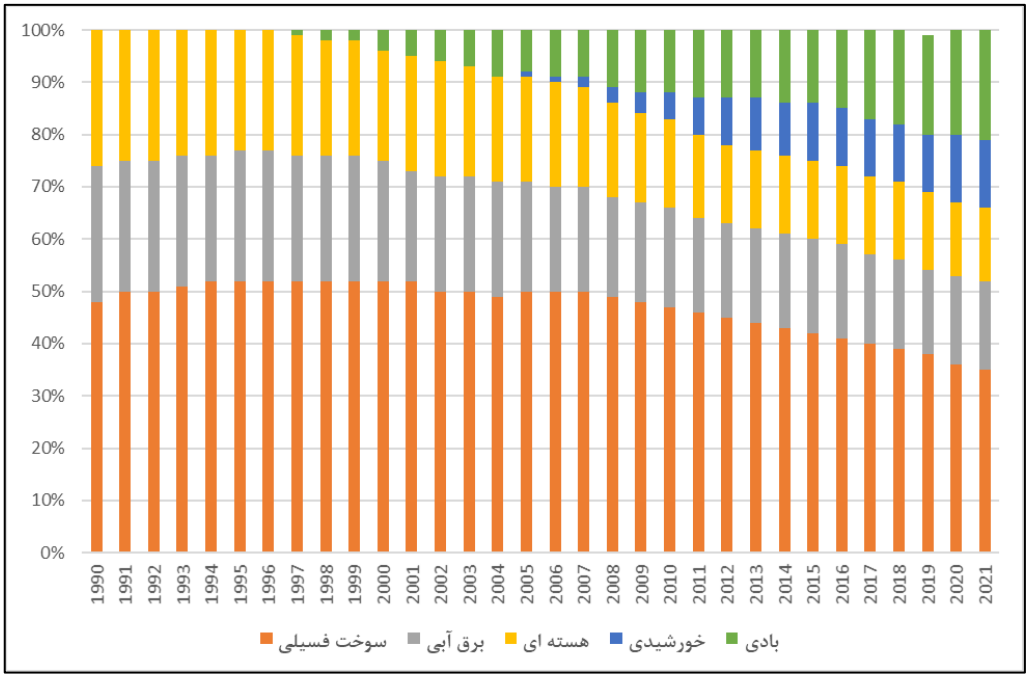
سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، با ذخیره انرژی اضافی در دوره‌های فراوانی و آزادسازی آن در دوره‌های تقاضای بالا بهبود چشمگیری در تغییر بار ارائه می‌دهند..

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) به چندین روش به استحکام سیستم کمک می‌کنند. به عنوان مثال، زمانی که ژنراتور در حال چرخش است، تکانه‌ی چرخشی را فراهم می‌آورند. علاوه بر این، قابلیت شروع سیاه این امکان را می‌دهد که پس از قطع کامل برق، بدون نیاز به انرژی خارجی، شبکه‌ی برق را دوباره فعال کنند.

به طور خلاصه، سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) مجموعه‌ای از مزایای منحصر به فرد را ارائه می‌دهند.

۱-۱-۲- ادغام سیستم‌های تلمبه‌ای ذخیره‌سازی با منابع انرژی تجدیدپذیر

سرعت باد یا نور خورشید به دلایل مختلف تغییرات قابل توجهی دارد. این تغییرات مستقیماً بر تولید انرژی پاک تأثیر می‌گذارند و به طور متناسب بر پایداری شبکه برق تأثیر می‌گذارند.



شکل (۲): سهم ظرفیت نصب شده تولید برق (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

برای رفع این چالش‌ها، ذخیره‌سازی انرژی به عنوان یک راه‌حل موثر شناخته شده است.

ادغام سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و بیوماس، نه تنها قابلیت تأمین توان خروجی پایدار را افزایش می‌دهد بلکه به پایداری کلی شبکه برق نیز کمک می‌کند (هی و همکاران[1] ، ۲۰۲۱). برای دستیابی به اهداف توافق پاریس برای نیروگاه‌های صفر کربن تا سال ۲۰۶۰ و محدود کردن افزایش دمای جهانی به ۱.۷۵ درجه سانتیگراد تا سال ۲۱۰۰، ادغام فناوری‌های تجدیدپذیر با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ضروری است.

۱-۲- انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی تلمبه‌ای

این سیستم‌ها، شامل چندین رویکرد طبقه‌بندی هستند. این رویکردها بر اساس اندازه ذخیره‌سازی، سرعت پمپ و چرخش، نیاز به ذخیره‌سازی، تنظیمات و منابع انرژی هستند (هانت و همکاران[2] ، ۲۰۲۰). در این بخش، طبقه‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی پمپاژی (PHS) را بر اساس اندازه ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۲-۱- اندازه ذخیره‌سازی

یک سیستم PHS، معمولاً از دو مخزن آب در ارتفاع‌های مختلف تشکیل شده است که توسط یک سیستم لوله‌کشی به هم متصل هستند. انواع مختلف نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در جدول (۲) ارائه شده است (هانت و همکاران ، ۲۰۲۰). جدول (۲)، طبقه‌بندی PHSها بر اساس اندازه مخزن ذخیره‌سازی را ارائه شده است.

[1] He etc

[2] Hunt etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

جدول(۲): انواع نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای از نظر اندازه ذخیره سازی

نوع ذخیره‌سازی با پمپاژ	حجم مخزن (کیلومتر مکعب)	حالت عملیاتی	زمان‌هایی که نوع ذخیره‌سازی با پمپاژ فعال است
ذخیره‌سازی پمپاژ چندساله	۵ - ۱۰۰	پمپ	فزونی سالانه در تولید برق آبی قیمت سالانه سوخت ارزان‌تر از میانگین تقاضای سالانه برق کمتر از میانگین
		رها سازی و تولید انرژی	نقصان سالانه در تولید برق آبی قیمت‌های سالانه سوخت گران‌تر از میانگین تقاضای سالانه برق بالاتر از میانگین
ذخیره‌سازی با پمپاژ فصلی	۱ – ۳۰	پمپ	فصل‌های بارانی یا فصل ذوب یخ، با تولید برق آبی بالا تابستان، با تولید برق خورشیدی بالا فصول بادی، با تولید برق بادی بالا فصل کم تقاضا، هنگام کاهش تقاضای برق
		رها سازی و تولید انرژی	دوره‌ی خشک یا زمستان‌های یخبندان، با تولید کم برق آبی زمستان، با تولید کم برق خورشیدی فصل‌های بدون باد، با تولید کم برق بادی فصل با تقاضای بالا، هنگامی که تقاضای برق افزایش می‌یابد
ذخیره‌سازی با پمپاژ هفتگی	۰.۱ – ۵	پمپ	در طول آخر هفته، هنگام کاهش تقاضای برق روزهای بادی، با تولید برق بادی بالا روزهای آفتابی، با تولید برق خورشیدی بالا
		رها سازی و تولید انرژی	در طول روزهای هفته، هنگامی که تقاضای برق افزایش می‌یابد. روزهای بدون باد، با تولید کم برق بادی روزهای ابری، با تولید کم برق خورشیدی
ذخیره‌سازی با پمپاژ روزانه	۰.۰۰۱ – ۱	پمپ	شب، هنگام کاهش تقاضای برق روز، هنگام تولید برق خورشیدی
		رها سازی و تولید انرژی	روز، هنگام افزایش تقاضای برق شب، هنگامی که تولید برق خورشیدی نداریم

۲

- تأثیرات زیست‌محیطی و ملاحظات پایداری

۲-۱- استفاده از زمین و تغییرات در اکوسیستم‌ها

اجرای سیستم‌های PHS، بدون توجه به اندازه‌ی ظرفیت تولید برق آن‌ها، می‌تواند منجر به تغییرات زیادی در کاربری اراضی، به خصوص در ساخت مخازن، سدها و سازه‌های زیربنایی دیگر، شود. این تغییرات منجر به از دست دادن محیط زیست و تجزیه و تخریب آب‌زیست‌ها خواهد شد که بر تنوع زیستی محلی تأثیر می‌گذارد. همچنین، ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای، الگوهای جریان طبیعی آب را تغییر می‌دهد. در برخی موارد، سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای باعث از بین رفتن جنگل‌ها، فرسایش خاک و رانش‌های خاک، به ویژه در فاز ساخت، شده‌اند (اندرسون و همکاران[1]، ۲۰۰۶).

برنامه‌ریزی مناسب و انتخاب مکان‌های مناسب می‌تواند این تأثیرات را کمینه کند. استفاده از مخازن موجود یا ساخت سیستم‌های بسته کوچک‌تر می‌تواند کمک کند تا تاثیرات مخرب در استفاده از زمین و در اکوسیستم‌ها به حداقل میزان خود، کاهش یابد.

۳- تجزیه و تحلیل آماری سیستم‌های ذخیره انرژی تلمبه ذخیره‌ای

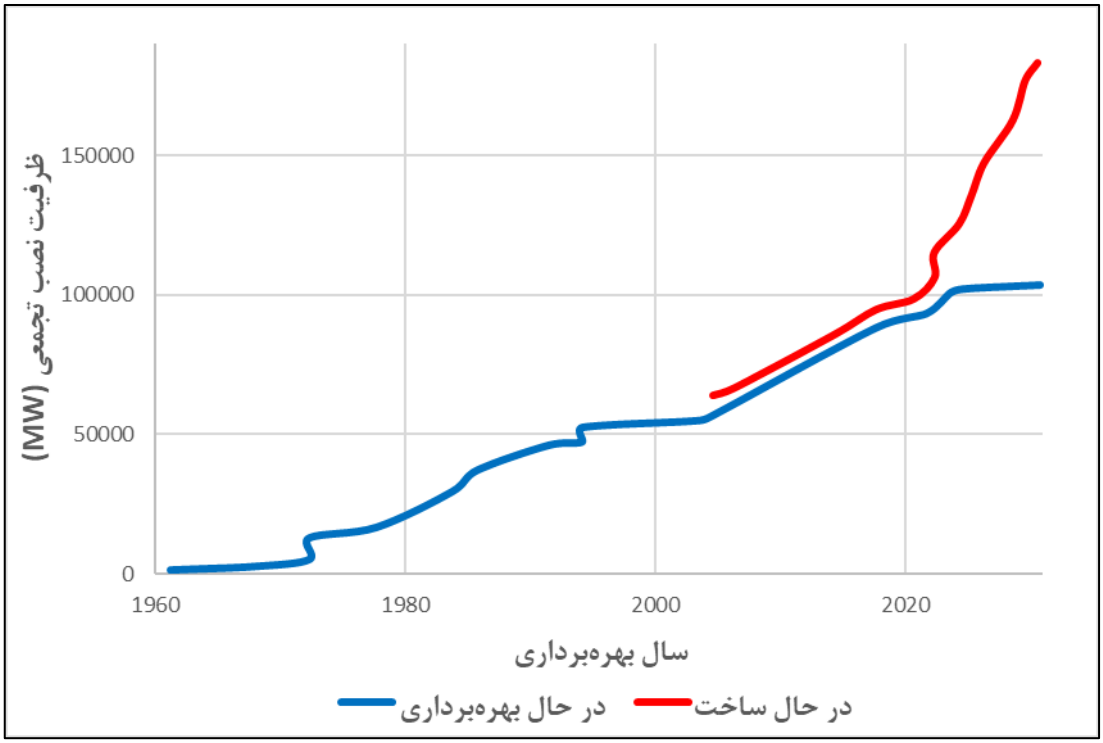
[1] Anderson etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

۳-۱- تکامل زمانی توان اسمی سیستم PHS

۳-۱-۱- روندها و الگوهای جهانی

شکل (۳) نمایانگر روندهای جهانی ظرفیت نصب تولید شده سالانه سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) از سال ۱۹۶۲ تا ۲۰۳۰ است. این نمودار به تجزیه و تحلیل وضعیت سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، در حال بهره‌برداری یا در دست ساخت می‌پردازد. در دهه‌های ۱۹۷۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ شاهد رشد در این صنعت هستیم.



شکل (۳): توان نصب شده (مگاوات) در طول زمان (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

رشد در دهه‌ی ۱۹۷۰ به عواملی از جمله افزایش آگاهی زیست‌محیطی، بحران نفت ۱۹۷۳ و پیشرفت‌های در تکنولوژی هیدرولیکی مربوط می‌شود. افزایش رشد بیابان‌زایی پس از سال ۲۰۰۰، با افزایش نگرانی‌ها در مورد تغییرات آب و هوا و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه شد. توافقات بین‌المللی مانند پروتکل کیوتو و توافق پاریس نقش مهمی در تشویق کشورها به پیگیری گزینه‌های تولید انرژی کم‌کربن، از جمله نیروگاه‌های برق‌آبی، ایفا کرده‌اند. رشد اقتصادی در کشورهای نوظهور مانند چین، هند و برزیل، تقاضای انرژی را افزایش داده است. این رشد در این دوره، توسط پیشرفت‌های تکنولوژیکی و افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر حمایت شده است.

رشد مورد پیش‌بینی در سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) پس از سال ۲۰۲۲، که در شکل (۳) نمایش داده شده است، به طور اساسی به پروژه‌های انجام شده در چین منتسب می‌شود. این گسترش مرتبط با استراتژی برنامه‌ریزی انرژی ترکیبی چین است. به دلیل نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند باد و خورشید، نیاز به راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) برای تضمین پایداری شبکه برق اساسی است. به همین دلیل، روند سریع اتخاذ نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در چین، به گسترش سریع سیستم‌های PHS در این دوره کمک کرده است.

پروژه‌های بزرگ مانند نیروگاه کاناگاوا در شکل به تصویر کشیده می‌شود که زمان بسیار زیادی برای رشد و کامل شدن آن‌ها لازم است. این پروژه با ظرفیت ۲۸۲۰ مگاوات در سال ۲۰۰۵ آغاز شده است و پیش بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۲ ادامه یابد. نخستین تولید انرژی این نیروگاه در دسامبر ۲۰۰۵ و دومین آن در ژوئن ۲۰۱۲ به بهره‌برداری درآمد. واحدهای باقی‌مانده قرار است تا سال ۲۰۳۲ به بهره‌برداری برسند، که نیاز به زمان طولانی برای کامل شدن

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

پروژه‌های این مقیاس را تأکید می‌کند. نکته مهم این است که بیش از نیمی از ظرفیت توان پروژه در دسترس نیست. علاوه بر این، به دلیل مدت زمان طولانی اجرای این پروژه‌ها، ارتقاء تکنولوژیکی در داخل سیستم‌ها بسیار اهمیت دارد. به عنوان مثال، واحد دوم نیروگاه کاناگاوا از نوع خاصی از توربین بهره می‌برد که امکان بهره‌برداری همزمان از توربین و پمپ را فراهم می‌کند. به این ترتیب، بهره‌وری تولید به میزان ۴٪ افزایش یافته و تولید نهایی هر واحد به میزان ۲۰ مگاوات افزایش یافته است.

۳-۱-۲- مجموعه‌های تجمعی بر اساس قاره‌ها

جدول (۳) توزیع جهانی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، شامل پروژه‌های در حال ساخت (از سال ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۰) و پروژه‌های در حال بهره‌برداری را نشان می‌دهد. این جدول، ظرفیت نصب شده کلی را به میزان ۱۹۰,۸۲۲.۹ مگاوات نشان می‌دهد. آسیا با ظرفیت نصب شده‌ای معادل ۱۳۸,۰۵۷ مگاوات، رهبری جهانی را در اختیار دارد که شامل ۷۷,۱۵۴ مگاوات در دست ساخت و ۶۰,۹۰۳ مگاوات در حال استفاده، می‌باشد. اروپا با ظرفیت کلی ۲۷,۷۸۷.۹ مگاوات در رتبه‌ی دوم قرار دارد که شامل ۲۴۸۰ مگاوات در دست ساخت و ۲۵,۳۰۷.۹ مگاوات در حال بهره‌برداری است. آمریکای شمالی با ظرفیت کلی ۱۴,۶۳۱ مگاوات، شامل ۹۰۰ مگاوات در دست ساخت و ۱۳,۷۳۱ مگاوات در حال بهره‌برداری در رتبه‌ی سوم است.

آفریقا، استرالیا و آمریکای جنوبی، سهم نسبتاً کوچک‌تری از ظرفیت جهانی را دارا هستند. ظرفیت کلی آفریقا به میزان ۵۵۴۷ مگاوات است که شامل ۲۷۵۰ مگاوات در دست ساخت و ۲۷۹۷ مگاوات در حال استفاده می‌باشد. استرالیا ظرفیت کلی به میزان ۴۰۵۰ مگاوات دارد، که ۲۲۵۰ مگاوات از آن در دست ساخت و ۱۸۰۰ مگاوات در حال تولید برق است.

جدول (۳): توزیع نیروگاه های نصب شده و در حال ساخت به تفکیک قاره (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

قاره	در حال بهره‌برداری	در حال ساخت	مجموع
آسیا	۷۷۱۵۴	۶۰۹۰۳	۱۳۸۰۵۷
اروپا	۲۴۸۰	۲۵۳۰۸	۲۷۷۸۸
آمریکای شمالی	۹۰۰	۱۳۷۳۱	۱۴۶۳۱
آفریقا	۲۷۵۰	۲۷۹۷	۵۵۴۷
استرالیا	۲۲۵۰	۱۸۰۰	۴۰۵۰
مجموع	۸۵۵۳۴	۱۰۵۲۸۹	۱۹۰۸۲۳

این توزیع نشان می‌دهد که آسیا نقش برجسته‌ای را در زمینه سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای جهان دارد با تمرکز قابل توجهی از ظرفیت در حال ساخت، که نشان‌دهنده‌ی یک روند رشد قوی برای این منطقه است. اروپا و آمریکای شمالی نیز به طور قابل توجهی به ظرفیت جهانی هیدروالکتریک کمک می‌کنند، در حالی که آفریقا، استرالیا و آمریکای جنوبی، سهم‌های نسبتاً کمتری را دارا هستند.

۳-۲- جمع‌آوری مجموعه‌ای برای هر کشور

۳-۲-۱- دیدگاه‌های منطقه‌ای و سطح کشور

جدول (۴) ظرفیت‌های نصب عملیاتی و پروژه‌های در حال ساخت در زمینه‌ی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای بر اساس کشورها را ارائه می‌دهد. توزیع ظرفیت در چند کشور کلیدی تمرکز دارد و ظرفیت نصب شده کل حدود ۱۹۰ گیگاوات را به دست می‌آورد. چین با ظرفیت نصب شده ۱۱۰,۱۹۸ مگاوات، که ۵۷.۸٪ از کل جهان را تشکیل می‌دهد، به عنوان بازیگر حاکم در بازار شناخته می‌شود. چین دارای ۶۹,۵۵۰ مگاوات سیستم در حال ساخت و ۴۰,۶۴۸ مگاوات در حال بهره‌برداری است. ژاپن با ظرفیت ۱۸,۱۲۷ مگاوات که ۹.۵٪ از کل جهانی را شامل می‌شود در رتبه دوم قرار دارد، از این مقدار ۲۸۲۰ مگاوات در حال ساخت و ۱۵,۳۰۷ مگاوات عملیاتی می‌باشد. ایالات متحده آمریکا با ۱۳,۷۳۱ مگاوات از سیستم‌های عملیاتی، ۷.۲٪ از کل جهان را تشکیل می‌دهد، اما در حال حاضر هیچ ظرفیتی در حال ساخت ندارد.

جدول (۴): ظرفیت نصب شده سیستم های PHS بزرگ (بیش از ۱۰۰۰ مگاوات) بر اساس کشور (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

کشور	در حال بهره برداری	در حال ساخت	مجموع
چین	۴۰۶۴۸	۶۹۵۵۰	۱۱۰۱۹۸
ژاپن	۱۵۳۰۷	۲۸۲۰	۱۸۱۲۷
آمریکا	۱۳۷۳۱	۰	۱۳۷۳۱
ایتالیا	۴۲۰۰	۰	۴۲۰۰
استرالیا	۱۸۰۰	۲۲۵۰	۴۰۵۰
اکراین	۲۵۳۱	۹۰۰	۳۴۳۱

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

کشور	در حال بهره برداری	در حال ساخت	مجموع
تایوان	۲۶۰۸	۰	۲۶۰۸
بریتانیا	۲۵۰۰	۰	۲۵۰۰
مصر	۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰
آفریقای جنوبی	۲۳۳۲	۰	۲۳۳۲
هند	۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰
آلمان	۲۱۰۵	۰	۲۱۰۵
سوئیس	۱۰۰۰	۹۰۰	۱۹۰۰
فرانسه	۱۸۰۰	۰	۱۸۰۰
اسپانیا	۱۷۷۰	۰	۱۷۷۰
صربستان	۱۳۰۰	۰	۱۳۰۰
لوگزامبورگ	۱۳۰۰	۰	۱۳۰۰
روسیه	۱۲۱۶	۰	۱۲۱۶
ویتنام	۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
جمهوری چک	۱۱۷۵	۰	۱۱۷۵
بلژیک	۱۱۶۴	۰	۱۱۶۴
ایران	۱۰۴۰	۰	۱۰۴۰
اندونزی	۰	۱۰۴۰	۱۰۴۰
کره جنوبی	۱۰۰۰	۰	۱۰۰۰

چین، ژاپن و ایالات متحده باهم، حدود ۷۴.۵٪ از کل ظرفیت جهانی ذخیره‌سازی آبی تلمبه‌ای (PHS) را تشکیل می‌دهند. کشورهای دیگری که سهم قابل توجهی دارند، شامل ایتالیا (۴۲۰۰ مگاوات)، استرالیا (۴۰۵۰ مگاوات) و اوکراین (۳۴۳۱ مگاوات) هستند. سایر کشورها به طور جداگانه کمتر از ۲٪ از ظرفیت جهانی را تشکیل می‌دهند، که در مجموع حدود ۲۵.۵٪ از کل ظرفیت نصب شده PHS را در اختیار دارند. دیگر کشورهای قابل ذکر در این گروه، شامل انگلستان (۲۵۰۰ مگاوات)، آلمان (۲۱۰۵ مگاوات)، سوئیس (۱۹۰۰ مگاوات)، فرانسه (۱۸۰۰ مگاوات) و اسپانیا (۱۷۷۰ مگاوات) هستند.

در این بین، کشور ما نیز با داشتن ظرفیت نصب ۱۰۴۰ مگاواتی، جز کشورهای پیشرو در این صنعت است. اما نداشتن ظرفیت نصب در حال ساخت، گواهی بر قدیمی بودن این تکنولوژی و عدم تداوم استفاده از آن می‌دهد.

نگاهی به توزیع در سطح قاره‌ای نشان می‌دهد که آسیا در جایگاه اول قرار دارد، که اصلی‌ترین دلیل آن حضور چین و ژاپن است. اروپا بعد از آسیا قرار دارد، در حالی که آمریکا شمالی در جایگاه سوم است، که اصلی‌ترین منبع آن ایالات متحده است.

به طور خلاصه، ظرفیت نصب جهانی PHS، به طور قابل توجهی در چند کشور کلیدی تمرکز دارد، به ویژه چین، ژاپن و ایالات متحده که با هم نزدیک به سه چهارم ظرفیت نصب شده جهانی را تشکیل می‌دهند. توزیع ظرفیت نصب PHS، نقش بسیار مهمی در شکل‌دهی آینده‌ی بازار سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای دارد.

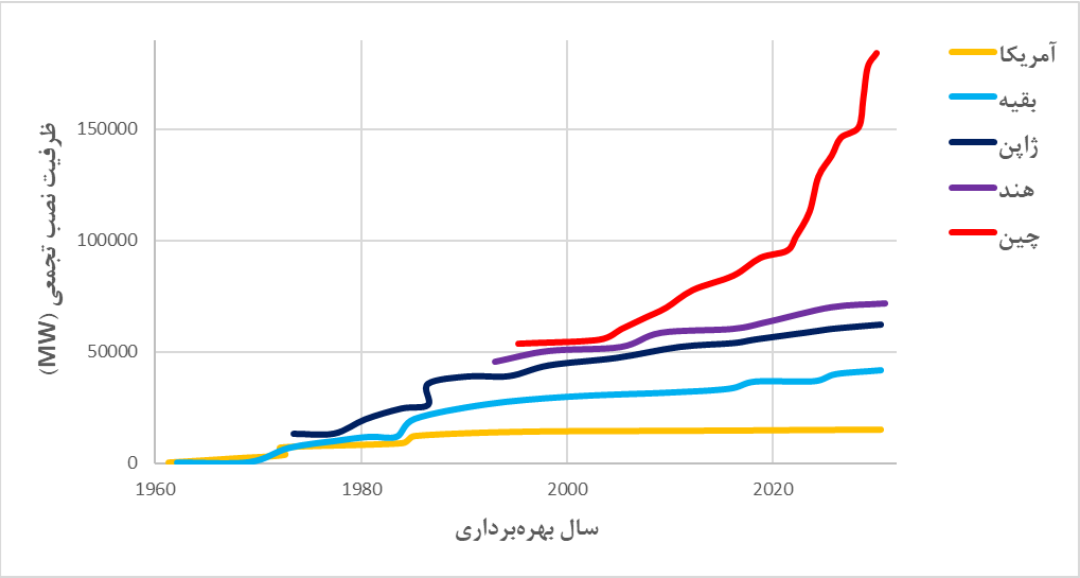
۳-۲-۲- کشورهای برتر بر اساس ظرفیت نصب شده

برای ارزیابی رشد در طول زمان، نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، به طور انحصاری بر روی نیروگاه‌های با ظرفیت مقیاس بزرگ تمرکز کردیم، به ویژه آن‌هایی که ظرفیت نصب بیشتر از ۱۰۰۰ مگاوات دارند. این رویکرد به ما امکان می‌دهد تا درک بهتری از تأثیر پروژه‌های بزرگ در رقابت جهانی دسترسی به منابع انرژی پایدار داشته باشیم. شکل (۴) نشان‌دهنده‌ی ظرفیت نصب شده کلی در سال برای کشورهایی است که ۸۰٪ از کل ظرفیت نصب شده را از سال ۱۹۶۲ تا ۲۰۳۰ تشکیل می‌دهند. با تمرکز بر مشارکت‌کنندگان اصلی، می‌توانیم درک روشن‌تری از مهم‌ترین محرک‌های گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر به دست آوریم. ایالات متحده و چین از پیشروترین کشورها در گسترش جهانی سیستم‌های ذخیره تلمبه‌ای (PHS) هستند. به خصوص چین، که ظرفیت نصب انرژی تجدیدپذیر آن از سال ۲۰۰۵ به بعد رشد نمایی داشته است و با فاصله قابل توجهی از سایر کشورهای در جایگاه اول است. استرالیا و ایتالیا نیز افزایشی پایداری در ظرفیت نصب انرژی تجدیدپذیر از خود نشان داده‌اند. در مقابل، ژاپن و هند دارای مسیر رشد کمتری در سال‌های ابتدایی بوده‌اند که گسترش قابل توجهی در ظرفیت نصب انرژی تجدیدپذیر آن‌ها پس از سال ۲۰۱۰ مشاهده شده است.

افزایش قابل توجه ظرفیت نصب انرژی تجدیدپذیر چین پس از سال ۲۰۲۲، موقعیت برتری را برای این کشور در زمینه‌ی PHS و بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر پایدار تثبیت کرده است. رشد اخیری که پس از سال ۲۰۲۲ دیده شده است، به منابع انرژی تجدیدپذیری مثل باد و تا حدی نیروی خورشیدی نسبت داده می‌شود. گسترش این منابع انرژی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نوسانی و دارای عدم قطعیت، تقاضا برای راه‌حل‌های پیشرفته‌ی ذخیره‌سازی انرژی، مانند PHS را به منظور تضمین پایداری و قابلیت اطمینان شبکه، تقویت می‌کند و توسعه‌ی بیشتر ظرفیت انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌آورد. از سال ۲۰۲۲ تا پایان سری داده‌ها در سال ۲۰۳۰، پروژه‌های در حال ساخت در کشور چین، حدود ۸۵٪ از کل ظرفیت نصب شده توسط تمام کشورها (حدوداً ۶۸ گیگاوات از ۸۰ گیگاوات پروژه‌های بزرگ PHS که در حال ساخت، برنامه‌ریزی شده یا اعلام شده هستند) را تشکیل می‌دهد. این نکته، نقش حیاتی چین در شکل‌دهی آینده‌ی انرژی تجدیدپذیر در جهان را بیان می‌کند.



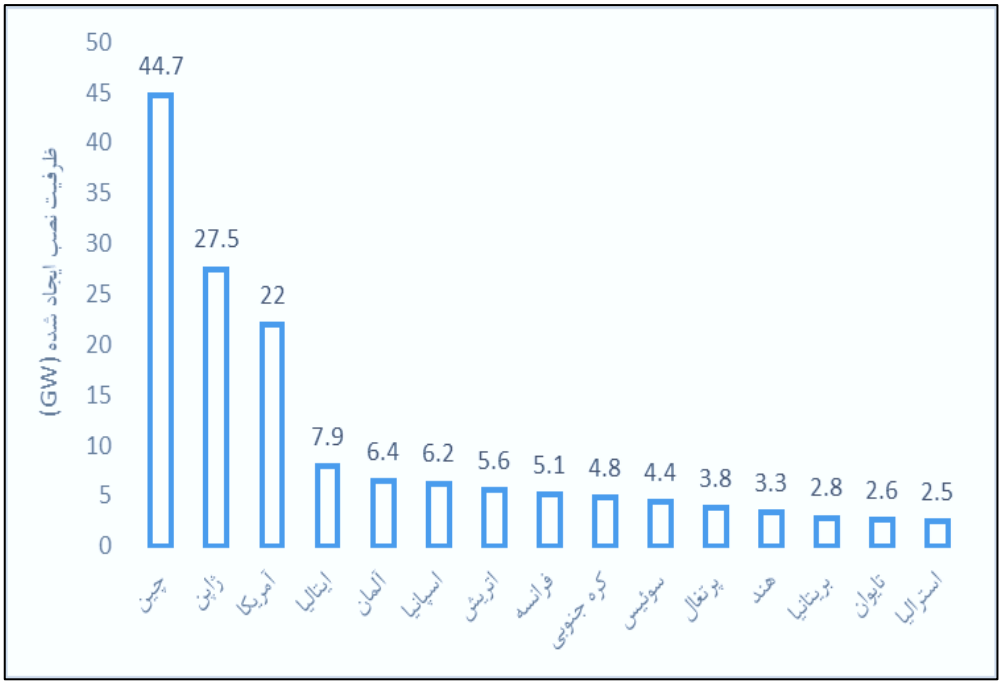
شکل (۴): مجموع ظرفیت نصب تولید برق از سال ۱۹۶۰ بر اساس کشور (فقط نیروگاه هایی که بیش از ۱ گیگاوات هستند) (نیکولاس و همکاران ، ۲۰۲۳)

۳-۳- بررسی وضعیت هر کشور به طور جداگانه

تا سال ۲۰۲۲ حدود ۱۷۵ گیگاوات ظرفیت تولید انرژی PHS در جهان ایجاد شده است (شانکار و همکاران[1] ، ۲۰۲۳). چین با ۴۴.۷ گیگاوات، ژاپن با ۲۷.۵ گیگاوات و آمریکا با ۲۲ گیگاوات، برترین کشورها در زمینه ظرفیت نصب ایجاد شده PHS می‌باشند (شانکار و همکاران ، ۲۰۲۳). شکل (۵) نشان دهنده‌ی پراکندگی ظرفیت نصب شده PHS در کشورهای مختلف است. در ادامه اطلاعات جامع‌تری از وضعیت PHSها در سطح دنیا ارائه شده است.

[1] Shankar etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۵): ظرفیت نصب شده PHSها در هر کشور (شانکار و همکاران ، ۲۰۲۳)

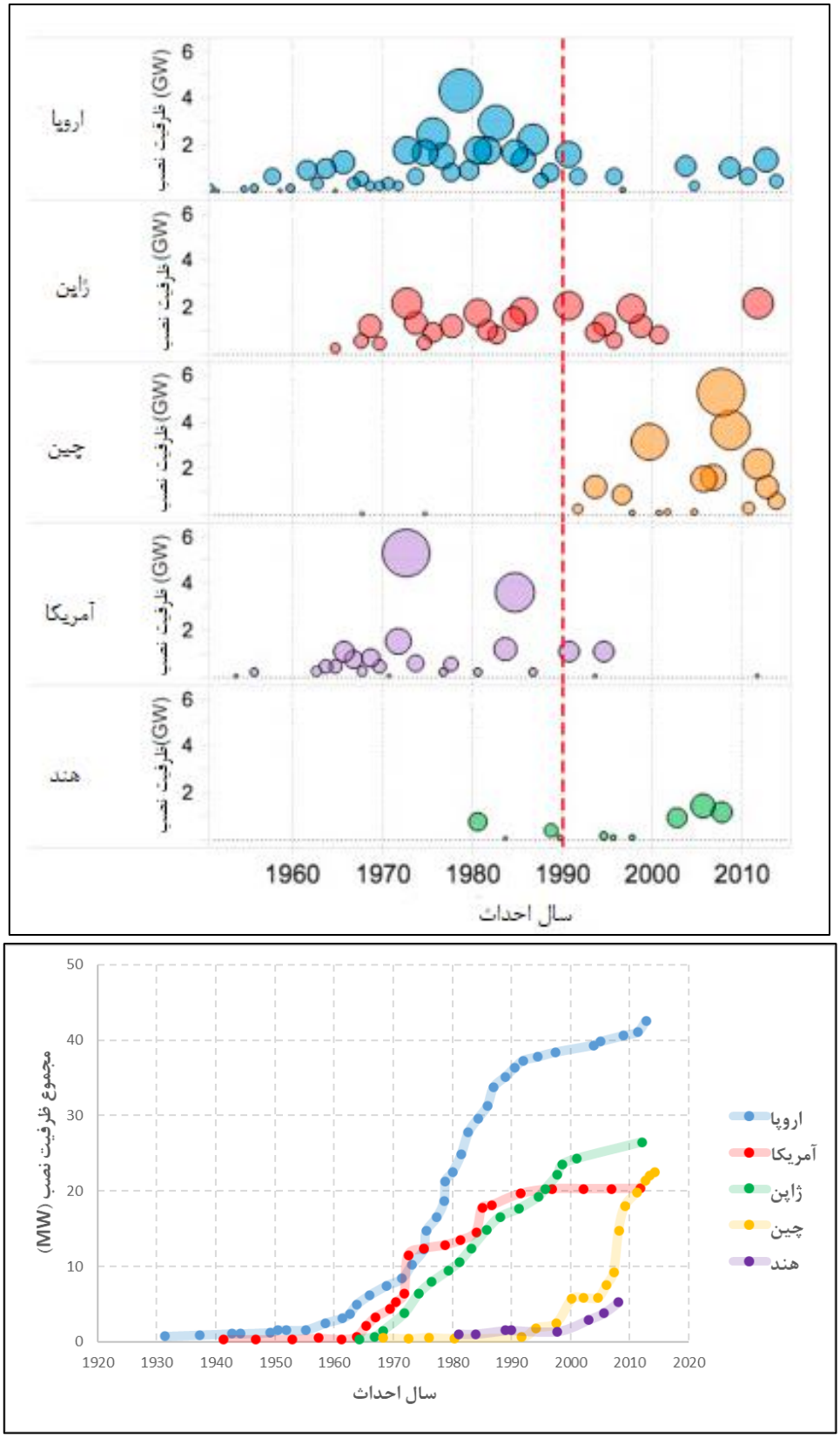
۳-۳-۱- اروپا

شکل (۵) نشان می دهد که اروپا در مجموع وضعیت مناسبی در ظرفیت نصب PHS را دارد و بیش از ۸۰ درصد آن، بین سال های ۱۹۶۰ و ۱۹۹۰ راه اندازی شده است. اکثر طرح‌ها در مناطق کوهستانی در کشورهای اتریش، فرانسه، آلمان، ایتالیا، اسپانیا و سوئیس واقع شده‌اند. اگرچه در بسیاری از کشورها، توسعه‌ی PHSها با افزایش ظرفیت نصب انرژی هسته‌ای همراه بود، برخی از کشورها مانند اتریش با وجود نداشتن انرژی هسته‌ای، ظرفیت زیادی از PHS را نصب کردند. همانطور که شکل (۶) نشان می دهد، نرخ توسعه‌ی PHS در اروپا از سال ۲۰۰۸ کمی افزایش یافته است، که تصور می شود پاسخی به افزایش تقاضای انرژی در طول دهه ۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ باشد (با توجه به اینکه PHSها زمان ساخت طولانی دارند). طرح ۴۳۰ مگاواتی ریسک II[1] در اتریش (راه‌اندازی شده در سال ۲۰۱۴) و توسعه‌ی تاسیسات تلمبه ذخیره‌ای لاموئلا[2] اسپانیا به میزان ۸۵۲ مگاوات (که در سال ۲۰۱۳ ظرفیت کل بیش از ۲ گیگاوات را به آن می‌دهد) از جدیدترین پروژه‌های PHS اروپا هستند (باربور و همکاران ، ۲۰۱۶).

[1] Reisseck II

[2] La Muela

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۶): گراف ظرفیت نصب ایجاد شده در کشورهای مختلف از ابتدا تا سال ۲۰۱۵

۳-۳-۲- ژاپن

ژاپن، کشوری کوهستانی با منابع آب فراوان است که این کشور را برای توسعه PHSها به محلی مطلوب تبدیل می-کند. کیوشو یکی از جنوبی ترین جزایر این کشور جز مناطق

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

با پتانسیل بسیار بالا حساب می‌شود. از مازاد انرژی خورشیدی تولید شده برای پمپاژ آب در صنعت PHS استفاده می‌شود. استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تولید برق، ممکن است مشکلاتی از جمله تأمین نشدن برق مورد نیاز در زمان پیک تقاضا را به همراه داشته باشد. از آن‌جایی که نیروگاه‌های حرارتی، بسته به فناوری مورد استفاده در آن‌ها، ممکن است ۲ تا ۸ ساعت زمان برای راه‌اندازی نیاز داشته باشد، PHSها، به عنوان منابع مهم و سریع العمل در زمان پیک تقاضا، مورد استفاده قرار می‌گیرند تا مشکلات تولید انرژی خورشیدی را در این کشور بهبود دهند (شانکار و همکاران ، ۲۰۲۳). از دیگر موارد قابل ذکر در مورد کشور ژاپن، به این نکته می‌توان اشاره کرد که قانون اولویت استفاده از انرژی تولید شده را مشخص می‌سازد که این قانون شامل مراحل زیر است:

- کاهش تولید انرژی با استفاده از سوخت‌های فسیلی و استفاده از مازاد انرژی‌های پاک تولید شده برای پمپاژ آب به مخازن نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای
- ایجاد شبکه و انتقال انرژی مازاد تولید شده، توسط منابع انرژی پاک به سایر نقاط
- کاهش تولید انرژی بیومس
- کاهش تولید انرژی بادی و خورشیدی
- کاهش تولید انرژی هسته، زمین گرمایی و برق‌آبی

نیروگاه‌های PHS در فصل با بارش کمتر (تابستان و پاییز) از این قانون تبعیت می‌کنند. این عملیات در مورد نیروگاه-های تلمبه ذخیره‌ای با سرعت متغیر صادق است زیر آن‌ها انعطاف پذیری بالاتری دارند که همین ویژگی، پتانسیل ادغام آن‌ها با منابع تولید انرژی پاک را بیشتر می‌سازد.

ژاپن، PHS را برای ادغام با انرژی هسته ای خود و ارائه جایگزینی برای نیروگاه های با سوخت فسیلی توسعه داده است. با توجه به منابع سوخت فسیلی بسیار کم در این کشور (ژاپن ۹۵ درصد انرژی اولیه خود را وارد می کند)، ژاپن انرژی هسته ای را به عنوان منبع اصلی تولید برق انتخاب کرد. استفاده از تولید هسته‌ای به‌عنوان فناوری بار پایه به این معنی است که این انرژی با دیگر نیروگاه‌های انعطاف‌پذیر، مانند نیروگاه‌های گازی یا برق‌آبی، کوپل شده است. به دلایل امنیت انرژی، ژاپن ظرفیت زیادی از PHS را برای تکمیل انرژی هسته ای خود و تأمین مقدار انرژی مورد نیاز در زمان پیک، نصب کرد. علاوه بر این، هیچ ارتباطی برای مبادله‌ی برق با سایر کشورها نیز ندارد (برخلاف کشورهای اروپایی مانند فرانسه، که صادرکننده بزرگ انرژی هسته‌ای به بریتانیا، آلمان، ایتالیا، سوئیس و اسپانیا است). همین دلیل باعث شد تا ژاپن برای نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای ارزش بیشتری قائل شود و درصد ظرفیت نصب PHS در این کشور به طور قابل‌توجهی نسبت به بسیاری از کشورهای دیگر بیشتر باشد. اگرچه بسیاری از مناطق با پتانسیل بالا اکنون توسعه یافته‌اند، ژاپن پیشگام طرح جدیدی در این صنعت تحت عنوان نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آب دریا در جزیره اوکیناوا شد. همچنین ژاپن دارای بالاترین قیمت برق در کشورهای OECD بوده است (آنوتا و همکاران[1] ، ۲۰۱۴). لازم به ذکر است که ژاپن به طور فعال، سایر گزینه های ذخیره سازی انرژی را دنبال می کند و به عنوان پیشرو در نصب باتری های الکتروشیمیایی شبکه ای گوگرد سدیم (NaS) شناخته می‌شود (باربور و همکاران ، ۲۰۱۶).

۳-۳-۳- چین

در این کشور، سیاست های قرار داده شده توسط دولت ها و مقامات ذیربط در سطوح مختلف به فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، به ویژه تلمبه ذخیره‌ای اهمیت می دهد. در مقایسه با اروپا، ایالات متحده آمریکا و ژاپن، توسعه‌ی PHS در چین، نسبتاً پدیده‌ی جدیدتری است. اگرچه اولین طرح PHS (۱۱ مگاوات) در سال ۱۹۶۸ و دومی در سال ۱۹۷۵ ساخته شد، ولی توسعه‌ی این بخش، تا دهه‌ی ۱۹۹۰ روند کُندی داشت. از آن زمان تاکنون به دلایل متعددی، به سرعت پیشرفت کرده است. مصرف برق با توسعه‌ی سریع اقتصادی چین در حال رشد بوده است و PHS برای پر کردن شکاف زمان پیک شبکه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه مفید است. اهداف دولتی و منطقه‌ای برای کاهش کربن، تمرکز خود را بر انرژی‌های تجدیدپذیر قرار داد و سیستم تلمبه ذخیره‌ای به عنوان راهی برای کمک به یکپارچگی انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود. توسعه‌ی سریع انرژی بادی در شمال

[1] Anuta etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

و غرب چین با توجه به زیرساخت های انتقال ناکافی نیز می‌تواند به عنوان یک محرک مهم برای افزایش توسعه PHS در نظر گرفته شود (مینگ و همکاران[1] ، ۲۰۱۳). تا پایان سال ۲۰۱۳، کل ظرفیت نصب شده‌ی بادی در چین ۹۱.۴ گیگاوات بود. با این حال، نرخ کاهش در انرژی تولیدی باد ٪۱۱ بود و در برخی مناطق این میزان در زمان های خاص از ٪۲۵ بیشتر می‌شود. سهم بالای چین از تولید برق با استفاده از زغال سنگ، محرک دیگری برای تولید انعطاف‌پذیرتر برق است، زیرا PHSها نسبت به نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ (بیش از ۳۰۰ مگاوات)، برای تولید برق با بار جزئی، کارایی بیشتر دارند و اقتصادی‌تر هستند. در کنار توسعه‌ی PHS و افزایش ظرفیت آن‌ها مقدار قابل توجهی آب معمولی تولید می‌شود (چین تا سال ۲۰۱۳ بیش از ۲۸۰ گیگاوات نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نصب شده دارد) (باربور و همکاران ، ۲۰۱۶).

۳-۳-۴- آمریکا

مانند اروپا، اکثر نیروگاه‌های PHS در ایالات متحده آمریکا در دوره ۱۹۶۰-۱۹۹۰ ساخته شدند (یانگ و جکسون[2] ، ۲۰۱۱). این دوره، با افزایش قابل توجه ظرفیت انرژی هسته‌ای و همچنین بحران انرژی در دهه‌ی ۱۹۷۰، همسو بود (یانگ و جکسون ، ۲۰۱۱). افزایش قیمت نفت و گاز در دهه‌ی ۷۰ میلادی همراه با عدم اطمینان در مورد قیمت آینده‌ی آن‌ها، شرکت های آب و برق در ایالات متحده را به ارزیابی PHS (همراه با سایر فن‌آوری‌های ذخیره سازی) به عنوان جایگزینی برای واحدهای پیک سوخت فسیلی سوق داد (دنهولم و همکاران[3] ، ۲۰۱۱). با توجه به هزینه‌های کمتر تولید برق توسط نیروگاه‌های PHS نسبت به نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های سرمایه‌ی مشابه در این زمان، PHS اغلب از نظر اقتصادی جذاب‌تر تلقی می‌شد. پس از این دوره، با کاهش قیمت نفت و گاز و همچنین کاهش شدید هزینه‌های توربین‌های گازی سیکل ترکیبی (CCGT) منجر به وقفه در ذخیره انرژی شد. از سال ۱۹۹۰ حداقل استقرار PHS در ایالات متحده آمریکا وجود داشته است. نبود سایت‌های مناسب در این دوره، از دلایل کاهش ایجاد ظرفیت نصب بود. برخی از مقالات پیشنهاد کرده‌اند که ایالات متحده دارای پتانسیل PHS بیش از ۱۰۰۰ گیگاوات است (یانگ و جکسون ، ۲۰۱۱).

۳-۳-۵- هند

اولین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در کشور هند، ناگارجوناساگار[4] نام داشت که در سال ۱۹۸۱ با ظرفیت نصب ۷۷۰ مگاواتی ساخته شد. این کشور در دو دوره‌ی دیگر شاهد رشد در PHSها بوده است. اولین دوره در بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ بوده است که ۷۴۲ مگاوات ظرفیت و در بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ ظرفیت نصبی بالغ بر ۳۴۵۰ مگاوات دیگر به چرخه‌ی تولید انرژی PHS این کشور اضافه شده است (سیواکامور و همکاران[5] ، ۲۰۱۳). مهم‌ترین دلیلی که این کشور را به استفاده از PHSها تشویق کرد، وجود پیک در شبکه‌ی مصرف برق بود که برای مواجه با این مشکل، از راهکار PHSها استفاده نمودند. ظرفیت تولید برق ۱۰ تا ۱۵ درصد کمتر از ظرفیت پیک تقاضا بوده است که سیستم‌های PHS برای انتقال توان از زمان کم‌مصرف به زمان پیک، مورد استفاده قرار گرفت. با این حال اکثر PHSها از حداکثر ظرفیت خود بهره نمی‌بردند و دلیل اصلی آن، این بود که انرژی لازم برای پمپاژ در زمانی خارج از زمان پیک برای آن‌ها فراهم نمی‌شد (سیواکامور و همکاران ، ۲۰۱۳). این به این معنی است که بسیاری از نیروگاه‌های PHS، به موفقیت مورد انتظار طراحی شده، نرسیدند و تولید انرژی کمتری نسبت به پیش‌بینی‌ها داشتند.

۳-۴- تحلیل اختلاف ارتفاع و حجم مخزن

ایجاد بزرگ‌ترین پروژه‌ها با ظرفیت ذخیره بالا در دوره‌ی گسترش سریع است. این نشان می‌دهد که در این دوره، محرک‌های مهم (مانند انرژی هسته‌ای و هدف از امنیت انرژی پس از بحران نفت دهه ۱۹۷۰) منجر به توسعه‌ی پروژه‌های بزرگ‌تر شده‌اند.

در دوره‌ی رشد دوباره، دسته‌ای از پروژه‌های با ظرفیت ذخیره انرژی متوسط (تا ۳۰ گیگاوات‌ساعت) و قدرت نصب

[1] Ming etc
[2] Yang , Jackson
[3] Denholm etc
[4] Nagarjunasagar
[5] Sivakumar etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

شده نزدیک به ۲۰۰۰ مگاوات وجود دارند. این نشان می‌دهد که احتمالاً بهترین و با کیفیت‌ترین مکان‌ها، در دوره‌های اولیه رشد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که در دوره رشد به بهینه‌سازی و بهبود فن‌آوری‌ها و منابع موجود پرداخته شده است تا شروع به پروژه‌های ذخیره‌سازی جدید بزرگ‌مقیاس بپردازند. همچنین ارزیابی سیاست‌های زیست‌محیطی در تشکیل این روند نقش مهمی داشته است.

در طول زمان رشد نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای چندین روند مشخص مشاهده می‌شود. در فاز پذیرش اولیه، تنها چند پروژه با اندازه‌ی متوسط و هِدهای هیدرولیکی نسبتاً کم و ظرفیت‌های ذخیره انرژی متوسط احداث شدند. با پیشرفت این زمینه به دوره‌ی گسترش سریع، افزایش قابل توجهی در تعداد پروژه‌های بزرگ با هِدهای هیدرولیکی بالا مشاهده شد که نشان دهنده‌ی توسعه‌ی سیستم‌های ذخیره انرژی هیدرولیکی پیشرفته و جسورانه‌تر است.

دوره‌ی استحکام بعدی، منجر به پروژه‌های کوچک‌تر ذخیره انرژی شد، که این امر ممکن است به دلیل تخلیه‌ی منابع مناسب برای توسعه‌های بزرگتر باشد. در دوره‌ی رشد دوباره، با وجود نوسان مجدد پروژه‌های بزرگ، این پروژه‌ها ظرفیت‌های ذخیره انرژی، مانند آنچه در دوره گسترش سریع مشاهده شد، را ندارند. این ممکن است به دلیل این باشد که مکان‌های مطلوب برای ذخیره‌ی انرژی هیدرولیکی در دوره‌های اولیه قبلاً بهره‌برداری شده بودند.

۴- پیشرفت‌های فناورانه و نوآوری‌ها

سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی هیدرولیکی زیرزمینی (UPHS[1]) و هیدرولیکی دریایی (SPHS[2]) فناوری‌های نوآورانه‌ای هستند که اصول کار مشابهی با سیستم‌های معمولی PHS را به اشتراک می‌گذارند، با این تفاوت که نوع مخزن پایین‌دست متفاوت است. در UPHS، معادن یا کارگاه‌های متروکه به عنوان مخازن پایین‌دست استفاده می‌شوند (لیئو و همکاران[3]، ۲۰۲۲)، در حالی که در SPHS، دریا به عنوان مخزن پایین‌دست عمل می‌کند که در هزینه و زمان ساخت، صرفه‌جویی می‌شود. در مطالعه‌ی انجام شده توسط پیکارد (شیبویا و ایشیمورا[4]، ۲۰۱۰)، UPHSها از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد هزینه‌های حفر و یکپارچه‌سازی ٪۸۲ از هزینه‌ی کل پروژه‌های اینچنینی را تشکیل می‌دهد. نوع دیگر PHS، شامل ساخت مخازن PHS از جسم‌های ذخیره انرژی پالایش آب (یانگ و جکسون، ۲۰۱۱)، استفاده از یک مکانیسم پیستون-شناور مبتنی بر گرانش در یک سفره‌ی زیرزمینی پرآب؛ PHS دریایی متصل به نیروگاه‌های بادی ساحلی (اسلوکام و همکاران[5]، ۲۰۱۳) و ذخیره‌سازی آب و انرژی درون برج‌های چرخ بادی (هانت و همکاران، ۲۰۲۰) می‌شود. نیروگاه‌های SPHS نازل به رودخانه می‌توانند آب را از یک رودخانه اصلی ذخیره کنند بدون نیاز به ساخت سد، که باعث کاهش تأثیرات اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود.

توسعه اخیر دیگری در زمینه‌ی ذخیره انرژی، ایجاد سیستم‌های ذخیره انرژی هیدرولیکی دریایی است. این سیستم‌ها از توانایی موج‌ها یا جریان‌های جزر و مدی اقیانوسی بهره می‌برند تا آب را به مخازن بالا و یا انباره‌های غرقابی پمپ کنند. (گونزالس و همکاران[6]، ۲۰۲۱). سیستم‌های جزر و مدی از مزیت استفاده از انرژی قابل پیش‌بینی و پایدار ارائه شده، توسط جزر و مد اقیانوسی بهره می‌برند. علاوه بر این، آن‌ها می‌توانند با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی ساحلی یا خورشیدی ادغام شوند تا کارایی کلی آن‌ها را افزایش دهند. با این حال، این سیستم‌ها با چالش‌های فنی قابل توجهی، مانند خوردگی، هزینه‌های نگهداری بالا و تأثیرات زیست‌محیطی بالقوه بر جانوران و اکوسیستم‌های دریایی مواجه هستند، (چادوری و همکاران[7]، ۲۰۲۱).

تاسیسات PHS در یک تقاطع منحصر به فرد بین تولید برق و انتقال قرار دارند، یک موقعیت که چالش جذابی را برای مدیریت تولید ناخالص برق ارائه می‌دهد. در آینده، انرژی در مقیاس بزرگ امری ضروری بوده و در حالی که دنیا به این

[1] Underground Pumped Hydraulic System
[2] Sea Pumped Hydraulic System
[3] Liu etc
[4] Shibuya , Ishimura
[5] Slocum etc
[6] Terrero González etc
[7] Chowdhury etc

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

سمت حرکت می‌کند، نقش تأسیسات PHS به عنوان «تولید کننده-مصرف‌کننده[1]» هرچه بیشتر اهمیت دارد.

۵- چالش‌ها و فرصت‌ها

۵-۱- چالش‌های زیست‌محیطی

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مواجهه با سیستم‌های PHS، محدودیت مکان‌های مناسب برای توسعه‌ی آن‌هاست. با افزایش تقاضا برای این سیستم‌ها، مشخص است که بسیاری از مکان‌های مناسب، قبلاً استفاده شده‌اند، در حالی که دیگر مکان‌ها، با وجود پتانسیل مناسب، به عنوان مناطق حفاظت شده، تعیین شده‌اند. بنابراین، سیستم‌های PHS می‌توانند به عنوان منابع محدودی در نظر گرفته شوند، که وجود آن‌ها به طور مستقیم به دسترسی به مکان‌های مناسب وابسته است.

این یک تعادل دقیق بین بهره‌برداری از ظرفیت این سیستم‌ها برای ترویج استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES[2]) و حفاظت از محیط زیست است که در تلاش برای حفظ آن هستیم.

از یک سو، توسعه‌ی PHS می‌تواند به طور قابل توجهی به تولید انرژی پایدار کمک کند؛ از سوی دیگر، باید از آسیب رساندن چنین توسعه‌هایی به سلامت و رفاه اکوسیستم‌های کره‌ی زمین جلوگیری نمود.

برای حل این مسائل، نیاز به ارزیابی‌های زیست‌محیطی جامع قبل از توسعه‌ی پروژه‌ها است. علاوه بر این، فرایند عملیاتی باید شامل شناسایی و اقدام جهت پیشگیری یا کاهش عواقب منفی و نظارت بر اجرای این اقدامات باشد.

سیستم‌های PHS، می‌توانند به عنوان تسهیلات ذخیره‌سازی آب نیز عمل کنند و استفاده از سیستم‌هایی که از آب دریا استفاده می‌کنند، در حال افزایش است.

در شرایط فعلی، ما به این نتیجه رسیده‌ایم که بهترین راه حل ممکن در پیشرفت فناوری‌های مرتبط با سیستم‌های PHS، استفاده از آب دریا و سیستم‌های زیرزمینی بسته است. این روش‌های جایگزین می‌توانند به طور مؤثر، مسائل مربوط به مکان و دسترسی به آب شیرین را حل کنند و به پیشرفت در زمینه‌ی سیستم‌های PHS منجر شوند.

۵-۲- چالش‌های اجتماعی

چالش‌های اجتماعی مرتبط با سیستم‌های PHS، ممکن است شامل تهیه اراضی، جابجایی جوامع و نیاز به پذیرش عمومی این فناوری باشد (کامور[3] ، ۲۰۲۰). تهیه‌ی اراضی برای پروژه‌های PHS، ممکن است منجر به جابجایی جوامع محلی، از دست دادن زمین‌های کشاورزی و اخلال در مکان‌های فرهنگی و مذهبی شود. برای رفع این نگرانی‌ها، توسعه‌دهندگان باید بطور شفاف با ذینفعان در ارتباط باشند و به مشاوره دادن به جوامع تحت تأثیر، بپردازند، همچنین، اطمینان حاصل کنند که نیازها و نگرانی‌های آن‌ها در طول فرآیند برنامه‌ریزی و اجرا مد نظر قرار گرفته می‌شود. جبران خسارت و حمایت از معاشات جایگزین می‌تواند به کاهش اثرات منفی تهیه‌ی اراضی و جابجایی کمک کند. علاوه بر این، برای پذیرش عمومی فناوری PHS، آموزش و کمپین‌های آگاهی لازم است تا مزایای ادغام انرژی تجدیدپذیر، پایداری شبکه و پتانسیل رشد اقتصادی درازمدت را نمایان سازد.

۵-۳- فرصت هایی برای رشد و توسعه آینده

رشد و گسترش آینده سیستم‌های PHS تحت تأثیر چندین عامل قرار دارد. یکی از اصلی‌ترین محرک‌ها، افزایش و ایجاد نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در سطح جهان است. هر چقدر کشورهای بیشتری در زمینه‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری کنند، انتشارات گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد و با چالش مهمی تحت عنوان تغییر اقلیم مبارزه می‌شود. در این زمان، نیاز به راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی مؤثر و کارآمد بیش از پیش ملموس می‌شود. سیستم‌های PHS با توانایی اثبات‌شده برای ذخیره و تولید انرژی بر اساس درخواست، برای پذیرش گسترده‌تر این منابع انرژی تجدیدپذیر و پشتیبانی از عدم پیوستگی این منابع، مناسب هستند. در نتیجه، به تعادل بار تقاضا و تأمین انرژی کمک می‌کنند و پایداری کلی شبکه را بهبود می‌بخشند.

یک عامل دیگر که به رشد و گسترش سیستم‌های PHS کمک می‌کند، تعهد جهانی به مقابله با تغییرات آب و هوایی است که در توافق پاریس به وضوح به آن اشاره شده است.

---

[1] prosumers
[2] Renewable Energy Sources
[3] Kumar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

از مزایای زیست محیطی آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد، عمر مفید طولانی و تأثیر زیست‌محیطی کمتر نسبت به فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی دیگر دارد. همین مزایا این سیستم‌هارا به گزینه‌ای جذاب و پایدار برای شبکه‌های برق تبدیل می‌کند.

دهه‌ها تحقیق، توسعه و پیاده‌سازی عملی، منجر به ایجاد سیستم‌های بسیار کارآمد و قابل اعتماد شده است که می‌توان آن‌ها را بر اساس شرایط جغرافیایی و عملیاتی خاص طراحی کرد. پیشرفت‌های فناوری پمپ و توربین، از جمله توسعه سیستم‌های متغیر سرعت و سیستم‌های سه‌گانه، انعطاف‌پذیری و کارایی سیستم‌های PHS را بیشتر افزایش داده است.

در نهایت، ویژگی‌های فنی سیستم‌های PHS، از جمله دامنه‌ی گسترده ظرفیت توان (۱۰ تا ۴۰۰۰ مگاوات)، مدت زمان تخلیه در توان رتبه‌ای (۱ تا ۲۴+ ساعت) و بهره‌وری چرخه‌ی رفت و برگشت (۷۰ تا ۸۵ درصد)، آن‌ها را گزینه‌ای مناسب برای انواع کاربردها می‌سازد. زمان پاسخ آن‌ها کم و نرخ خودتخلیه در کلیات معمولاً ناچیز است. این امر نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن آن‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس شبکه‌ای و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر است. با بهره‌گیری از این فرصت‌ها و مقابله با چالش‌های مربوط به محیط‌زیست و اجتماعی، سیستم‌های PHS می‌توانند نقش اساسی در حمایت از توسعه پایدار جهانی داشته باشند.

نتایج و بحث

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) از نظر ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی مزایای زیادی را ارائه می‌دهند. مهم‌ترین مزیت این سیستم‌ها، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه است. با این حال، این سیستم‌ها نیز دارای تأثیرات محیط‌زیستی و اجتماعی هستند که باید به دقت مورد بررسی و مدیریت قرار گیرند.

هدف این مقاله، ارائه یک درک جامع از PHSها، در زمینه‌ی طراحی آن‌ها، بهره‌برداری از آن‌ها، تأثیرات این سیستم‌ها در حوضه‌های مختلف، نقش آن‌ها در پیشروی به سمت سیستم‌های انرژی پایدار و کاربرد آن‌ها در هر کشور است.

در بخش اول، به مرور و بررسی کاربردهای متنوع سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) پرداخته شده است. مهم‌ترین نکته‌ی این بخش، تأکید خاص بر افزایش استفاده‌ی آن‌ها به همراه منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. در این بخش، سیستم‌های مختلف PHS شناسایی شده در مطالعات موجود، دسته‌بندی شده‌اند. به طور خاص، یک طبقه‌بندی بر اساس اندازه ذخیره‌سازی انرژی انجام شده است.

بخش بعدی، یک بررسی کیفی مختصر از تأثیرات محیط‌زیستی که این سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) از خود به جای می‌گذارند، ارائه داده است. دیدگاه این بخش اهمیت محیط‌زیست به عنوان یک دلیل بازدارنده‌ی توسعه سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) بوده است. تجزیه و تحلیل در زمینه‌های استفاده از زمین[۱]، تغییرات در اکوسیستم، کیفیت آب، رسوب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم و پیامدهای اجتماعی-اقتصادی انجام شده است.

بخش ۳ این مطالعه، تجزیه و تحلیل آماری جامعی از وضعیت فعلی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) در سراسر جهان ارائه می‌دهد. این بخش با بررسی تکامل ظرفیت نصب شده در هر کشور شکل گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای PHS چهار دوره توسعه‌ی متمایز وجود دارد. فاز اولیه پذیرش، دوره گسترش سریع از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰، دوره‌ی بعد استحکام‌بخشی از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰، و فاز رشد دوباره در دهه‌ی گذشته، می‌باشد. در بررسی تاریخی، مشاهده می‌شود که بهترین مکان‌ها برای پروژه‌های بزرگ PHS قبلاً توسعه یافته‌اند و طرح‌های کنونی بیشتر بر پروژه‌های کوچک با تأکید بیشتر بر ظرفیت ذخیره انرژی، تمرکز دارند. این یافته‌ها به درک ما از موقعیت کنونی و روندهای نصب PHS در سراسر جهان کمک می‌کند.

بخش‌های ۴ و ۵ این مطالعه، به فناوری‌های جایگزین در سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) می‌پردازند و چالش‌ها و فرصت‌های مواجهه با این صنعت را بیان می‌کنند. با بررسی

[5] Land Use

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

یافته‌های بخش‌های قبلی، این بخش، رویکردها و فناوری‌های پیشنهادی نویسندگان را، برای بهبود عملکرد و کارآیی سیستم‌های PHS، ارائه می‌دهند. تأکید این بخش‌ها بر ادغام PHS با منابع انرژی تجدیدپذیر است. با توجه به کاهش در دسترس بودن آب، توانایی احداث پروژه‌های PHS بر پایه آب دریایی به عنوان یک راهکار جایگزین، مورد بحث قرار می‌گیرد. این بخش‌ها به شناسایی استراتژی‌ها و راه‌حل‌هایی که می‌تواند به گذر کردن از موانع منجر شود، می‌پردازد و رشد و گسترش سیستم‌های PHS را در آینده تضمین می‌کند.

جمع‌بندی

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) با توجه به این که پتانسیل بالایی در ذخیره انرژی دارند، می‌توانند راهکار مناسبی برای رفع عدم قطعیت تولید انرژی از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر باشند. همچنین از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) می‌توان در نوسان‌گیری و ایجاد تعادل در شبکه برق‌رسانی استفاده نمود. اینکار با ذخیره‌ی آب در زمانی که فشاری بر شبکه وجود ندارد، شروع شده و در زمان پیک و اوج بار، آب رهاسازی می‌شود و برق تولید خواهد شد. این سیستم‌ها در پایداری شبکه، نقش بسزایی دارد. با توجه به انواع مختلف سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS)، انتخاب بهترین نوع آن‌ها با توجه به شرایط موجود، مسأله مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. به طور کلی در طول زمان ثابت شده است که استفاده از این سیستم‌ها در کشورهای مختلف، برای قدم برداشتن در مسیر رسیدن به توسعه پایدار ضروری است. زیرا سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) شرایط خوبی برای ادغام با دیگر منابع تولید انرژی تجدیدپذیر دارند و راه رسیدن به انرژی پایدار را هموار می‌کنند.

هر چند که این سیستم‌ها با چالش‌هایی روبرو هستند که استفاده از فناوری‌های نوآورانه و تکنولوژی می‌تواند راهکار برای مقابله با این چالش‌ها و تولید انرژی پایدار باشد.

مراجع

Anderson, E. P., Pringle, C. M., & Rojas, M. (2006). Transforming tropical rivers: an environmental perspective on hydropower development in Costa Rica. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 16(7), 679–693. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aqc.806

Anuta, O. H., Taylor, P., Jones, D., McEntee, T., & Wade, N. (2014). An international review of the implications of regulatory and electricity market structures on the emergence of grid scale electricity storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 489–508.

Arnaoutakis, G. E., Kefala, G., Dakanali, E., & Katsaprakakis, D. Al. (2022). Combined Operation of Wind-Pumped Hydro Storage Plant with a Concentrating Solar Power Plant for Insular Systems: A Case Study for the Island of Rhodes. Energies, 15(18). https://doi.org/10.3390/en15186822

Barbour, E., Wilson, I. A. G., Radcliffe, J., Ding, Y., & Li, Y. (2016a). A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 421–432. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.019

Barbour, E., Wilson, I. A. G., Radcliffe, J., Ding, Y., & Li, Y. (2016b). A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 421–432.

Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. Energy for Sustainable Development, 14(4), 302–314. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007

Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Selvanathan, V., Nuthammachot, N., Suklueng, M., Mostafaeipour, A., Habib, A., Akhtaruzzaman, Md., Amin, N., & Techato, K. (2021). Current trends and prospects of tidal energy technology. Environment, Development and Sustainability, 23(6), 8179–8194. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01013-4

Deane, J. P., Ó Gallachóir, B. P., & McKeogh, E. J. (2010). Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(4), 1293–1302. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.015

Denholm, P., Ela, E., Kirby, B., & Milligan, M. (2010). Role of energy storage with renewable electricity generation. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Denholm, P., & Hand, M. (2011). Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. Energy Policy, 39(3), 1817–1830. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.019

Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., Steffen, W., Glaser, G., Kanie, N., & Noble, I. (2013). Sustainable development goals for people and

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

Ming, Z., Kun, Z., & Daoxin, L. (2013). Overall review of pumped-hydro energy storage in China: Status quo, operation mechanism and policy barriers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17, 35–43.

Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: a review. Energy Storage and Saving, 1(3), 166–216. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002

Nadeem, F., Hussain, S. M. S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K., & Ustun, T. S. (2019). Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. IEEE Access, 7, 4555–4585. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497

Rasul, G., & Sharma, B. (2016). The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. Climate Policy, 16(6), 682–702. https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865

Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, Md. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 586–598. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040

Ringler, C., Bhaduri, A., & Lawford, R. (2013). The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? Current Opinion in Environmental Sustainability, 5(6), 617–624. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002

Shankar, A., Saxena, A. K., & Mazumdar, R. (2023). PUMPED STORAGE PLANTS-ESSENTIAL FOR INDIA'S ENERGY TRANSITION. www.teriin.org

Shibuya, Y., & Ishimura, Y. (2010). This month's civil engineering number one in Japan visited by students: World's first seawater pumped-storage power station: Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Station. JSCE Mag, 95(3), 34–35.

Sivakumar, N., Das, D., Padhy, N. P., Kumar, A. R. S., & Bisoyi, N. (2013). Status of pumped hydro-storage schemes and its future in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 208–213.

Slocum, A. H., Fennell, G. E., Dundar, G., Hodder, B. G., Meredith, J. D. C., & Sager, M. A. (2013). Ocean Renewable Energy Storage (ORES) System: Analysis of an Undersea Energy Storage Concept. Proceedings of the IEEE, 101(4), 906–924. https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2242411

Terrero González, A., Dunning, P., Howard, I., McKee, K., & Wiercigroch, M. (2021). Is wave energy untapped potential? International Journal of Mechanical Sciences, 205, 106544. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106544

Vilanova, M. R. N., Flores, A. T., & Balestieri, J. A. P. (2020). Pumped hydro storage plants: a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical planet. Nature, 495(7441), 305–307. https://doi.org/10.1038/495305a

He, W., King, M., Luo, X., Dooner, M., Li, D., & Wang, J. (2021). Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective. Advances in Applied Energy, 4, 100060. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100060

Hossain, E., Faruque, H. M. R., Sunny, Md. S. H., Mohammad, N., & Nawar, N. (2020). A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects. Energies, 13(14). https://doi.org/10.3390/en13143651

Huertas-Hernando, D., Farahmand, H., Holttinen, H., Kiviluoma, J., Rinne, E., Söder, L., Milligan, M., Ibanez, E., Martínez, S. M., Gomez-Lazaro, E., Estanqueiro, A., Rodrigues, L., Carr, L., van Roon, S., Orths, A. G., Eriksen, P. B., Forcione, A., & Menemenlis, N. (2017). Hydro power flexibility for power systems with variable renewable energy sources: an IEA Task 25 collaboration. WIREs Energy and Environment, 6(1), e220. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wene.220

Hunt, J. D., Zakeri, B., Lopes, R., Barbosa, P. S. F., Nascimento, A., de Castro, N. J., Brandão, R., Schneider, P. S., & Wada, Y. (2020). Existing and new arrangements of pumped-hydro storage plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 129, 109914. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109914

Katsaprakakis, D. A., Dakanali, E., Dimopoulos, A., & Gyllis, Y. (2022). Energy Transition on Sifnos: An Approach to Economic and Social Transition and Development. Applied Sciences, 12(5). https://doi.org/10.3390/app12052680

Katsaprakakis, D. Al., Dakanali, I., Condaxakis, C., & Christakis, D. G. (2019). Comparing electricity storage technologies for small insular grids. Applied Energy, 251, 113332. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113332

Kumar, M. (2020). Social, economic, and environmental impacts of renewable energy resources. Wind Solar Hybrid Renewable Energy System, 1.

Liu, F., Yang, K., Yang, T., Gao, Y., Li, J., Liu, Q., & Fu, Q. (2022). Pumped storage hydropower in an abandoned open-pit coal mine: Slope stability analysis under different water levels. Frontiers in Earth Science, 10. https://doi.org/10.3389/feart.2022.941119

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 137, 511–536. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

Sciences and Engineering, 42(8), 415. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02505-0

Yang, C.-J., & Jackson, R. B. (2011a). Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 839–844.

Yang, C.-J., & Jackson, R. B. (2011b). Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 839–844. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.020

Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 569–596. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011

Nikolaos, P. C., Marios, F., & Dimitris, K. (2023). A Review of Pumped Hydro Storage Systems. Energies, 16(11). https://doi.org/10.3390/en16114516

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال یازدهم/ شماره سی و هفتم- ویژه نامه‌ی نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای/ بهار ۱۴۰۳

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
11th Year/ No. 37- Special Issue on Pumped Storage Power Plants/ June 2024

Pumped Hydro Energy Storage (PHS), Structure And Performance

Mojtaba Dadkhah Tehrani*[1]
Ali Moridi*[2]
Mohammad Mazloumi Muchani[3]
Reza Khalili[4]

Abstract

From the outset, aligning production with energy consumption has been a primary concern for operators of power generation and distribution networks. After World War II, as nuclear energy gradually became a reliable source of electricity generation in many European and North American countries, the development of pumped storage power plants was considered to convert nuclear baseload electricity into peak electricity through storage. In the 1990s, due to increasing environmental concerns and a decline in the development of nuclear power plants, there was a notable decrease in the development of new Pumped Hydro Storage (PHS) plants. After the year 2000, with the growing importance of climate change and the increasing demand for renewable energy sources, the outlook changed significantly. A renewed interest in Pumped Hydro Storage (PHS) emerged. Asia, led by countries such as China, Japan, and India, holds global leadership in the development of PHS plants with an installed capacity of 138,000 MW. This includes 77,000 MW under construction and 61,000 MW currently in operation. The majority of PHS capacity in European and North American countries is attributed to developments made prior to the 21st century. Europe ranks second globally in pumped hydro storage (PHS) capacity with a total of 27.8 GW. This includes 2.5 GW under construction and 25.3 GW currently in operation. North America has a total pumped hydro storage (PHS) capacity of 14.6 GW, comprising 900 MW under construction and 13.7 GW currently in operation. This article provides an analysis of current and emerging trends, technical challenges, and environmental impacts related to pumped hydro storage (PHS) systems. It examines the critical role of PHS systems in integrating renewable energy sources, meeting peak demand, and enhancing grid stability. Additionally, the article identifies potential regions for future research and development efforts. Furthermore, by offering insights into the challenges and opportunities associated with PHS systems, the article examines their potential to contribute to a sustainable and reliable energy future.

Keywords

1th Pumped Hydro Storage (PHS) system, 2th Renewable energy, 3th Grid stability

[1] Master student, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran.
[2] * Assistant Professor, School of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: a_moridi@sbu.ac.ir
[3] Master student, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran.
[4] PhD student, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran.

Received: 2024/07/20 Accepted: 2024/07/27

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]