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

بررسی امکان استفاده از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای در مناطق ساحلی: تجربیات جهانی

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

چکیده

در این پژوهش، به بررسی کاربرد و اهمیت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به روش تلمبه ذخیره‌ای (PHES) در مناطق ساحلی پرداخته‌شده است. این سیستم‌ها، به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای دستیابی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر تا سال ۲۰۵۰ مطرح‌شده‌اند همچنین، این سیستم‌ها ازنظر محیط‌زیستی پایدار هستند و می‌توانند به مدیریت بهتر انرژی‌های تجدید پذیر، مانند انرژی باد و خورشید کمک کنند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی استفاده از آب‌شور برای سیستم‌های PHES در سواحل و مناطق فراساحلی با استفاده از مخازن طبیعی و مصنوعی است. برای این منظور، انواع مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی، مواد و روش‌های به‌کاررفته در آن‌ها و نتایج حاصل از بررسی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مخازن داخلی و خارجی در سیستم‌های PHES دریا، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به حفظ محیط‌زیست نیز کمک می‌کند. همچنین سیستم‌های PHES با هِد کم می‌توانند یک راه‌حل مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی در مناطق ساحلی با توپوگرافی کم ارتفاع باشند. این پژوهش نشان می‌دهد که با اجرای مناسب سیستم‌های PHES و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته برای جلوگیری از خوردگی و رسوب، می‌توان از این پتانسیل، در مناطق ساحلی ایران، به ویژه در مناطقی همچون عسلویه که دریا و کوه بسیار نزدیک هستند و یا جزایر قشم و کیش با ترکیب با انرژی تجدید پذیر آب و خورشید استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی:

آب‌شور، انرژی تجدید پذیر، ذخیره‌سازی انرژی، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای.

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.
[۲*] دانشیار گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران(a_moridi@sbu.ac.ir).
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.
[۴] دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی محیط زیست ، آب و فاضلاب دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

مقدمه

اروپا در تلاش است تا سال ۲۰۵۰ به‌عنوان اولین قاره‌ی کربن خنثی در جهان شناخته شود، یعنی تمامی انتشارات گازهای گلخانه‌ای تولیدی به مقداری کاهش یابد که با ایجاد توانایی جذب این گازها توسط جنگل‌ها، خاک و سایر ابزارهای جذب کربن را تعادل بخشد. اتحادیه اروپا برنامه دارد که تا سال ۲۰۳۰، انتشار گازهای گلخانه‌ای را حداقل ۵۵٪ نسبت به سطح گازهای گلخانه‌ای در سال ۱۹۹۰ کاهش دهد (آنسورنا رویز[1] و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از راهکارهای اصلی برای دستیابی به این هدف، کاهش انتشار کربن از بخش تولید برق است که شامل افزایش استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر مانند باد، خورشید، انرژی برق‌آبی، سوخت‌های زیستی جامد و دیگر منابع تجدیدپذیر می‌شود. در حال حاضر، انرژی بادی ۳۶٪، خورشیدی ۱۲٪، برق‌آبی ۳۳٪، سوخت‌های زیستی جامد ۹٪ و دیگر منابع تولید انرژی تجدید پذیر ۹٪ از کل انرژی تجدید پذیر تولیدشده در شبکه‌ی برق اروپا را تشکیل می‌دهند (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). در دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۸، فناوری‌های انرژی باد، انرژی خورشیدی و سوخت‌های زیستی جامد به‌سرعت رشد کرده‌اند و انرژی باد را به مهم‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در اروپا تبدیل کرده‌اند (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

افزودن مقدار زیادی انرژی تولیدشده توسط باد و خورشید به شبکه به دلیل طبیعت تصادفی و غیرقابل‌پیش‌بینی آن‌ها، ممکن است باعث شود سیستم شبکه‌ی برق با محدودیت‌های انتقال یا بهره‌برداری مواجه شود. در زمان‌های تولید زیاد انرژی بادی و خورشیدی، ممکن است اپراتورهای سیستم مجبور شوند میزان کمتری از انرژی بادی و خورشیدی موجود را بپذیرند (کاهش تولید)، (برد[2] و همکاران، ۲۰۱۶).

پروژه Twenties اتحادیه‌ی اروپا با شبیه‌سازی‌های بازار نشان داد که کاهش تولید انرژی باد ممکن است از ۰.۴ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۰ به ۹.۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۳۰ افزایش یابد. دلیل اصلی این اتفاق، افزایش تولید انرژی و تمرکز آن در یک نقطه‌ی جغرافیایی است (رد الکتریکا د اسپانیا[3] و همکاران، ۲۰۱۳).

نوسانات ظرفیت انتقال، عامل اصلی کاهش تولید انرژی است، در این صورت انرژی بادی بیش از اندازه تولیدشده، نمی‌تواند به مناطق دیگری که ممکن است نیاز داشته باشند، انتقال یابد (بورک و او'مالی[4]، ۲۰۱۱). گسترش شبکه‌های برق، هزینه‌بر و اغلب زمان‌بر است (ماتئوسیان[5]، ۲۰۰۷). یک گزینه‌ی دیگر، ذخیره‌سازی انرژی است. به‌جای انتقال انرژی به مکان‌های دیگر، می‌توان آن را به‌صورت محلی ذخیره کرده و برای استفاده در زمان‌های بعدی نگهداری کرد (مرادزاده[6] و همکاران، ۲۰۱۴). بسیاری از مطالعات نشان می‌دهند که نفوذ باد و خورشید در شبکه‌ی تولید انرژی می‌تواند با استفاده از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای(PHS)[7] افزایش یابد (زو[8] و همکاران، ۲۰۱۵).

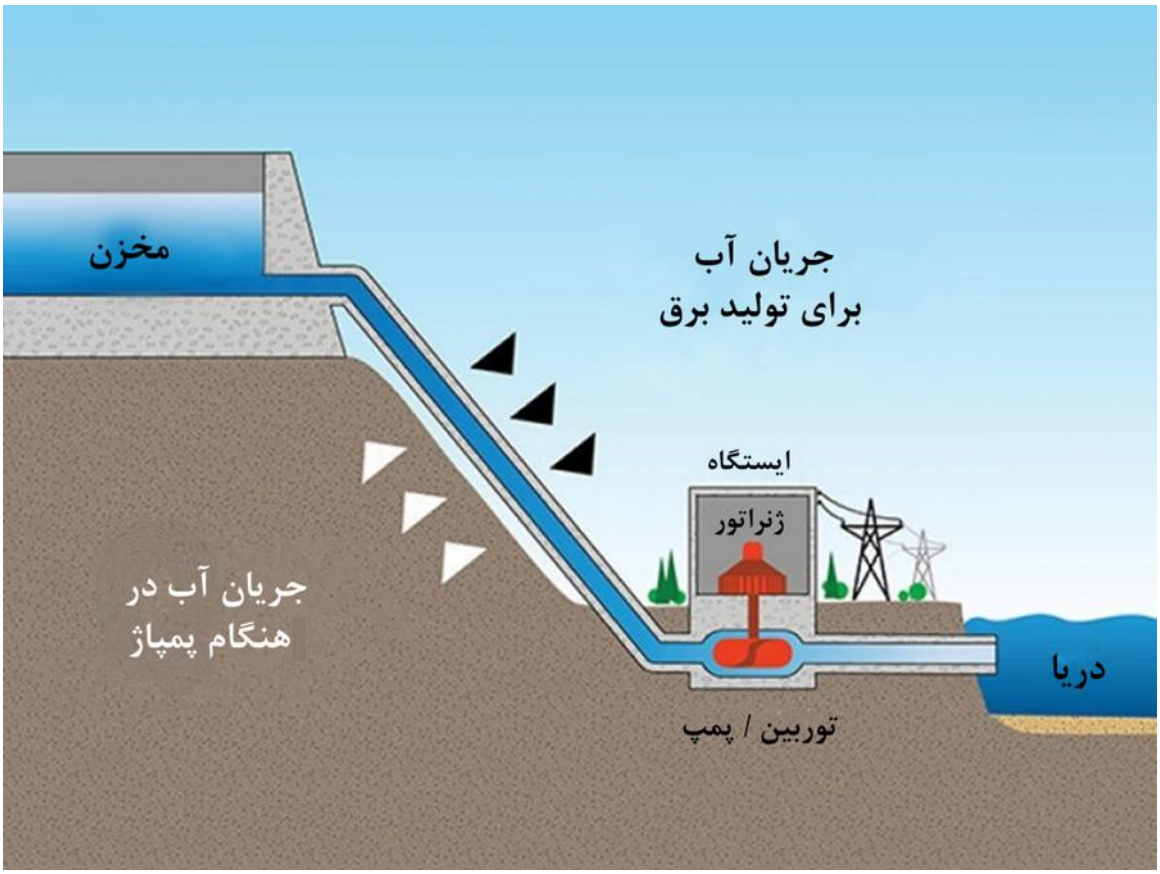
تکنولوژی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) در مناطق کوهستانی، عملکرد بهتری نشان داده و تا سال ۲۰۲۰، ۹۰٪ از ذخیره‌سازی انرژی بزرگ مقیاس، شبکه‌ی جهانی را تشکیل می‌دهد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات نشان داده‌اند که تکنولوژی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHS) به‌عنوان یکی از ارزان‌ترین تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی ازنظر هزینه برای هر کیلووات‌ساعت برق ذخیره‌شده، شناخته می‌شوند (چن[9] و همکاران، ۲۰۰۹).

تکنولوژی PHS دارای مزایای فراوانی است، اما به‌طورمعمول نیاز به اختلاف ارتفاع زیادی بین مخازن دارد که باعث می‌شود برای کشورهایی با توپوگرافی کم ارتفاع، نامناسب باشند. در مقیاس کوچک‌تر ذخیره‌سازی، باتری‌های لیتیوم-یون پیشرفت‌های چشمگیری در راستای افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های اولیه کرده‌اند، اما عمر مفید آن‌ها بسیار کوتاه‌تر بوده و رد پای کربنی آن‌ها نسبت به PHS بسیار بیشتر است. به‌عنوان‌مثال، (بارنهارت و بنسون[10]، ۲۰۱۳) نشان داده‌اند که نسبت ذخیره‌سازی انرژی به سرمایه‌گذاری

[1] Ansorena Ruiz
[2] Bird
[3] Red Eléctrica de España
[4] Burke & O'Malley
[5] Matevosyan
[6] Moradzadeh
[7] Pumped Hydro Storage
[8] Zou
[9] Chen
[10] Barnhart & Benson

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

(شاخص عملیاتی ذخیره‌سازی انرژی ESOI [1]) برای یک باتری لیتیوم-یون ۳۲ است، درحالی‌که برای یک تأسیسات PHS بیش از ۷۰۰ است. به‌طور مشابه، مطالعات نشان می‌دهد که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری انرژی توزیع‌شده در طول عمر یک باتری لیتیوم-یون بین ۷.۵ تا ۱۰۴ دلار برای هر چرخه کیلووات‌ساعت است، درحالی‌که هزینه‌ی PHS بین ۰.۰۲ تا ۱.۵ دلار برای هر چرخه کیلووات‌ساعت است (نیکولایدیس و پولیکاس[2]، ۲۰۱۷). بنابراین، توسعه‌ی PHS برای کشورها می‌تواند هم برای محیط‌زیست و هم اقتصاد، سودمند باشد.



شکل۱- شماتیک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از آب دریا(بریز، ۲۰۱۸)

۱- بررسی پروژه‌های ترکیبی از ذخیره‌سازی انرژی آب دریا با نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای

ذخیره‌سازی آب دریا با پمپاژ(SPHS)[3] از دو فناوری موجود تولیدشده است:

PHS با هِد زیاد و تولید انرژی جزر و مد دریایی با هد بالا در سال ۲۰۲۰ ظرفیت نصب‌شده‌ای به میزان ۱۶۰ گیگاوات داشت (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). این فناوری از مزایای اقتصادی و اکولوژیکی قابل‌توجهی برخوردار است که باعث شده تا تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود، و PHS به‌عنوان یک فناوری امیدبخش در محیط‌های مناسب شناخته شود. بر اساس تخمین انجمن بین‌المللی آب برق، ظرفیت نصب‌شده تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۲۴۰ گیگاوات افزایش خواهد یافت.

ذخیره‌سازی انرژی برق‌آبی با بهره وری از تکنولوژی نیروگاه های تلمبه ذخیره‌ای (PHES) با بالا بردن آب، انرژی پتانسیل گرانشی را ذخیره می‌کند. فرآیند شارژ، انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و درنهایت به انرژی پتانسیل گرانشی تبدیل می‌کند؛ به این صورت که آب را از یک مخزن پایین‌تر به یک مخزن بالاتر پمپاژ می‌کند. فرآیند تخلیه برعکس این است؛ انرژی پتانسیل گرانشی را به انرژی

[1] Energy Storage Operational Index
[2] Nikolaidis & Poullikkas
[3] Storage of Potential Hydroelectric Energy with Pumped Storage

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند؛ به این صورت که آب از مخزن بالاتر به مخزن پایین‌تر جریان می‌یابد و توربینی که به یک ژنراتور الکتریکی متصل است را به حرکت درمی‌آورد.

سیستم تلمبه ذخیره‌ای در ساحل شمالی جزیره اوکیناوا، ژاپن، اولین تأسیسات، در جهان است که از آب دریا برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کند. این نیروگاه از دریای فیلیپین به عنوان مخزن پایین بهره می‌برد و دارای ارتفاع مؤثر ۱۳۶ متر و حداکثر جریان ۲۶ متر مکعب بر ثانیه است. در ۳ اوت ۲۰۰۹، حداکثر خروجی آن حدود ۲.۱ درصد از حداکثر تقاضای برق اوکیناوا بود.

مخزن بالایی، که به صورت مصنوعی حفاری شده، ۶۰۰ متر از خط ساحلی فاصله دارد و ۱۵۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. این مخزن، دارای شکل هشت‌ضلعی با عرض ۲۵۲ متر و عمق ۲۵ متر است و ظرفیت ذخیره‌سازی آن ۵۶۴,۰۰۰ متر مکعب می‌باشد. تمام سطح داخلی مخزن با لایه‌های غیرقابل نفوذ پوشانده شده تا از نشت آب و آسیب به پوشش گیاهی جلوگیری کند.

در سطح جهان، ژاپن با ظرفیت نصب‌شده ۲۵ گیگاوات، بزرگ‌ترین ظرفیت نصب‌شده PHES از انواع مختلف را دارد که بیش از ٪۸.۵ از ظرفیت تولید برق نصب‌شده آن را تشکیل می‌دهد. چین دارای دومین ظرفیت بزرگ PHES است و پس‌ازآن ایالات‌متحده آمریکا قرار دارد، اما PHES تنها ٪۱.۸ و ٪۱.۹ از کل ظرفیت تولید برق نصب‌شده آن‌ها را تشکیل می‌دهد.اروپا بیشترین ظرفیت PHES را دارد و بیش از ۸۰ درصد آن بین سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۹۰ به بهره‌برداری رسیده است. اکثر طرح‌ها، در مناطق کوهستانی اتریش، فرانسه، آلمان، ایتالیا، اسپانیا و سوئیس واقع‌شده‌اند. اگرچه در بسیاری از کشورها، توسعه، هم‌زمان با افزایش قابل‌توجه ظرفیت هسته‌ای بوده است، برخی کشورها مانند اتریش ظرفیت‌های قابل‌توجهی از PHES را نصب‌کرده‌اند، باوجوداینکه هیچ نیروی هسته‌ای ندارند. نرخ توسعه‌ی PHES در اروپا از سال ۲۰۰۸ کمی افزایش‌یافته است که به نظر می‌رسد پاسخی به افزایش تقاضای انرژی در دهه‌ی ۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ و پیش‌بینی افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر باشد. طرح ۴۳۰ مگاواتی رایسک[1] در اتریش (که در سال ۲۰۱۴ به بهره‌برداری رسید) و گسترش تأسیسات ذخیره‌سازی تلمبه‌ای لا موئلا[2] اسپانیا به میزان ۸۵۲ مگاوات (در سال ۲۰۱۳ که ظرفیت کل آن بیش از ۲ گیگاوات شد) از جدیدترین توسعه‌های PHES اروپا هستند.

ژاپن به‌طور تاریخی PHES را برای تکمیل تولید هسته‌ای خود و ارائه جایگزینی برای نیروگاه‌های تولید برق در شرایط اوج مصرف(پیک) با سوخت فسیلی توسعه داده است. با منابع فسیلی بومی بسیار محدود (ژاپن ۹۵ درصد از عرضه انرژی اولیه خود را وارد می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۰۹) ، ژاپن انرژی هسته‌ای را به‌عنوان منبع اصلی تولید برق انتخاب کرده است.

ترجیح استفاده از برق هسته‌ای به‌عنوان فناوری پایه باعث می‌شود که این انرژی به‌خوبی با نیروگاه‌های انعطاف‌پذیر مانند تولید برق از گاز یا نیروگاه‌های برق‌آبی بایکدیگر به طور ترکیبی به کار گرفته شود. به دلایل امنیت انرژی، ژاپن ظرفیت بزرگی از PHES را برای تکمیل نیروگاه‌های هسته‌ای و تأمین برق اوج انتخاب کرده است. علاوه بر این، ژاپن هیچ ارتباط الکتریکی با کشورهای دیگر ندارد (برخلاف فرانسه که صادرکننده‌ی بزرگ برق هسته‌ای به بریتانیا، آلمان، ایتالیا، سوئیس و اسپانیا است). این امر به ارزش نیروگاه‌های برق انعطاف‌پذیر می‌افزاید و یکی از دلایل دیگری است که درصد ظرفیت PHES در ژاپن به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از بسیاری از کشورهای دیگر است. مناطق کوهستانی ژاپن برای PHES مناسب است، هرچند بسیاری از بهترین نقاط هم‌اکنون توسعه‌یافته‌اند.

به همین دلیل، ژاپن طرح تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از آب دریا را در جزیره اوکیناوا را برنامه‌ریزی کرده است (باربور[3] و همکاران، ۲۰۱۶). تاریخچه‌ای ژاپن نشان می‌دهد که این کشور برخی از بالاترین قیمت‌های برق را در کشورهای (OECD)[4]تجربه کرده است (آنوطا[5] و همکاران، ۲۰۱۴).

[1] Reisseck
[2] La Muela
[3] Barbour
[4] Organization for Economic Cooperation and Development
[5] Anuta et al

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

جدول ۱: ظرفیت نصب‌شده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای (PHES) به تفکیک کشور(باربور و همکاران، ۲۰۱۶)

کشور	ظرفیت نصب‌شده PHES (گیگاوات)	در حال ساخت (گیگاوات)	ظرفیت توان PHES به‌عنوان درصدی از ظرفیت نصب‌شده تولید برق (درصد)
ژاپن	۲۴/۵	۳/۳	۸/۵
چین	۲۲/۶	۱۱/۶	۱/۸
ایالات‌متحده	۲۰/۵	-	۱/۹
ایتالیا	۷/۱	-	۵/۷
اسپانیا	۶/۸	-	۶/۶
آلمان	۶/۳	-	۵/۳
فرانسه	۵/۸	-	۴/۴
هند	۵	۱/۷	۲/۲
اتریش	۴/۸	۰/۲	۲۱
بریتانیا	۲/۷	-	۳
سوئیس	۲/۵	۲/۱	۱۲
پرتغال	۱/۱	۱/۵	۶/۱

باید توجه داشت که ژاپن به‌طور فعال در حال پیگیری گزینه‌های دیگر ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی (EES)[1] است و به‌عنوان پیشرو در نصب باتری‌های الکتروشیمیایی شبکه‌ای سدیم سولفور (NaS)[2] توسعه‌یافته است (پولیکاس[3]، ۲۰۱۳).

در مقایسه با اروپا، ایالات‌متحده، و ژاپن نشان می‌دهد که توسعه ذخیره‌سازی برق‌آبی تلمبه‌ذخیره‌ای (PHES) در چین به تازگی آغاز شده است. در چین به دلیل رشد اقتصادی سریع افزایش‌یافته است و PHES به‌عنوان یک ابزار حیاتی برای ارتباط شکاف بین نیازهای اوج و نیازهای غیر اوج برق و بهبود قابلیت اعتماد شبکه شناخته‌شده است. همچنین، اهداف دولتی و منطقه‌ای برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، باعث افزایش ظرفیت نصب انرژی‌های تجدید پذیر شده و ذخیره‌سازی برق‌آبی تلمبه ذخیره‌ای به‌عنوان یک راهکار برای کمک به ادغام بهتر شبکه‌ی برق مطرح شده است.

در ایالات‌متحده، مانند اروپا، بیشتر نیروگاه‌های برق‌آبی تلمبه‌ذخیره‌ای (PHES) در دوره ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ ساخته شدند (یانگ و جکسون[4]، ۲۰۱۱). این دوره با افزایش قابل‌توجه ظرفیت‌های هسته‌ای و بحران انرژی دهه‌ی ۱۹۷۰ هم‌زمان بود(یانگ و جکسون، ۲۰۱۱). (دنهولم[5] و همکاران، ۲۰۱۰) به این نکته توجه دارند که افزایش شدید قیمت‌های نفت و گاز در دهه ۷۰، همراه با نامعلومی در مورد قیمت‌های آینده، باعث شد که شرکت‌های ارائه‌دهنده انرژی در ایالات‌متحده PHES و سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی را به‌عنوان جایگزینی برای واحدهای نیروگاهی اوج‌گیری با سوخت فسیلی مورد ارزیابی قرار دهند.

۱-۱- انرژی جزر و مد

SPHS برای کشورهای در مناطق ساحلی کم ارتفاع در ترکیب با پروژه‌های انرژی جزر و مد با هِد کم استفاده می‌شود، زیرا این پروژه‌ها برای چند دهه است که اقدام به بهره‌برداری از تجهیزات برق‌آبی در آب‌های دریایی نموده‌اند. نیروگاه جزر و مد (TPP)[6] لارانش اولین نیروگاه جدید جزر و مد بود که در سال ۱۹۶۶ بهره‌برداری شده است و ظرفیت نصب‌شده‌ی آن ۲۴۰ مگاوات بود. این نیروگاه، یک سد به طول ۷۵۰ متر دارد که دهانه‌ی رودخانه Rance را در تنگ‌ترین نقطه‌اش در منطقه St. Malo مسدود می‌کند و یک حوضه به وسعت ۲۲ کیلومترمربع را شکل می‌دهد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

نیروگاه جزر و مد ۱.۷ مگاواتی در(کیسلاگوبسک) کیسلا یا گوبا[7] که از سال ۱۹۶۸ به بهره‌برداری آزمایشی درآمده است،

[1] Electrical Energy Storage
[2] Sodium-Sulfur
[3] Poullikkas
[4] Yang & Jackson
[5] Denholm
[6] Tidal Power Project
[7] Kislaya Guba (Kislogubsk)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

شکل۲- نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای جزیره اوکیناوا، ژاپن
(IEA, 2021)1

اولین نیروگاه بود که از کاسه‌های شناور برای ساخت ساختمان توربین در یک تنگه بسیار باریک با عرض ۵۰ متر در نزدیکی خلیج Ura استفاده کرد (زینول[2] و همکاران، ۲۰۱۷).

۱-۲- ذخیره‌ی انرژی برق‌آبی دریایی با هِد زیاد

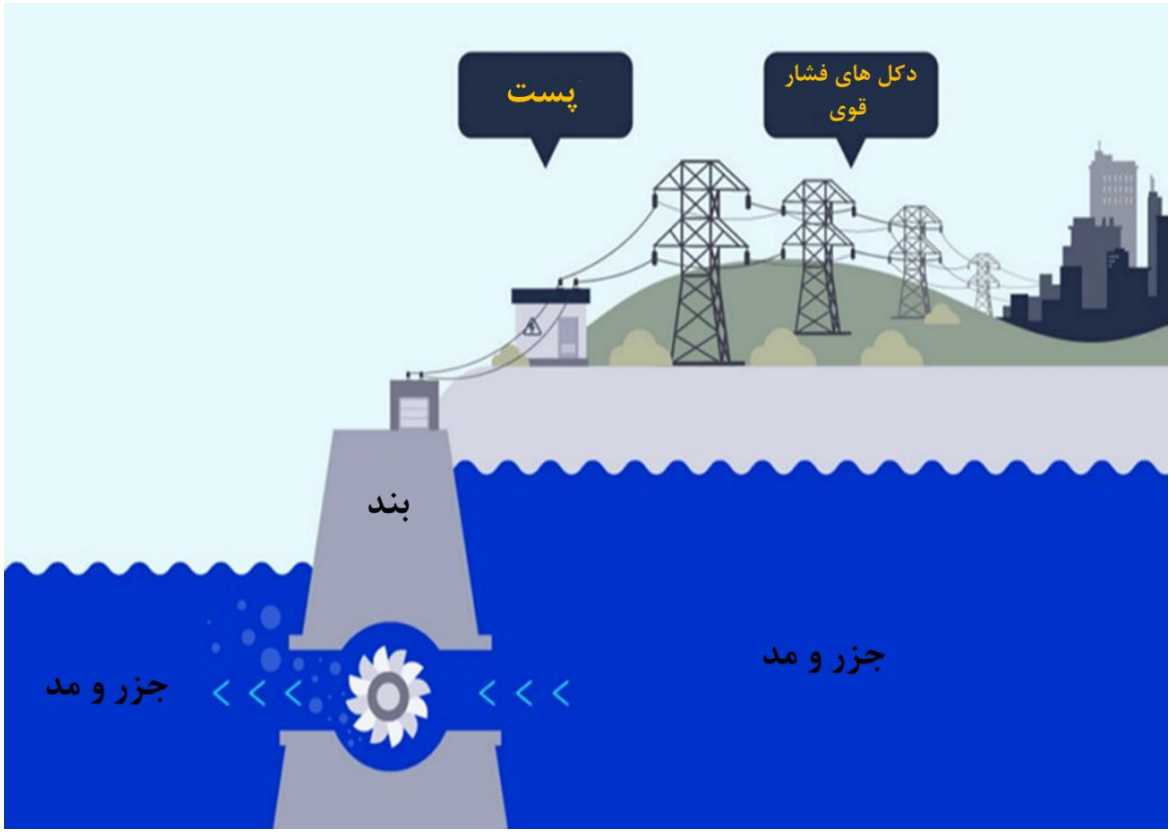
تا سال ۱۹۹۹ که نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای اکیناوا به بهره‌برداری درآمد، این نیروگاه، اولین واحد PHS در جهان بود که از آب شور دریا برای ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌کرد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

ظرفیت نصب‌شده و ظرفیت ذخیره‌ی انرژی این نیروگاه به همراه دیگر ایستگاه‌های SPHS موردبحث در این بخش در جدول ۳ نمایش داده‌شده است. هزینه‌ی ساخت این نیروگاه ۳۰ میلیارد ین (حدود ۲۳۲ میلیون یورو) بود (یاشتربسکا[3]، ۲۰۱۸). در طی پنج سال اول بهره‌برداری، این نیروگاه به‌عنوان یک مرکز تحقیقاتی استفاده شد. این نیروگاه تا سال ۲۰۱۶ و قبل از برچیده شدن آن به دلیل عدم رشد، پیش‌بینی‌شده در تقاضای انرژی در جزیره اوکیناوا، برق جزیره اوکیناوا را تأمین می‌کرد (یاشتربسکا، ۲۰۱۸). مشابه نیروگاه جزر و مد لارانش، تجربه به‌دست‌آمده از SPHS اوکیناوا یک دستاورد مهم برای طرح‌های بعدی بوده است.

در ایرلند، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دریایی گلینسک[4] در سال ۲۰۱۲ طراحی شد. این نیروگاه، شامل یک ایستگاه ۹۶۰ مگاواتی بود که می‌توانست سالانه تا ۶ گیگاوات ساعت انرژی را ذخیره کند. برنامه ساخت این نیروگاه بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ برنامه‌ریزی شد ، اما تاکنون به بهره‌برداری نرسیده است. به‌منظور تأمین برق بر اساس منابع تجدید پذیر در جزایر کشور یونان، چندین طرح توسعه‌یافته است. (کاتساپراکاکیس[5] و همکاران، ۲۰۱۳) دو پروژه‌ی ذخیره انرژی تلمبه ذخیره‌ای دریایی را بر روی جزایر کرتا و کاسوس پیشنهاد دادند. آن‌ها با همکاری پیمانکار برق ENET S.A نشان دادند که نصب پارک‌های بادی همراه با SPHS، یک

[1] International Energy Agency
[2] Zainol
[3] Jastrzebska
[4] Glinsk
[5] Katsaprakakis

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]



شکل ۳- شماتیک نیروگاه جزر و مدی(بریز، ۲۰۱۸)

فناوری پر امید برای مناطق ساحلی کم‌بارش است(کاتساپراکاکیس و همکاران، ۲۰۱۳).

در جزیره رودس، یک نیروگاه ۱۵۰ مگاواتی می‌تواند بیش از ٪۷۵ از کاهش انرژی بادی سالانه را فراهم آورد (کاتساپراکاکیس و کریستاکیس[1]، ۲۰۱۴). مهم‌ترین پروژه SPHS یونان برای جزیره سیفنوس است که برای کمک به دستیابی به ٪۱۰۰ تولید انرژی تجدید پذیر محلی، همراه با پارک بادی ساحلی طراحی‌شده است (کاتساپراکاکیس و مانولیس[2]، ۲۰۱۸). این پروژه در حال حاضر در مرحله تأمین منابع مالی قرار دارد. در استرالیا، پروژه PHS کولتنا[3] نتیجه‌ی همکاری بین شرکت آروپ[4] و سازمان انرژی تجدید پذیر استرالیا بود. درنهایت، در شیلی، پروژه اسپخو د تاراپاکا یک نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی است که تا سال ۲۰۲۶ به بهره-برداری می‌رسد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

۱-۳- ذخیره‌سازی انرژی تلمبه ذخیره‌ای دریایی با هد کم

تکنولوژی SPHS با هد کم به‌عنوان مهم‌ترین نوآوری در این فناوری، برای قابلیت استفاده در کشورهایی که اختلافات ارتفاعی طبیعی قابل‌توجهی ندارند، بسیار حیاتی است. در سال ۱۹۸۱، مهندس هلندی لوک لیونس[5]، پیشنهاد ایجاد یک دریاچه‌ی ذخیره انرژی در مارکمهیر[6] (یک دریاچه بزرگ در هلند) را منتشر کرد. طرح وی شامل نصب توربین‌های بادی برای پمپاژ آب درون یک دیوار گرد به ارتفاع ۱۴ متر نسبت به سطح دریا بود.آب درون دیوار به ارتفاع ۱۲ متر بالاتر از سطح دریا می‌رفت و می‌توانست زمانی که برق لازم است، از طریق توربین‌ها به بیرون حوضه توربین شود و برق تولید کند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). سپس، طرح به انواع جایگزین در مکان‌های مختلفی در هلند

[1] Katsaprakakis & Christakis
[2] Katsaprakakis & Manolis
[3] Cultana
[4] ARUP
[5] Luk Lievense
[6] Markemeer

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

جدول۲: مروری بر نیروگاه‌های جزر و مدی مربوطه و ویژگی‌های کلیدی آن‌ها(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نیروگاه	لا رانش[1]	کیسلا یا گوبا[2]	جیانگ‌شیا[3]	آناپولیس[4]	سیوا[5]
مکان	فرانسه	روسیه	چین	کانادا	کره جنوبی
مساحت مخزن (Km^2)	۲۲	۱/۱	۱/۵	۶	۴۲/۴۴
حجم مخزن (Mio. Mm^3)	۱۸۴	–	۵/۱۴	–	۱۴۷
تاریخ راه‌اندازی	۱۹۶۸	۱۹۸۰	۱۹۸۴	۲۰۱۱	
اپراتور	ادف[6]	روس‌هیدرو[7]	–	نووا اسکوشیا پاور اینک[8]	کواتر[9]
توان نصب‌شده (MW)	۲۴۰	۰/۴	۴/۱	۲۰	۲۵۴
تولید انرژی سالانه (GWh)	۵۴۰	۱	۷/۲	۵۰	۵۵۲
دامنه جزر و مد متوسط (m)	۸	۲/۴	۵/۰۸	۶/۵	۵/۶

مانند هارینگفلئت[10]، برووررزدام[11] و آیسلمیر[12] و تکامل یافت. درنهایت، طرح نهایی با دیوار ۷۰ متری در برووررزدام مطرح شد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

پس از پیشنهاد لیونس، در سال ۲۰۰۷، مشاوره کِما[13] و شرکت لیونس[14] طراحی جزیره‌ی انرژی جدیدی را توسعه دادند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). این طراحی شامل حوضه‌ای عمیق به عمق ۴۰ متر که به‌عنوان مخزن پایینی عمل می‌کند و دریا به‌عنوان حوضه‌ی بالایی استفاده می‌شود. این مفهوم به نام "والمیر[15]" شناخته می‌شود که با کاهش ارتفاع دیواره‌ها، نگرانی‌های مربوط به شکاف‌های دیواره‌ها را کاهش می‌دهد که یکی از نگرانی‌هایی بود که طرح سال ۱۹۸۱ را تحت تأثیر قرار داده بود.در سال ۲۰۱۸، دولت فدرال بلژیک تأمین مالی برای برنامه‌ریزی جزیره‌ی چندمنظوره(آی‌لند)[16] را فراهم کرد، که شامل عملیات ذخیره انرژی (PHS با هِد پایین)، تولید انرژی تجدیدپذیر (نصب توربین‌های بادی جدید و پنل‌های خورشیدی شناور) و آبزی‌پروری دریایی است(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

اجرای این طرح به دلیل مشکلات مربوط به دریافت مجوز، به تأخیر افتاده است. همچنین، چارچوب تنظیمی مربوط به ذخیره‌سازی انرژی در حال حاضر به دلیل درجه‌ی زیادی از عدم قطعیت، با مشکل مواجه است که انتظار می‌رود با پذیرش بسته "انرژی پاک برای همه اروپایی‌ها"، این عدم قطعیت کاهش یابد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

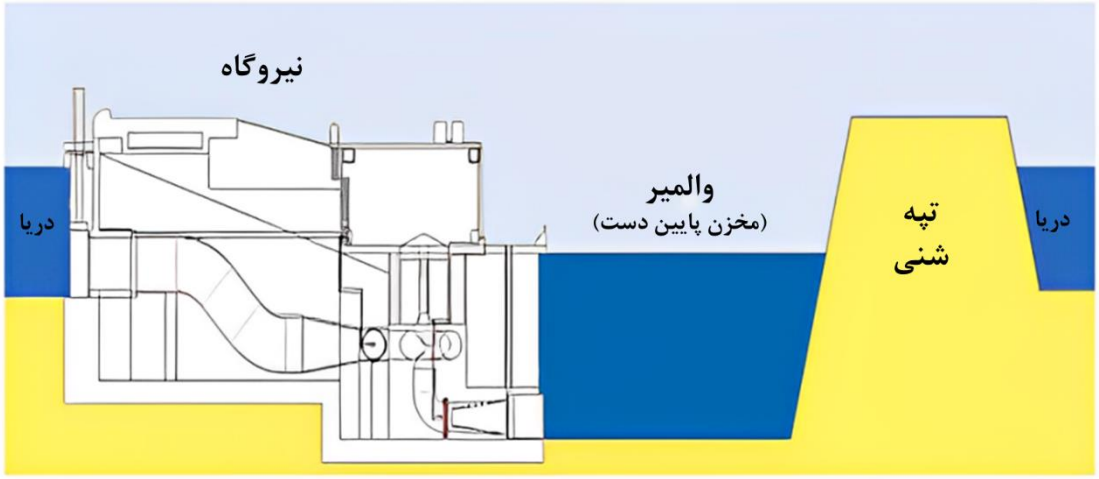
برخی از پروژه‌های PHS با هدکم، مانند دلتا۲۱، به سیستم حفاظت در برابر سیل کشورها تبدیل‌شده‌اند. دلتا۲۱ به‌طور خاص نیازهای ایمنی در برابر سیل و ذخیره انرژی در منطقه هارینگویت در هلند جنوبی را پوشش می‌دهد. این پروژه به منظور ایمنی در برابر سیل، با ساخت موانع جدید برای مقابله با امواج سیل و استفاده از ایستگاه‌های پمپاژ برای مدیریت تخلیه آب در زمان طوفان‌های شدید، به کنترل و کاهش خطرات سیل می‌پردازد. برای بهره‌برداری حداکثر از ایستگاه پمپاژ، یک دریاچه‌ی ذخیره‌سازی اطراف آن ساخته می‌شود تا به‌عنوان یک مخزن ذخیره‌سازی انرژی روزانه، عمل کند. طرح دلتا۲۱[17] یک ظرفیت تولید برق ۱۹۲۰ مگاوات و

[1] La Rance
[2] Kislaya Guba
[3] Jiangxia
[4] Annapolis
[5] Sihwa
[6] EDF(Électricité de France)
[7] RusHydro
[8] Nova Scotia Power Inc
[9] Kwater(Korea Water Resources Corporation)
[10] Haringvliet
[11] Brouwersdam
[12] IJsselmeer
[13] KEMA (Keuring van Elektrotechnische Materialen)
[14] Lievense BV
[15] Valmir
[16] iLand
[17] Delta21

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

جدول ۳: بررسی ویژگی‌های پروژه‌های PHS آب دریا با هِد زیاد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

PHS	اوکیناوآ[1]	گلینسک[2]	کولتنا[3]	رودس[4]	کرِت[5]	کاسوس[6]	اسپِخو دِ تاراپاکا[7]
سال برنامه‌ریزی	۱۹۹۹	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۳	۲۰۱۳	۲۰۲۱
توان نصب‌شده (MW)	۳۰	۹۶۰	۲۲۵	۱۶۰	۶۴.۵	۴	۳۰۰
اختلاف هد، میانگین (m)	۱۴۲	۲۹۲	۲۶۰	۲۷۰	۵۰۰	۴۷۲.۵	۶۰۴.۷۵
ظرفیت ذخیره‌سازی (MWh)	۱۸۸	۶۱۰۰	۱۷۷۰	۱۶۰۳	۲۳۴۶	۵۱۶	۳۵۴۰۰



شکل ۴- شماتیک نیروگاه تلمبه ذخیره ای با هِد کم (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

[1] Okinawa
[2] Glinsk
[3] Cultana
[4] Rhodes
[5] Crete
[6] Kasos
[7] Espejo de Tarapacá

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

جدول۴: ویژگی‌های پروژه‌های PHS بررسی‌شده با هِد کم(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نام پروژه	طرح لیونس[1]	کِما	تی‌ای‌اس‌آی[2]	آی‌لند	دلتا۲۱
سال برنامه‌ریزی	۱۹۸۶	۲۰۰۷	۲۰۱۴	۲۰۱۸	۲۰۲۱
کشور	هلند	هلند	تایوان	بلژیک	هلند
قدرت نصب‌شده (MW)	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۵۰	۱۹۲۰
ظرفیت ذخیره‌سازی (GWh)	۳۰	۲۰	۲۰	۲.۲	۱۴.۴

ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۴.۴ گیگاوات‌ساعت را در نظر گرفته که در حال حاضر در مرحله بررسی امکان‌پذیری قرار دارد (دی ویلدر)[3] (اونواچو)[4]. جدول ۴ ویژگی‌های اصلی پروژه‌های SPHS با هِد پایین موردبررسی را نشان می‌دهد.

۲- ملاحظات احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ساحلی

برای احداث نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای ساحلی باید ملاحظات ویژه‌ای را مد نظر قرارداد. ابتدا با تجزیه و تحلیل تجربیات ساخت نیروگاه‌های برق‌آبی جزر و مدی[5] آغاز می‌شود و سپس بر ذخیره‌سازی انرژی برق‌آبی با آب دریا (SPHS)تمرکز می‌کند. برای SPHS، انتخاب اصلی بین مخزن بالا و پایین توضیح داده‌شده و مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست شناسایی‌شده‌اند.

۲-۱- نیروگاه‌های جزر ومدی

نیروگاه‌های PHS با هِد بالا اغلب از توربین‌های فرانسیس برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، اما این توربین‌ها برای عملیات با هِد پایین طراحی نشده‌اند. در مقابل، ایستگاه‌های انرژی جزر و مدی از عملیات با هِد پایین انرژی استخراج می‌کنند و بنابراین به‌عنوان یک مرجع برای PHS با آب دریا و هد پایین در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۱-۱- ویژگی‌ها و طراحی مکانی نیروگاه‌های جزر و مد

مکان‌های دارای پتانسیل برای نیروگاه‌های جزر و مد با در نظر گرفتن میانگین تغییرات جزر و مد، قابلیت اجرای نیروگاه و تأثیرات زیست‌محیطی موردبررسی قرار می‌گیرند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). طراحی یک نیروگاه جزر و مدی (TPP) بستگی به هدف ساخت و استفاده‌ی ثانویه احتمالی دارد. برای همین، نیروگاه‌های جزر و مدی ساخته‌شده اندازه‌های مختلفی دارند. یکی از نمونه‌های موفق نیروگاه‌های جزر و مد، نیروگاه لا رانش است که به‌صورت تجاری فعالیت می‌کند و انرژی لازم را برای مناطق مرزی (استان برتانی، انگلستان) را فراهم می‌آورد (وانگ و وانگ[6]، ۲۰۱۹). هدف از ساخت نیروگاه کیسلا یا گوبا بررسی کاربرد روش ساخت نیروگاه شناور در مقیاس بزرگ بود. این مکان، باوجوداینکه دامنه‌ی جزر و مد بسیار زیادی ندارد، به دلیل شکل حوضه و نزدیکی به شبکه انتخاب‌شده است(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۱-۲- ساخت سد و گذرگاه

یک نیروگاه جزر و مد (TPP) به‌طور عمومی، شامل یک ایستگاه قدرت، یک‌راه آبی با دریچه، سدها و یک قفل ناوبری است. یک جاده بر روی سد قرار دارد که برای اتصال دو سر آب‌شکن[7] و بهره‌برداری بهتر از نیروگاه، مفید است. تاکنون، تمام TPPهای ساخته‌شده از تکنیک بندر جزر و مد استفاده می‌کنند (توسعه‌های مهندسی هیدرولیک)[8] که شامل بستن ورودی دریاچه در یک نقطه‌ی باریک با سدها و ایستگاه قدرت است. طراحی TPPها به‌طورکلی، محدود به هزینه‌های سرمایه‌گذاری است که به‌شدت به روش ساخت انتخابی وابسته است (او'رورک و همکاران، ۲۰۱۰). در لارانش، بیشترین هزینه، مربوط به ساخت سد بود. استفاده از یک سد (روش ساخت‌وساز خشک) برای ساخت خاک‌ریز و نیروگاه به‌منظور کنترل جریان‌های زیاد در طول جزر و مد، به دلیل بسته شدن خلیج انتخاب شد(آنسورنا رویز و

[1] Lievense Plan
[2] TIESI (Technical Institute for Energy and Sustainable Development)
[3] De Vilder
[4] Onwuachu
[5] Tidal power
[6] Wang & Wang
[7] Breakwaters
[8] Developments_in_Hydraulic_Engineering

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

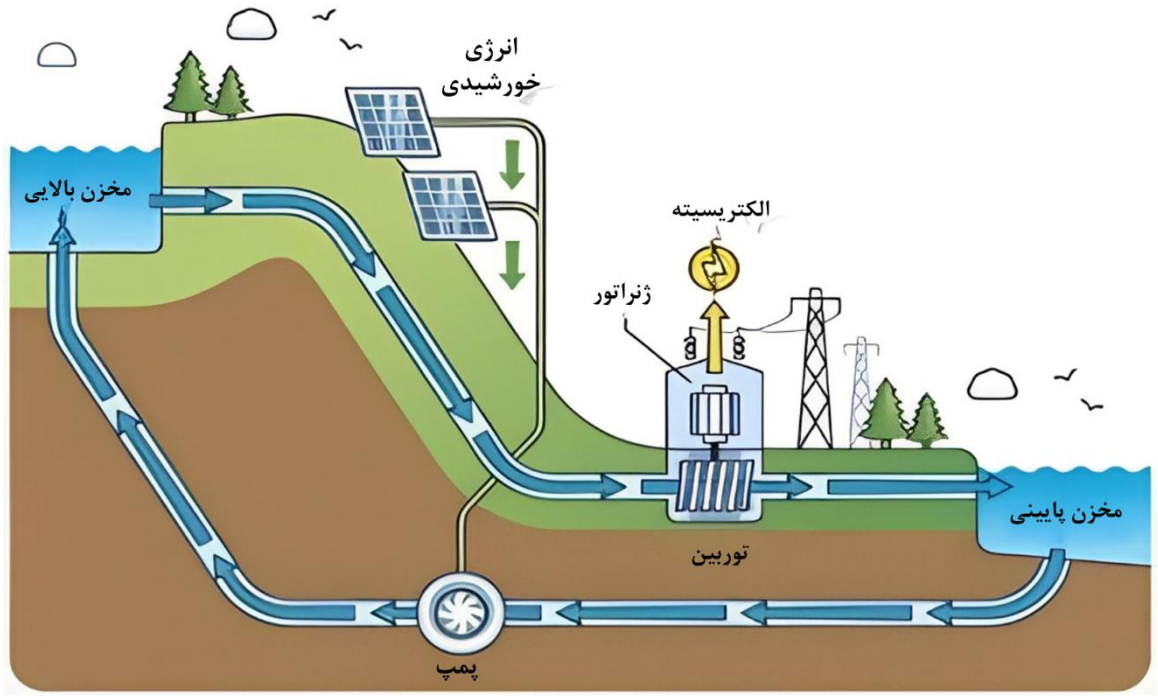
همکاران، ۲۰۲۲). تجربه‌ی کیسلا یا گوبا نشان داد که روش ساخت ایستگاه تولید برق شناور (روش ساخت تر) می‌تواند هزینه‌ی دیوار را کاهش دهد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). روش شناور نسبت به روش‌های سنتی با دیوار، هزینه‌ها را به یک سوم کاهش داد و نشان داد که روش ساخت نیروگاه شناور می‌تواند هزینه‌ی سد را کاهش دهد.

۲-۲- ذخیره‌سازی انرژی برق آبی با هِد کم

ویژگی‌های کلیدی سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی تلمبه ذخیره‌ای در دریا، به هنگام طراحی آنها باید مورد توجه قرار بگیرند. مخازن مورد نیاز و طراحی آنها، تنظیمات سیستم‌های PHS با سرریز کم برای عمق‌های مختلف آب، خطرات احتمالی ازجمله مقابله با سیلاب، مواد و مصالح مورد نیاز برای، اقدامات جلوگیری از نشت و مهم‌ترین مواردی که سبب عدم کارکرد صحیح سیستم می‌شود از این دست مسائل است.

۲-۲-۱- ویژگی‌های اصلی ذخیره‌سازی انرژی تلمبه ذخیره‌ای در دریا

یک ساختمان سد (به شکل دایره‌ای یا سایر شکل‌های بسته)، با کنترل سطح آب درون مخزن و حفظ تفاوت ارتفاع بین داخل و بیرون، امکان ذخیره‌ی انرژی را فراهم می‌کند.



شکل ۵- شماتیک نیروگاه تلمبه ذخیره ای با هد زیاد(بریز، ۲۰۱۸)

ظرفیت ذخیره‌ی انرژی (E) یک مخزن PHS، توسط تفاوت ارتفاع و مساحت سطح (معادله (۱)) تعیین می‌شود. برای یک "مخزن انرژی"، هزینه‌های ساخت سد به‌طور خطی با محیط آن افزایش می‌یابد.

$$E = mgh = A\rho g \frac{H_{max}^2 - H_{min}^2}{2} \qquad (1)$$

(ρ)، چگالی آب به کیلوگرم بر مترمکعب، (A)، مساحت حوضچه‌ی به مترمربع، (m)، جرم آب به کیلوگرم، (g)، شتاب گرانشی به متر بر ثانیه مربع، (h)، اختلاف ارتفاع به متر، (E)، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی به ژول، (H_{max}) حداکثر اختلاف ارتفاع بین حوضچه بالا و پایین به متر و (H_{min})، حداقل اختلاف ارتفاع بین حوضچه بالا و پایین به متر می‌باشند.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

۲-۲-۲- مخزن بالا یا پایین

انتخاب استفاده از دریا به‌عنوان مخزن بالا یا پایین برای طرح‌هایی که از اختلاف ارتفاع طبیعی در طول خط ساحلی با صخره‌ها استفاده می‌کنند، روشن و ساده است. بااین‌حال، برای تأسیسات فراساحلی، هر دو گزینه قابل‌بررسی هستند. مطالعات انجام‌شده توسط شرکت لیونس به نتیجه رسید که گزینه ترجیحی آن شامل یک مخزن داخلی بود که ۷۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار داشت (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). در سال ۲۰۰۷، شرکت کِما و لیونس فرآیند معکوسی را پیشنهاد دادند که از دریاچه داخلی به‌عنوان مخزن پایین استفاده می‌کند، که به آن "والمیر" می‌گویند. از آن زمان به بعد، تمامی مطالعات فراساحلی بر اساس اصل "والمیر" انجام‌شده‌اند، زیرا که به‌طور قابل‌توجهی حجم سد را کاهش می‌دهد.

۲-۲-۲-۲- ریسک سیل

به‌غیراز اندازه‌گیری‌های حجمی، پتانسیل سیل نیز یک جنبه اساسی دیگر است، زیرا شکستن بخش‌های سد می‌تواند خطرات قابل‌توجهی را ایجاد کند. در مناطقی که شکست سد والمیر به‌طور عمده خسارات اقتصادی به همراه دارد، شکستن مخازن بالا می‌تواند منجر به وقوع سیلی شدید شود؛ بنابراین، ضرورت تأمین سطح ایمنی بالاتر نسبت به طراحی والمیر در این مخازن اجتناب‌ناپذیر است. تحقیقات نشان می‌دهد که این اثر با احتمالات شکست طراحی برای مخازن ذخیره بالا در نزدیکی برووزرزدام (یکپارچه در خط ساحلی) و در آیسلمیر[1] (دریاچه داخلی) محاسبه‌شده است (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

در تمام ارتفاع سد و با عرض شکاف پیش‌رونده، این شکاف می‌تواند منجر به ایجاد جریان فوق بحرانی شود که پس از یک پرش هیدرولیکی به یک موج سیلاب تبدیل می‌شود. طول جریان فوق بحرانی و ارتفاع متوسط موج سیلاب به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = \sqrt[5]{\frac{\left(\frac{Q_{max}}{\pi}\right)^2}{gf^3}} \qquad (۲)$$

$$\eta_{gem} = 0.55\frac{Q_{max}}{\sqrt{ga0}\,R} \qquad (۳)$$

Rs، طول جریان فوق بحرانی از شکست سد (متر) Q_{max}، حداکثر جریان خروجی از طریق شکست (مترمکعب بر ثانیه) g، شتاب گرانشی (متر بر ثانیه مربع) f، ضریب اصطکاک کفη_{gem}، ارتفاع متوسط موج سیلاب نسبت به سطح آب اولیه (متر) a_0، عمق متوسط آب در شرایط عادی (متر) و فاصله R، از شکست سد (متر) می‌باشد.

خطر شکست به دلیل فرسایش تاج سد، براثر سرریز آب، بزرگ‌ترین تهدید برای کل سیستم است.

۲-۳- ساختار سد

در پروژه‌های PHS با هِد کم، تنوع گسترده‌ای در انواع ساختارهای سد وجود دارد که در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. هنگامی‌که اختلاف ارتفاع طبیعی در دسترس نباشد، عواملی که به این سدها آسیب می‌رساند شامل ناپایداری، ایجاد جریان آب درون خاک و روانگرایی است که با طراحی مناسب قابل کنترل هستند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). پایداری سد SPHS زمانی که سد اشباع شده می‌تواند به طور قابل توجهی، تحت تأثیر کاهش سریع سطح آب داخلی قرار گیرد. برای طراحی سد والمیر، توجه ویژه‌ای باید به پایداری شیب داخلی با در نظر گرفتن مکانیسم بالاروی در پایه سد شود. یک مکانیسم مشخص که باید برای یک مخزن بلند نزدیک خط ساحلی مورد توجه قرار گیرد، نفوذ آب‌شور است که به‌وسیله "نشت دور[2]" از فشار بالای آب درون مخزن ایجاد می‌شود. ولی بر اساس مطالعات انجام شده، مانع فنی جدی برای ساخت سد مشاهده نشده است.

۳- نیروگاه و سیستم انتقال

۳-۱- ساختار نیروگاه در ایستگاه‌های جزر و مدی

در سراسر جهان، نیروگاه‌های TPP دارای ساختاری مشابه هستند که به‌صورت یک سازه بتنی توخالی ساخته شده‌اند و شامل قسمت بالایی و پایینی است. این ساختار می‌تواند به‌عنوان یک مرجع برای ساخت نیروگاه‌های SPHS با هِد کم مورد استفاده قرار گیرد.قسمت بالایی عمدتاً شامل یک

[1] IJsselmeer

[2] Far seepage

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

سالن تعمیر و نگهداری با تجهیزات بالابر است. قسمت پایینی به‌صورت جانبی به زیر بخش‌هایی تقسیم می‌شود، هرکدام حاوی یک واحد توربین است. هر واحد توربین به یک ورودی و یک خروجی متصل شده است که یک مسیر مستقیم برای آب ایجاد می‌کند و امکان عبور آب به دو طرف با کارایی بالا را فراهم می‌سازد. جریان آب توسط دریچه‌های توربین کنترل می‌شود. برای انجام تعمیرات بر روی توربین‌ها و مسیرهای آب در شرایط خشک، نیروگاه مجهز به یک سیستم زهکشی و همچنین دروازه‌ها یا توقفگاه‌ها در انتهای هر ورودی و خروجی است. ازآنجاکه مسیرهای آب به یکدیگر متصل نیستند، کار تعمیر و نگهداری می‌تواند به‌طور جداگانه برای هر توربین و مسیر آب انجام شود.

باوجود شباهت‌های میان نیروگاه‌های TPP مورد بررسی، تفاوت‌های مهمی در ابعاد نیروگاه (جدول ۵)، شکل مسیرهای آب، موقعیت واحدهای توربین در هر نیروگاه، و ترکیب بتنی نیروگاه‌ها وجود دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً به دلیل ظرفیت نیروگاه حرارتی (TPP)، نحوه عملکرد، سطح بالاترین جزر و مد، روش ساخت و شرایط محلی ایجاد می‌شوند.

جدول ۵: مشخصات نیروگاه TPP(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

	لا رانش	کیسلا یا گوبا	آناپولیس	سیوا
عرض (متر)	۵۳.۴	۳۶	۴۶.۵	۶۱.۱
ارتفاع (متر)	۲۵	۳.۲۵	۲۳	۲۹
طول (متر)	۳۹۰	۱۸.۳	۲۵	۳۸۰
حالت عملیاتی	تولید دوطرفه	تولید دوطرفه	تک عملیاته، تولید در جریان ساحل	تک عملیاته، تولید در جریان سیل
روش ساخت	خشک	تر	خشک	خشک
تعداد توربین‌ها	۲۴ واحد	۲ واحد	۱ واحد	۱۰ واحد

۳-۲- روش‌های ساخت نیروگاه‌های جزر و مدی

نیروگاه‌های TPP با استفاده از یکی از دو روش ساخت خشک یا تر (wet) ساخته می‌شوند، به وابستگی به خصوصیات محلی. روش‌های ساخت خشک نیازمند استفاده از کافردم[1] و خشک‌کردن محل ساخت هستند، در حالی‌که روش‌های ساخت تر به این اقدامات نیازی ندارند.برای روش ساخت تر (wet)، نیروگاه قبل از ساخت به صورت پیش‌تولیدشده و سپس با استفاده از آب به محل ساخت منتقل می‌شود. این روش برای نیروگاه TPPکیسلا یا گوبا به کار رفت (کلارک[2]، ۲۰۰۷). به‌منظور برقراری تماس قابل‌اعتماد با پایه، پایین نیروگاه کیسلا یا گوبا با استفاده از کلیدهای برشی مجهز شده بود که به عمق ۲۵ سانتی‌متر در لایه ماسه فرو شدند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

۳-۳- ساختار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دریایی و روش‌های ساخت

برای جلوگیری از کاویتاسیون در ایستگاه‌های پمپ با هِد بالا، پمپ باید در عمق زیر سطح آب مخزن پایینی قرار گیرد. در جدول ۶ عمق نصب نشان داده‌شده است. نیروگاه با هِد بالا SPHS در اوکیناوا دارای یک نیروگاه زیرزمینی است که می‌توان به آن از طریق یک شفت عمودی دسترسی داشت. این چیدمان معمولی، همچنین برای پروژه‌های گلینسک و اسپِخو دِ تاراپاکا پیشنهادشده است. برای این پروژه‌ها، نیروگاه دارای پمپ‌توربین است. اما، پروژه‌هایی مانند پیشنهادهای SPHS یونان، ساخت ایستگاه‌های جداگانه برای پمپاژ و توربین را در نظر می‌گیرند (کاتساپراکاکیس[3] و همکاران، ۲۰۱۳). برای یک حداکثر عمق حفاری، هرچه پمپ-توربین‌ها بزرگ‌تر باشند، حداکثر اختلاف سطح آب

[1] cofferdam
[2] Clark
[3] Katsaprakakis

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

موجود در والمیر کمتر می‌شود. جدول ۷ مقادیر مختلف فرو بردگی را برای پمپ-توربین‌هایی که توسط (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).برای نیروگاه دلتا۲۱ در نظر گرفته‌شده‌اند، نشان می‌دهد. توجه کنید که هر چه هر واحد پمپ-توربین بزرگ‌تر باشد، واحدهای کمتری برای تأمین قدرت موردنیاز یک نیروگاه SPHS با هید پایین نیاز است و بنابراین عرض کلی نیروگاه کاهش می‌یابد (کاهش مواد).

۳-۴- اقدامات پیشگیری از خوردگی

یک روش معمول جلوگیری از خوردگی که در بیشتر نیروگاه‌های TPP استفاده می‌شود، حفاظت کاتدی فعال است. در نیروگاه TPP لا رانش، علاوه برساخت تجهیزات از فولاد ضدزنگ و رنگ‌آمیزی پروانه‌های توربین، از حفاظت کاتدی فعال برای ۲۴ واحد توربین، ۶ دروازه سیلابی و قطعات فلزی کشتیرانی استفاده می‌شود. توان الکتریکی موردنیاز برای تأمین حفاظت کاتدی فعال در نیروگاه TPP لا رانش، ۲۰ کیلووات با مصرف سالانه ۱۵۰،۰۰۰ کیلووات ساعت می‌باشد که علاوه بر حفاظت کاتدی فعال، در نیروگاه TPP آناپولیس نیز از فولاد ضدزنگ برای تیغه‌های توربین استفاده‌شده است.

(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). بررسی‌ها پس از یک سال

جدول ۶: ویژگی‌های لوله ورودی و عمق غوطه‌وری توربین‌های پمپ برگشت‌پذیر در طرح‌های SPHS هد بالا(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نام	کاسوسا[1]	رودسیا[2]	کریته[3]	کوراچائو[4]	اوکیناوآ	اسپخو دِ تاراپاکا	کولتنا[5]	گلینسک[6]
قدرت تک پمپ/توربین (مگاوات)	۰.۵۶۰	۱.۰۷۴	۱.۱۶۲	۱۹.۸	۳۰	۱۰۰	۱۱۷	۳۰۰
اختلاف سطح (متر)	۴۷۲.۵	۲۷۰	۵۰۰	-	۱۴۲	۶۰۴.۷۵	۲۶۰	۲۹۲
عمق نصب زیر سطح دریا (متر)	۲	۱	۱	۱۸-۲۱	۲۵	۴۵-۴۰	-	۴۵-۴۰
طول لوله ورودی (آب دریا) از ساحل (متر)	۶۳۵	۲۰	۴۰۰	-	۲۷	۳۴۰	-	-
عمق نصب لوله ورودی (آب دریا)	۱۵	۱۸	۲۰	-	۸	۱۵.۵	-	۲۰-۱۵

جدول ۷: ابعاد نیروگاه و غوطه وری برای ویژگی های مختلف پمپ-توربین(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

	۱ جایگزین	۲ جایگزین	۳ جایگزین	۴ جایگزین	۵ جایگزین
تخلیه پمپ (مترمکعب بر ثانیه)	۲۷	۶۰	۱۰۰	۱۶۰	۲۰۰
توان پمپ (مگاوات)	۵	۱۱.۱	۱۸.۵	۲۹.۶	۳۷
زیرآب (متر)	۲.۴	۳.۶	۴.۷	۵.۹	۶.۶
عرض تخمینی نیروگاه (متر)	۳۳۲۰	۲۲۲۸	۱۷۲۲	۱۳۷۲	۱۲۱۸

عملیات (با نرخ دسترسی ۹۹٪) نشان داد که تنها نقاط کوچکی از خوردگی حفره‌ای بر روی پروانه وجود دارد. این نشان‌دهنده‌ی اثربخشی حفاظت کاتدی فعال است.

اقدامات جلوگیری از خوردگی مواد می‌تواند بسیار هزینه‌بر باشد.

۳-۵- اقدامات ضد رسوب

رسوب‌گذاری دریایی، که به‌عنوان تجمع ناخواسته موجودات دریایی در سطح‌های غوطه‌ور در دریا تعریف می‌شود، یک عامل مهم هم از دیدگاه اقتصادی (یبرا و دام-یوهانسون[7]، ۲۰۰۴) و هم از دیدگاه زیست‌محیطی است.

مشکلات مربوط به رسوب‌گذاری به‌طورکلی در نیروگاه‌های TPP رخ می‌دهد و باعث تخریب سازه و فراهم کردن شرایط

[1] Kasosa
[2] Rhodesa
[3] Cretea
[4] Curaçao
[5] Cultana
[6] Glinsk
[7] Yebra & Dam-Johansen

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

برای استقرار موجوداتی مانند جلبک‌ها و صدف‌ها می‌شود که می‌توانند تا حدی مسیر آب را مسدود کنند. برای جلوگیری از رسوب‌گذاری، در تمامی نیروگاه‌های TPP از پوشش‌های ضد رسوب و تمیزکاری منظم استفاده می‌شود. تحقیقات (چمپ[1]، ۲۰۰۰) نشان داده‌اند که سطوحی که دچار رسوب‌گذاری شده‌اند نیاز به فعالیت‌های مکرر نگهداری و تمیزکاری دارند که هزینه قابل‌توجهی را به همراه دارند.

نیروگاه کیسلا یا گوبا TPP مجهز به واحد الکترولیز برای تولید کلر است که در فصل تکثیر برای دورنگه داشتن میکروارگانیسم‌های آبی از راه‌آب استفاده می‌شود. یک تحقیق در سال ۱۹۹۸ بیان کرد که واحد الکترولیز به مدت ۲۰ سال از راه‌آب و توربین در برابر رسوب محافظت کرده است. علاوه بر این، تجربه نیروگاه کیسلا نشان داد که کلر در خارج از لوله اصلی تشخیص داده نشده است.

بااین‌حال، طبق آژانس شیمیایی اروپا[2] ، کلر می‌تواند تهدیدی برای گیاهان و جانوران اطراف باشد(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، تجربه آناپولیس نشان داد که استفاده از کلر در آب دریا باعث تجمع منگنز می‌شود که هر سه تا چهار سال باید خراشیده شود. امروزه تمرکز بر روی جایگزین‌هایی مانند تخریب الکتروشیمیایی است که آسیب کمتری به محیط‌زیست اطراف وارد می‌کند. این تکنولوژی از میدان‌های الکتریکی برای کشتن ارگانیسم‌های رسوبی به‌طور مستقیم استفاده می‌کند، بدون تولید مواد ضدعفونی‌کننده واسطه‌ای مانند کلر (چن و نوی[3]، ۲۰۲۱). علاوه بر این، پس از ممنوعیت استفاده از رنگ‌های مبتنی بر تری‌بوتیل‌تین (TBT) که برای محیط‌زیست مضر هستند، نیاز به تکنولوژی‌های جایگزین با اثربخشی مشابه و بدون اثرات منفی بر گیاهان و جانوران آبی افزایش‌یافته است.

۴- پمپ توربین‌ها

بهره‌وری گردشی نیروگاه‌های ذخیره تلمبه‌ای (PHS) متعارف در مناطق کوهستانی با ارتفاع بالا می‌تواند بین ٪۷۰ تا ٪۸۵ باشد (رحمان[4] و همکاران، ۲۰۱۵). بااین‌حال، واحدهای پمپ-توربین این نیروگاه‌ها برای کاربردهای با ارتفاع پایین کارآمد نیستند. توان موجود (W) بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \rho . g . H . Q . \eta \qquad (۴)$$

ρ چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) ، g شتاب جاذبه (متر بر ثانیه مربع) ، H اختلاف ارتفاع بین مخازن (متر) است، Q نرخ جریان حجمی (مترمکعب بر ثانیه) و η بازدهی کلی نیروگاه است.

معادله‌ی (۴) نشان می‌دهد که برای هِدهای پایین، نرخ جریان حجمی باید افزایش یابد تا توان بالایی تولید شود (هانت[5] و همکاران، ۲۰۱۸). برای محدود کردن اتلاف سیستم، برای تخلیه‌های بزرگ قطر لوله‌ها و پروانه‌های پمپ-توربین نیز باید بزرگ باشد تا سرعت جریان پایین نگه‌داشته شود.

در جدول ۸، انواع مختلف پمپ-توربین‌هایی که برای کاربردهای با هِد کم مناسب هستند، نشان داده‌شده است. اخیراً پمپ-توربین‌های ضد چرخش به‌عنوان یک تکنولوژی امیدوارکننده برای سیستم‌های پمپاژ و ذخیره انرژی با هِد کم در نظر گرفته‌شده‌اند. در مقایسه با پمپ-توربین‌های سنتی، نوع ضد چرخش، می‌تواند اندازه‌ی کوچک‌تری داشته باشد و بازدهی بالاتری را برای محدوده گسترده‌تری از هِدها ارائه دهد (فورکاوا[6] و همکاران، ۲۰۰۷) داشتن پمپ-توربین‌های قادر به کار با سرعت‌های متغیر، امکان بهره‌وری بالا و تولید توان بیشتر در محدوده وسیع‌تری از هدها را فراهم می‌کند (بوکِل و جانینگ[7]، ۲۰۰۵). بااین‌حال، هزینه‌ی سیستم‌هایی با سرعت متغیر حدود ٪۳۰ بیشتر از سیستم‌هایی با سرعت ثابت است؛ بنابراین، انتخاب هر گزینه، بستگی به عوامل تکنولوژیکی، اقتصادی و میزان تقاضا دارد (هانت[8] و همکاران، ۲۰۲۰) ، حتی با وجود اینکه واحدهای با سرعت متغیر تضمین می‌کنند که نفوذ

[1] Champ
[2] European Chemicals Agency
[3] X. Chen & Noy
[4] Rehman
[5] Hunt
[6] Furukawa
[7] Bocquel & Janning
[8] J. D. Hunt

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

انرژی‌های تجدید پذیر بالاتر باشد (جاوید[1] و همکاران، ۲۰۱۹).

۵- جنبه‌های محیط‌زیستی

مناطق ساحلی دریایی که ارزش‌های بالایی از خدمات اکوسیستمی و استفاده‌های متعدد دارند، اغلب با تضادهایی روبه‌رو می‌شوند (مارچلی[2] و همکاران، ۲۰۱۸). کاربردهای نیروگاه‌های آبی همراه با اثرات زیست‌محیطی مختلفی هستند: برخی از این اثرات، تفاوت چندانی با اثرات زیرساخت‌های ساحلی مانند بندرها و سازه‌های ساحلی ندارند، درحالی‌که برخی دیگر به فناوری وابسته بوده و به‌طور اصلی، منجر به مرگ ماهیان می‌شوند، به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم (شیلت[3]، ۲۰۰۶). مناطق حساس از لحاظ اکولوژیک نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و ارزیابی جامع اثرات بر اکوسیستم هستند. هیدرودینامیک و مورفولوژی کف دریا دو عامل مهم هستند که در طول تمام فازهای ساخت و ساز تحت تأثیر قرار می‌گیرند و تأثیراتی بر تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم دارند (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). به‌طور خاص، اثرات زیر مطرح‌شده است:

(۱) تغییرات در شوری و لایه‌بندی اکسیژن که بر نرخ تجزیه مواد آلی تأثیر می‌گذارند، (۲) افزایش تیرگی آب ساحلی که بر کارایی فتوسنتزی تولیدکنندگان اولیه اثر می‌گذارد، (۳) مختل شدن انتقال مراحل مختلف تکاملی ماهی که تهدیدی برای مناطق مرتع ماهی‌ها می‌باشد و فقدان پیچیدگی ساختاری محیط‌زیست که بر انواع ماهیان و پرندگان تأثیر می‌گذارد.تأثیرات نیروگاه‌های آبی بر ماهیان محلی و مهاجر اصلاح می‌شود اساساً با طراحی توربین‌های محیط‌زیستی (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)، نصب صفحات حفاظت ماهی و ساخت مسیرهای گذرگاه ماهی که به ماهی‌ها اجازه عبور از نیروگاه‌های آبی یا سدها را می‌دهد. با توجه به نیازهای مختلفی که توسط نهادهای مختلف محیط‌زیستی اداره می‌شود (مانند (WWF)[4]سوئیس و شبکه رودخانه‌های اروپا که به هماهنگی کمپین بازگشت ماهیان سالمون و انجمن سومون-رین[5] مشارکت دارند(آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول۸: مروری بر توربین‌های پمپ برگشت‌پذیر موجود (RPT) (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نوع پمپ-توربین	پمپ‌های جریان محوری (استفاده‌شده به‌عنوان توربین – PAT)	PAT های جریان مختلط	توربین‌های پمپ شعاعی	توربین پیچ ارشمیدس	پمپ-توربین جابجایی مثبت
محدوده ارتفاع عملیاتی (متر)	۱-۵	۵-۱۵	>۶۰	۲-۱۰	-
ویژگی‌ها	نرخ جریان تا ۱۰۰۰ لیتر در ثانیه	نرخ جریان ۵۰–۱۵۰ لیتر در ثانیه	توان معمولاً بیش از ۵۰ مگاوات	نرخ تخلیه تا ۱۵ مترمکعب در ثانیه. هزینه‌ی نصب و نگهداری کم، در حالت توربین بازدهی تا ۹۰٪، اما بازدهی با تغییر سطح آب به‌شدت کاهش می‌یابد ،در مقایسه با پمپ-توربین‌های معمولی، بیشتر دوستدار ماهی هستند	سرعت خاص کم به‌عنوان میکرو توربین‌های هیدرو با فشار تا ۵ بار (۵۱ متر) با بازدهی بین ۶۰٪–۸۰٪ آزمایش‌شده‌اند با توجه به‌سرعت پایین، می‌توانند دوستدار ماهی در نظر گرفته شوند.

[1] Javed
[2] Marcelli
[3] Schilt
[4] World Wildlife Fund
[5] Saumon-Rhin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

۶- بحث

بیشتر تجربیات در زمینه تکنیک‌های تولید انرژی در آب شور دریا، به‌واسطه‌ی انواع مختلف نیروگاه تولید برق بوده است. تنها فناوری SPHS که تاکنون اجراشده، نیروگاه اوکیناکا است، بااین‌حال چندین پروژه دیگر در آینده نزدیک مانند پروژه SPHS اسپِخو دِ تاراپاکا در در انتظار تامین مالی جهت اجرا هستند. درزمینه PHS با هد کم، هنوز هیچ طرحی اجرانشده است.

تجهیزات نصب‌شده در محیط دریایی نسبت به آب‌های تازه بیشتر دچار زنگ‌زدگی می‌شوند. همچنین، تجهیزات در آب‌های دریایی میکروارگانیسم‌هایی مانند رسوبات را جذب می‌کنند که می‌توانند تجهیزات را خراب کرده و کارایی آن‌ها را کاهش دهند. چندین تکنیک برای مقابله با این مشکلات در نیروگاه‌های حال حاضر و در نیروگاه اوکیناکا SPHS مورداستفاده قرارگرفته‌اند. تدابیر مؤثر برای جلوگیری از زنگ‌زدگی شامل حفاظت کاتدی، استفاده از مواد مقاوم در برابر زنگ‌زدگی مانند فولاد ضدزنگ، FRP، GRP و استفاده از پوشش‌های رنگی هستند. همچنین، تدابیر ضد رسوب، شامل استفاده از بیوسایدهای طبیعی در پوشش‌ها و پوشش‌های ضد رسوب غیرچسبان می‌باشند. بیشتر نیروگاه‌های TPP تولید برق در نیمه دوم قرن بیستم ساخته شدند، بنابراین از تکنیک‌های ضد رسوب و ضد زنگ‌زدگی آن دوره استفاده می‌کنند. این مرور نشان می‌دهد که امروزه پتانسیل بالقوه‌ای برای تحقیق در زمینه تکنولوژی‌های جدید و دوستدار محیط‌زیست برای جلوگیری از رسوب و زنگ‌زدگی وجود دارد.

پنل‌های خورشیدی شناور نشان داده‌اند که با کاهش تبخیر آب و همچنین خنک کردن و افزایش کارایی عملیات خورشیدی، ارزش مشترکی با مخازن نیروگاه‌های آبی دارند. به همین ترتیب، ادغام فناوری خورشیدی شناور با تأسیسات ذخیره انرژی پمپاژی (PHS) می‌تواند همین ارزش مشترک را ارائه دهد.

۷- نتیجه‌گیری

برای نیروگاه‌های پمپاژ با هِد کم، توصیه می‌شود که در آب‌های کم‌عمق (۵ تا ۱۰ متر) از یک مخزن بالا استفاده شود، درحالی‌که در آب‌های عمیق‌تر (۱۰ تا ۳۰ متر)، استفاده از جایگزین "والمیر" بهتر است اگر به توازن بین حجم حفر و ساخت سد نگاه‌دارید. بااین‌حال، استفاده از یک مخزن بالا در آب‌های کم‌عمق (نزدیک به سواحل) ممکن است نیاز به یک سطح ایمنی بالاتر داشته باشد به دلیل افزایش خطر سیل در مناطق اطراف. بااینکه افزایش سطح ایمنی هزینه‌های بیشتری را در پی دارد، اما منتظر نیستیم که این هزینه بیشتر از جایگزین "والمیر" با تفاوت بزرگ حجم حفرشده باشد.

مکانیسم‌های شکست مانند بلندشدن خاک، لوله‌گذاری، و ناپایداری ماکرو به دلیل تخلیه سریع آب، از منابع مطالعاتی به‌عنوان مهم‌ترین مسائل در ساختمان سدهای PHS با هِد کم شناسایی‌شده‌اند. با انجام طراحی مناسب، این مکانیسم‌های شکست به موانع فنی اصلی تبدیل نمی‌شوند.

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای برای تولید برق در حال حاضر یک جایگزین رقابتی برای منابع انرژی هستند که نشان می‌دهند تولید برق از آب‌های دریایی اقتصادی قابل توجیه است. به‌طور مشابه با PHS سنتی، SPHS با هِد کم در بازه‌های زمانی ۱۰ تا ۳۰ ساعت ذخیره‌سازی بسیار رقابتی خواهد بود. هزینه‌های نگهداری در آب‌های دریایی نسبت به آب‌های شیرین بالاتر است، اما تجربیات نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و نیروگاه SPHS اوکیناکا نشان می‌دهند که عملیات در این محیط امکان‌پذیر است؛ بنابراین، نشان داده‌شده است که SPHS با هِد کم می‌تواند یک فناوری رقابتی برای ادغام انرژی‌های تجدید پذیر متغیر به شبکه باشد.

همچنان که این انرژی تولیدی می‌تواند در جهت کاهش گاز های گلخانه ای و پایدار سازی محیط زیست بسیار اثر گذار باشد. تجربیات جهانی، به ویژه پس از بحران انرژی ناشی از جنگ اکراین، نشان داد که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و در ترکیب با نیروگاههای برق‌آبی می تواند امنیت انرژی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

کشورها را در دنیای بدون سوخت فسیلی تأمین کند. از این‌رو با توجه به ناترازی شدید تولید و مصرف انرژی در برخی فصول سال و برخی از ساعات شبانه روز در ایران، خلاء توسعه‌ی نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای کاملاً نمایان است. انجام مطالعات امکان‌سنجی توسعه نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و به ویژه نیروگاه‌های ساحلی با توجه به وصعت سواحل ایران و وجود کوههای مرتفع در کنار سواحل در شمال و جنوب ایران، یک پتانسیل خدادادی برای توسعه‌ی نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای با بهره‌وری بالا ایجاد کرده که در صورت برنامه‌ریزی و تدبیر می‌توان مشکل ناترازی برق را در کوتاه مدت حل کرد.

مراجع

Ansorena Ruiz, R., de Vilder, L. H., Prasasti, E. B., Aouad, M., De Luca, A., Geisseler, B., Terheiden, K., Scanu, S., Miccoli, A., Roeber, V., Marence, M., Moll, R., Bricker, J. D., & Goseberg, N. (2022). Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 160). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112281

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. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.006

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

Barnhart, C. J., & Benson, S. M. (2013). On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage. Energy Environ. Sci., 6(4), 1083–1092. https://doi.org/10.1039/C3EE24040A

Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E. M., Estanqueiro, A., Flynn, D., Gomez-Lazaro, E., Holttinen, H., Menemenlis, N., Orths, A., Eriksen, P. B., Smith, J. C., Soder, L., Sorensen, P., Altiparmakis, A., Yasuda, Y., & Miller, J. (2016). Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 65, pp. 577–586). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082

Bocquel, A., & Janning, J. (2005). Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications. 10 pp.-P.10. https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219434

Burke, D., & O'Malley, M. (2011). Factors Influencing Wind Energy Curtailment. Sustainable Energy, IEEE Transactions On, 2, 185–193. https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2104981

Champ, M. (2000). A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits. The Science of the Total Environment, 258, 21–71. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00506-4

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009a). Progress in electrical energy storage system: A critical review. In Progress in Natural Science (Vol. 19, Issue 3, pp. 291–312). Science Press. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014

Chen, H., Cong, T., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009b). Progress in electrical energy storage systems: a critical review. Prog Nat Sci. Progress in Natural Science, 19, 291–312. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014

Chen, X., & Noy, A. (2021). Antifouling strategies for protecting bioelectronic devices. APL Materials, 9, 20701. https://doi.org/10.1063/5.0029994

Clark, R. H. (2007). Elements of tidal-electric engineering. In Elements of Tidal-Electric Engineering. https://doi.org/10.1109/9780470144985

De Vilder, L. H. (n.d.). Offshore pumped hydropower storage Technical feasibility study on a large energy storage facility on the Dogger Bank.

Denholm, P., Ela, E., Kirby, B., & Milligan, M. (2010). The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. https://doi.org/10.2172/972169

Developments_in_Hydraulic_Engineering. (n.d.).

Hunt, J., Byers, E., Riahi, K., & Langan, S. (2018). Comparison between seasonal pumped-storage and conventional reservoir dams from the water, energy and land nexus perspective. Energy Conversion and Management, 166, 385–401. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.044

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

Jastrzebska, G. (2018). El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise. Energies, 11, 2812. https://doi.org/10.3390/en11102812

Javed, M., Ma, T., Jurasz, J., & Yasir, M. (2019). Solar-wind-pumped hydro energy storage systems: review and future perspective. Renewable Energy, 148. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.157

Katsaprakakis, D., & Christakis, D. (2014). Seawater pumped storage systems and offshore wind parks in islands with low onshore wind potential. A fundamental case study. Energy, 66, 470–486. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.021

Katsaprakakis, D., Christakis, D., Stefanakis, I., Spanos, P., & Stefanakis, N. (2013a). Technical details regarding

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

U. of S., : Energinet.dk (leader), D. S. W. P. D. E. and S. E. R., Elia (leader), A. G. C. K. L. R. S. U. and U., Red Eléctrica de España (leader) and ABB, COMILLAS-IIT (leader), D. I. R. E. de E. F. I. E. de F. D. E. Energinet. dk, E. R. U. of S. and G., DTU (leader), F. I. S. T. E. I. R. E. de E. D. E. Energinet. dk, E. and 50Hertz, & TenneT TSO BV (leader) and Energinet.dk. (2013). TWENTIES project.

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

Schilt, C. (2006). Developing fish passage ad protection at hydropower dams. Applied Animal Behaviour Science - APPL ANIM BEHAV SCI, 104. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.09.004

Wang, Z. J., & Wang, Z. W. (2019). A review on tidal power utilization and operation optimization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 240(5). https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/5/052015

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

Yebra, D., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology - Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. Progress in Organic Coatings, 50, 75–104. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001

Zainol, M., Ismail, N., & Zainol, I. (2017). A REVIEW ON THE STATUS OF TIDAL ENERGY TECHNOLOGY WORLDWIDE. Science International, 29, 675–680.

Zou, J., Rahman, S., & Lai, X. (2015). Mitigation of wind output curtailment by coordinating with pumped storage and increasing transmission capacity. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286276

Breeze, P. (2018). Hydropower (Energy Engineering Series). Academic Press. ISBN 978-0128129065.

International Energy Agency (IEA). (2021). Pumped Storage Hydropower Storage Capability by Countries, 2020-2026. IEA, Paris. Retrieved from https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/pumped-storage-hydropower-storage-capability-by-countries-2020-2026.

the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. Energy, 55, 619–630. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.031

Katsaprakakis, D., Christakis, D., Stefanakis, I., Spanos, P., & Stefanakis, N. (2013b). Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. Energy, 55, 619–630. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.031

Katsaprakakis, D., & Manolis, V. (2018). A hybrid power plant towards 100% energy autonomy for the island of Sifnos, Greece. Perspectives created from Energy Cooperatives. Energy, 161. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.198

Lambert, M. (1997). Bilan de la protection cathodique des ouvrages du barrage de la Rance. De la conception au résultat final. La Houille Blanche, 83(3), 36–41. https://doi.org/10.1051/lhb/1997013

Marcelli, M., Scanu, S., Frattarelli, F., Mancini, E., & Carli, F. (2018). A Benthic Zonation System as a Fundamental Tool for Natural Capital Assessment in a Marine Environment: A Case Study in the Northern Tyrrhenian Sea, Italy. Sustainability, 10, 3786. https://doi.org/10.3390/su10103786

Matevosyan, J. (2007). Wind power integration in power systems with transmission bottlenecks. 1–7. https://doi.org/10.1109/PES.2007.385962

Moradzadeh, M., Zwaenepoel, B., de Vyver, J., & Vandevelde, L. (2014). Congestion-induced wind curtailment mitigation using energy storage. ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference, 572–576. https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850483

Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). Sustainable Energy Technologies and Assessments Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 25. https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.12.001

O Rourke, F., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Tidal energy update 2009. Applied Energy, 87(2), 398–409. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.014

Onwuachu, P. R. I. (n.d.). The New Haringvliet Barrier Conceptual design for the storm surge barrier of the Deltaaa project.

Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 27, pp. 778–788). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.017

Red Eléctrica de España, Iberdrola (leader), R. E. de E. G. and C.-I., DONG Energy (leader), F. I. Energinet. dk and R. E. de E., RTE (leader), A. G. I. P. R. U. C. D. and

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]

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

Investigating the possibility of using storage pump systems in coastal areas: global experiences

Mohammad Mazlomi Mochani [1]
Ali Moridi *[2]
Mojtaba Dadkhah Tehrani [3]
Reza Khalili [4]

Abstract

In this study, the application and importance of Pumped Hydro Energy Storage (PHES) systems in coastal areas have been evaluated. These systems are considered as one of the main solutions to achieve the reduction of greenhouse gas emissions and the increase in the use of renewable energy sources by 2050. Moreover, these systems are environmentally sustainable and can help to better management of renewable energies such as wind and solar power. The main objective of this research is to investigate the use of saltwater for PHES systems in coastal and offshore areas using natural and artificial reservoirs. Hence, the various types of storage systems, materials and methods that used, and the results of economic and environmental assessments have been evaluated. The results indicate that the use of internal and external reservoirs in sea-based PHES systems not only reduces costs but also helps in environmental preservation. Additionally, low-head PHES systems can be a suitable solution for energy storage in coastal areas with low elevation topography. This study shows that with the proper implementation of PHES systems and the utilization of advanced technologies to prevent corrosion and sedimentation, this potential can be harnessed in Iran's coastal areas, especially in regions such as Assaluyeh, where the sea and mountains are very close, or the islands of Qeshm and Kish, by combining with renewable water and solar energy.

Keywords

Saltwater, renewable energy, energy storage, pumped hydro energy storage (PHES) plant

[1] Master's student in Civil Engineering, Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran
[2]*Associate Professor, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University of Tehran (a_moridi@sbu.ac.ir).
[3] Master's student in Civil Engineering, Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran
[4] PhD student in Environmental, Water and Wastewater Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Received: 2024/07/24 Accepted: 2024/07/31

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-08]