

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

محمد مظلومی موجانی<sup>۱</sup>

علی مریدی<sup>۲\*</sup>

مجتبی دادخواه تهرانی<sup>۳</sup>

رضا خلیلی<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش، به بررسی کاربرد و اهمیت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به روش تلمبه ذخیره‌ای (PHES) در مناطق ساحلی پرداخته شده 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 مطرح شده‌اند همچنین، این سیستم‌ها از نظر 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 قرار گرفته‌اند. 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 هد 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.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.  
<sup>۲\*</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران (a\_moridi@sbu.ac.ir).  
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی محیط زیست، آب و فاضلاب دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران.

## مقدمه

۲۰۳۰ افزایش یابد. دلیل اصلی این اتفاق، افزایش تولید انرژی و تمرکز آن در یک نقطه‌ی جغرافیایی است (رد الکتریکا د اسپانیا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۳).

نوسانات ظرفیت انتقال، عامل اصلی کاهش تولید انرژی است، در این صورت انرژی بادی بیش از اندازه تولید شده، نمی‌تواند به مناطق دیگری که ممکن است نیاز داشته باشند، انتقال یابد (بورک و او'مالی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱). گسترش شبکه‌های برق، هزینه‌بر و اغلب زمان‌بر است (ماتئوسیان<sup>۵</sup>، 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<sup>۶</sup> 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)<sup>۷</sup> افزایش یابد (زو<sup>۸</sup> 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 از نظر هزینه برای هر کیلووات‌ساعت برق ذخیره‌شده، شناخته می‌شوند (چن<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

تکنولوژی PHS دارای مزایای فراوانی است، اما به‌طور معمول 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. به‌عنوان مثال، (بارنهارت و بنسون<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۳) نشان داده‌اند که نسبت ذخیره‌سازی انرژی به سرمایه‌گذاری

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<sup>۱</sup> 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 برق آبی، سوخت‌های زیستی جامد و دیگر منابع تجدیدپذیر می‌شود. در حال حاضر، انرژی بادی ۳۶٪، خورشیدی ۱۲٪، برق آبی 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 غیرقابل پیش‌بینی 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<sup>۲</sup> 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

<sup>6</sup> Moradzadeh

<sup>7</sup> Pumped Hydro Storage

<sup>8</sup> Zou

<sup>9</sup> Chen

<sup>10</sup> Barnhart & Benson

<sup>1</sup> Ansorena Ruiz

<sup>2</sup> Bird

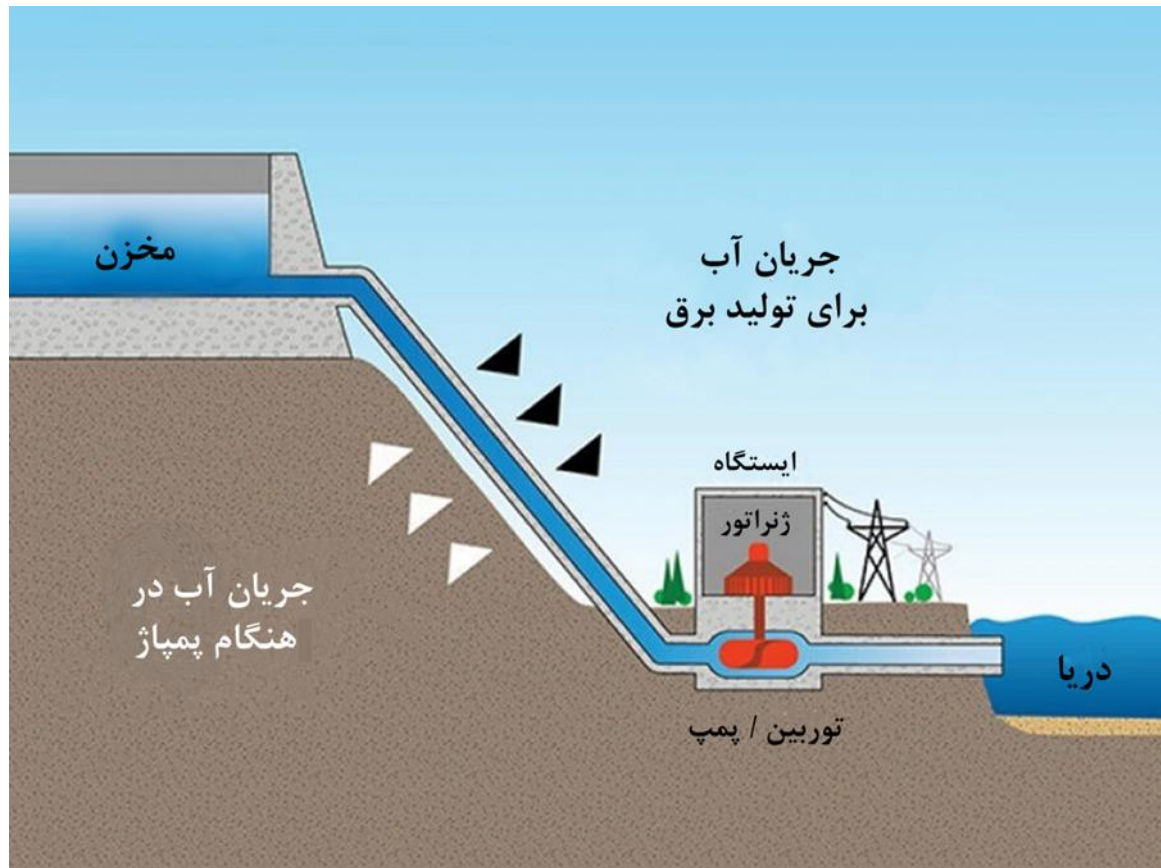
<sup>3</sup> Red Eléctrica de España

<sup>4</sup> Burke & O'Malley

<sup>5</sup> Matevosyan

چرخه کیلووات ساعت است، در حالی که هزینه‌ی PHS بین ۰.۰۲ تا ۱.۵ دلار برای هر چرخه کیلووات ساعت است (نیکولایدیس و پولیکاس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷). بنابراین، توسعه‌ی PHS برای کشورها می‌تواند هم برای محیط‌زیست و هم اقتصاد، سودمند باشد.

(شاخص عملیاتی ذخیره‌سازی انرژی<sup>۱</sup> (ESOI) برای یک باتری لیتیوم-یون ۳۲ است، در حالی که 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



شکل ۱- شماتیک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از آب دریا (بریژ، ۲۰۱۸)

شناخته شود. بر اساس تخمین انجمن بین‌المللی آب برق، ظرفیت نصب‌شده تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۲۴۰ گیگاوات افزایش خواهد یافت.

ذخیره‌سازی انرژی برق آبی با بهره‌وری از تکنولوژی نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای (PHES) با بالا بردن آب، انرژی پتانسیل گرانشی را ذخیره می‌کند. فرآیند شارژ، انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و در نهایت 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

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

ذخیره‌سازی آب دریا با پمپاژ (SPHS)<sup>۳</sup> از دو فناوری موجود تولیدشده است:

PHS با هد 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 قابل توجهی برخوردار است که باعث شده تا تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود، و PHS به‌عنوان یک فناوری امیدبخش در محیط‌های مناسب

<sup>3</sup> Storage of Potential Hydroelectric Energy with Pumped Storage

<sup>1</sup> Energy Storage Operational Index

<sup>2</sup> Nikolaidis & Poullikkas

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<sup>۱</sup> در اتریش (که در سال ۲۰۱۴ به بهره‌برداری رسید) و گسترش تأسیسات ذخیره‌سازی تلمبه‌ای لا موئلا<sup>۲</sup> 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 برق آبی بایکدیگر به‌طور 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 قابل توجهی بالاتر از بسیاری از کشورهای دیگر است. مناطق کوهستانی ژاپن برای PHES مناسب است، هرچند بسیاری از بهترین نقاط هم‌اکنون توسعه یافته‌اند.

به همین دلیل، ژاپن طرح تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از آب دریا را در جزیره اوکیناوا را برنامه‌ریزی کرده است (باربور<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). تاریخچه‌ی ژاپن نشان می‌دهد که این کشور برخی از بالاترین قیمت‌های برق را در کشورهای OECD<sup>۴</sup> تجربه کرده است (آنوتا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

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 پس از آن ایالات متحده 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 واقع شده‌اند. اگرچه در بسیاری از کشورها، توسعه، هم‌زمان با افزایش قابل توجه ظرفیت هسته‌ای بوده است، برخی کشورها مانند اتریش ظرفیت‌های قابل توجهی از PHES را نصب کرده‌اند، با وجود اینکه هیچ نیروی هسته‌ای ندارند. نرخ توسعه‌ی PHES در اروپا از سال ۲۰۰۸ کمی افزایش یافته است که

<sup>4</sup> Organization for Economic Cooperation and Development  
<sup>5</sup> Anuta et al

<sup>1</sup> Reisseck  
<sup>2</sup> La Muela  
<sup>3</sup> Barbour

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

کشور	ظرفیت نصب شده PHES (گیگاوات)	در حال ساخت (گیگاوات)	ظرفیت توان PHES به عنوان درصدی از ظرفیت نصب شده تولید برق (درصد)
ژاپن	۲۴/۵	۳/۳	۸/۵
چین	۲۲/۶	۱۱/۶	۱/۸
ایالات متحده	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

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 ایالات متحده PHES و سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی را به عنوان 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 هد کم استفاده می‌شود، زیرا این پروژه‌ها برای چند دهه است که اقدام به بهره‌برداری از تجهیزات برق آبی در آب‌های دریایی نموده‌اند. نیروگاه جزر و مد<sup>۴</sup> (TPP) لارانش اولین نیروگاه جدید جزر و مد بود که در سال ۱۹۶۶ بهره‌برداری شده است و ظرفیت نصب شده‌ی 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<sup>۷</sup> که از سال ۱۹۶۸ به بهره‌برداری آزمایشی درآمده است،

باید توجه داشت که ژاپن به طور فعال در حال پیگیری گزینه‌های دیگر ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی (EES)<sup>۱</sup> است و به عنوان پیشرو در نصب باتری‌های الکتروشیمیایی شبکه‌ای سدیم سولفور (NaS)<sup>۲</sup> توسعه یافته است (پولیکاس<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳).

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

در ایالات متحده، مانند اروپا، بیشتر نیروگاه‌های برق آبی تلمبه‌ذخیره‌ای (PHES) در دوره ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ ساخته شدند (یانگ و جکسون<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱). این دوره با افزایش قابل توجه ظرفیت‌های هسته‌ای و بحران انرژی دهه‌ی ۱۹۷۰ هم‌زمان بود (یانگ و جکسون، ۲۰۱۱). (دنهولم<sup>۵</sup> و همکاران،

<sup>5</sup> Denholm

<sup>6</sup> Tidal Power Project

<sup>7</sup> Kislaya Guba (Kislogubsk)

<sup>1</sup> Electrical Energy Storage

<sup>2</sup> Sodium-Sulfur

<sup>3</sup> Poullikkas

<sup>4</sup> Yang & Jackson



شکل ۲- نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای جزیره اوکیناوا، ژاپن  
(IEA, 2021)<sup>1</sup>

پیش‌بینی شده 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<sup>۴</sup> 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. (کاتسپراکاکیس<sup>۵</sup> 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

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<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷).

#### ۱-۲- ذخیره‌ی انرژی برق آبی دریایی با هد زیاد

تا سال ۱۹۹۹ که نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای اوکیناوا 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 مورد بحث در این بخش در جدول ۳ نمایش داده شده است. هزینه‌ی ساخت این نیروگاه ۳۰ میلیارد یورو (حدود ۲۳۲ میلیون یورو) بود (یاشتربسکا<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸). در طی پنج سال اول بهره‌برداری، این نیروگاه به‌عنوان یک مرکز تحقیقاتی استفاده شد. این نیروگاه تا سال ۲۰۱۶ و قبل از برجیده شدن آن به دلیل عدم رشد،

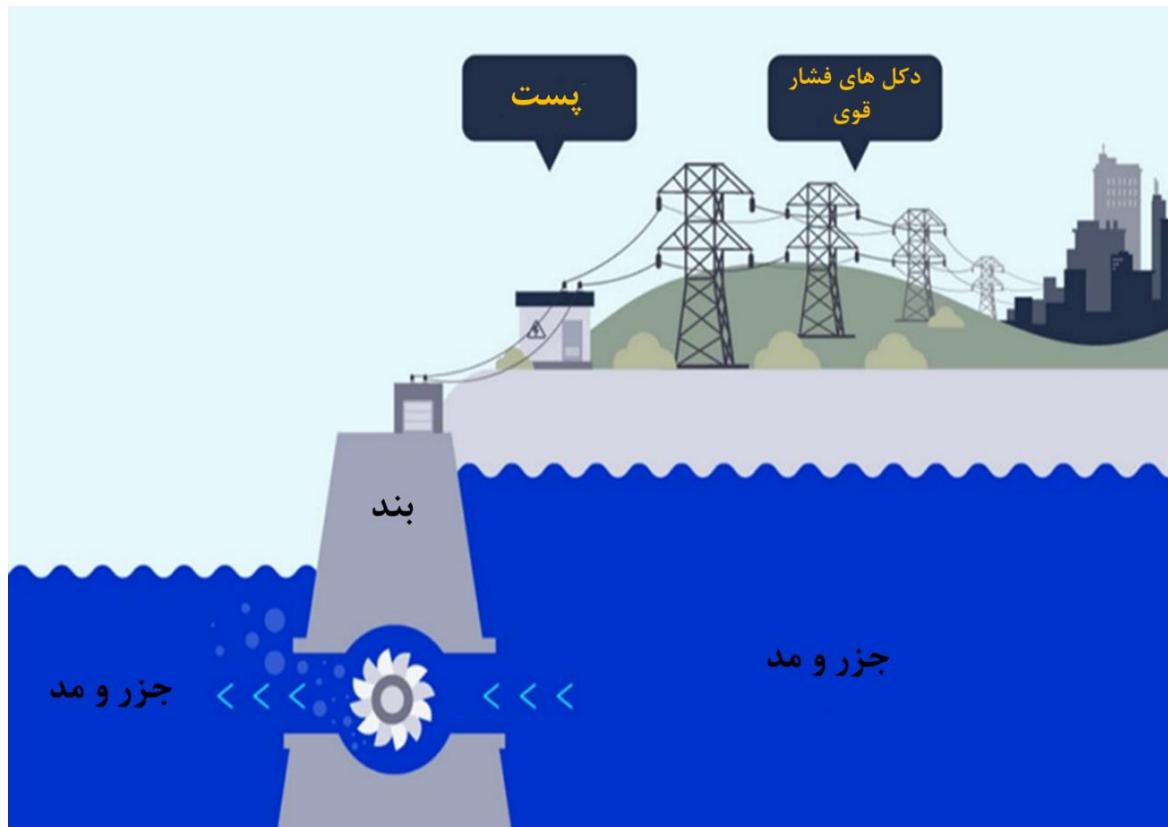
<sup>4</sup> Glinsk

<sup>5</sup> Katsprakakis

<sup>1</sup> International Energy Agency

<sup>2</sup> Zainol

<sup>3</sup> Jastrzebska



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

### ۱-۳- ذخیره سازی انرژی تلمبه ذخیره ای دریایی با هد کم

تکنولوژی SPHS با هد کم به عنوان مهم ترین نوآوری در این فناوری، برای قابلیت استفاده در کشورهایی که اختلافات ارتفاعی طبیعی قابل توجهی ندارند، بسیار حیاتی است. در سال ۱۹۸۱، مهندس هلندی لوک لیونس<sup>۵</sup>، پیشنهاد ایجاد یک دریاچه‌ی ذخیره انرژی در مارکمپیر<sup>۶</sup> (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

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<sup>۱</sup>، 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 طراحی شده است (کاتساپراکاکیس و مانولیس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). این پروژه در حال حاضر در مرحله تأمین منابع مالی قرار دارد. در استرالیا، پروژه PHS کولتنا<sup>۳</sup> نتیجه همکاری بین شرکت اروپا<sup>۴</sup> و سازمان انرژی تجدید پذیر استرالیا بود. در نهایت، در شیلی، پروژه اسپخو د تاراپاکا یک نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی است که تا سال ۲۰۲۶ به بهره برداری می‌رسد (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

<sup>4</sup> ARUP

<sup>5</sup> Luk Lievense

<sup>6</sup> Markemeer

<sup>1</sup> Katsaprakakis & Christakis

<sup>2</sup> Katsaprakakis & Manolis

<sup>3</sup> Cultana

جدول ۲: مروری بر نیروگاه‌های جزر و مدی مربوطه و ویژگی‌های کلیدی آن‌ها (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نیروگاه	لا رانش <sup>۱</sup>	کیسلا یا گوبا <sup>۲</sup>	جیانگ‌شیا <sup>۳</sup>	آناپولیس <sup>۴</sup>	سیوا <sup>۵</sup>
مکان	فرانسه	روسیه	چین	کانادا	کره جنوبی
مساحت مخزن (Km <sup>2</sup> )	۲۲	۱/۱	۱/۵	۶	۴۲/۴۴
حجم مخزن (Mio. ) (Mm <sup>3</sup> )	۱۸۴	—	۵/۱۴	—	۱۴۷
تاریخ راه‌اندازی	۱۹۶۸	۱۹۸۰	۱۹۸۴	۲۰۱۱	—
اپراتور	ادف <sup>۶</sup>	روس‌هیدرو <sup>۷</sup>	—	نووا اسکوشیا پاور اینک <sup>۸</sup>	کواتر <sup>۹</sup>
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

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 دلتا ۲۱، به سیستم حفاظت در برابر سیل کشورها تبدیل شده‌اند. دلتا ۲۱ 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 دلتا ۲۱ یک ظرفیت تولید برق ۱۹۲۰ مگاوات و

مانند هارینگفلت<sup>۱۰</sup>، بروورزدام<sup>۱۱</sup> و آیسلمیر<sup>۱۲</sup> و تکامل یافت. در نهایت، طرح نهایی با دیوار ۷۰ متری در بروورزدام مطرح شد (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). پس از پیشنهاد لیونس، در سال ۲۰۰۷، مشاوره کما<sup>۱۳</sup> و شرکت لیونس<sup>۱۴</sup> 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"<sup>۱۵</sup> 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)<sup>۱۶</sup> را فراهم کرد، که شامل عملیات ذخیره انرژی (PHS با هد پایین)، تولید انرژی تجدیدپذیر (نصب توربین‌های بادی جدید و پنل‌های خورشیدی شناور) و آبی‌پروری دریایی است (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

<sup>10</sup> Haringvliet

<sup>11</sup> Brouwersdam

<sup>12</sup> IJsselmeer

<sup>13</sup> KEMA (Keuring van Elektrotechnische Materialen)

<sup>14</sup> Lievense BV

<sup>15</sup> Valmir

<sup>16</sup> iLand

<sup>17</sup> Delta21

<sup>1</sup> La Rance

<sup>2</sup> Kislaya Guba

<sup>3</sup> Jiangxia

<sup>4</sup> Annapolis

<sup>5</sup> Sihwa

<sup>6</sup> EDF (Électricité de France)

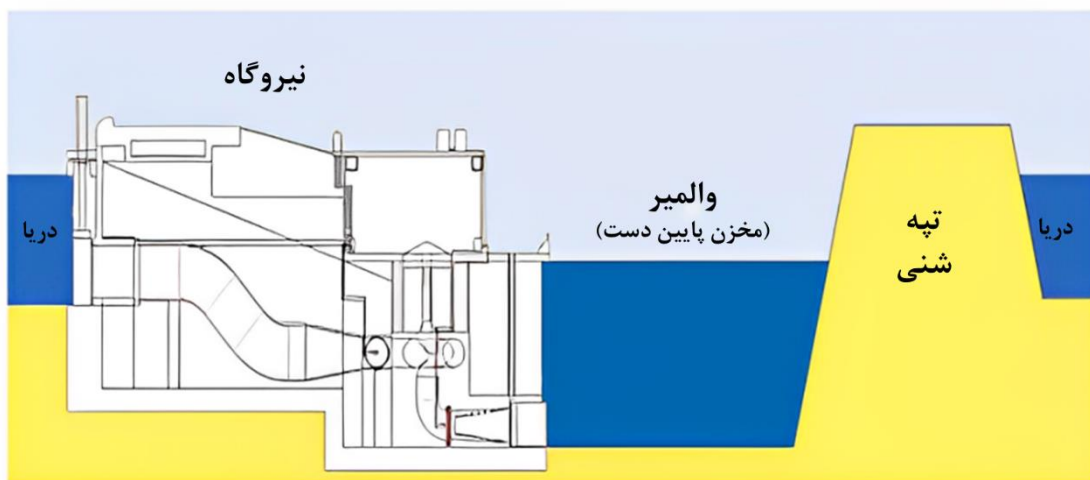
<sup>7</sup> RusHydro

<sup>8</sup> Nova Scotia Power Inc

<sup>9</sup> Kwater (Korea Water Resources Corporation)

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

اسپخو د تاراپاکا <sup>۷</sup>	کاسوس <sup>۶</sup>	کرت <sup>۵</sup>	رودس <sup>۴</sup>	کولتنا <sup>۳</sup>	گلینسک <sup>۲</sup>	اوکیناوا <sup>۱</sup>	PHS
۲۰۲۱	۲۰۱۳	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۳	۲۰۱۲	۱۹۹۹	سال برنامه‌ریزی توان نصب‌شده (MW)
۳۰۰	۴	۶۴.۵	۱۶۰	۲۲۵	۹۶۰	۳۰	اختلاف هد، میانگین (m)
۶۰۴.۷۵	۴۷۲.۵	۵۰۰	۲۷۰	۲۶۰	۲۹۲	۱۴۲	ظرفیت ذخیره‌سازی (MWh)
۳۵۴۰۰	۵۱۶	۲۳۴۶	۱۶۰۳	۱۷۷۰	۶۱۰۰	۱۸۸	



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

<sup>5</sup> Crete

<sup>6</sup> Kasos

<sup>7</sup> Espejo de Tarapacá

<sup>1</sup> Okinawa

<sup>2</sup> Glinsk

<sup>3</sup> Cultana

<sup>4</sup> Rhodes

جدول ۴: ویژگی‌های پروژه‌های PHS بررسی شده با هد کم (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نام پروژه	طرح لیونس <sup>۱</sup>	کما	تی‌اس‌آی <sup>۲</sup>	آیلند	دلنا <sup>۳</sup>
سال برنامه‌ریزی کشور	۱۹۸۶	۲۰۰۷	۲۰۱۴	۲۰۱۸	۲۰۲۱
قدرت نصب شده (MW)	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۵۰	۱۹۲۰
ظرفیت ذخیره‌سازی (GWh)	۳۰	۲۰	۲۰	۲.۲	۱۴.۴

نیروگاه جزر و مدی (TPP) بستگی به هدف ساخت و استفاده‌ی ثانویه احتمالی دارد. برای همین، نیروگاه‌های جزر و مدی ساخته شده اندازه‌های مختلفی دارند. یکی از نمونه‌های موفق نیروگاه‌های جزر و مد، نیروگاه لارانش است که به صورت تجاری فعالیت می‌کند و انرژی لازم را برای مناطق مرزی (استان برتانی، انگلستان) را فراهم می‌آورد (وانگ و وانگ<sup>۴</sup>، ۲۰۱۹). هدف از ساخت نیروگاه کیسلا یا گوبا بررسی کاربرد روش ساخت نیروگاه شناور در مقیاس بزرگ بود. این مکان، با وجود اینکه دامنه‌ی جزر و مد بسیار زیادی ندارد، به دلیل شکل حوضه و نزدیکی به شبکه انتخاب شده است (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

#### ۲-۱-۲- ساخت سد و گذرگاه

یک نیروگاه جزر و مد (TPP) به طور عمومی، شامل یک ایستگاه قدرت، یک راه آبی با دریچه، سدها و یک قفل ناوبری است. یک جاده بر روی سد قرار دارد که برای اتصال دو سر آب‌شکن<sup>۵</sup> و بهره‌برداری بهتر از نیروگاه، مفید است. تاکنون، تمام TPP‌های ساخته شده از تکنیک بندر جزر و مد استفاده می‌کنند (توسعه‌های مهندسی هیدرولیک)<sup>۶</sup> که شامل بستن ورودی دریاچه در یک نقطه‌ی باریک با سدها و ایستگاه قدرت است. طراحی TPP‌ها به طور کلی، محدود به هزینه‌های سرمایه‌گذاری است که به شدت 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 ساخت و ساز خشک) برای ساخت خاک‌ریز و نیروگاه به منظور کنترل جریان‌های زیاد در طول جزر و مد، به دلیل بسته شدن خلیج انتخاب شد (آنسورنا رویز و

ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۴.۴ گیگاوات ساعت را در نظر گرفته که در حال حاضر در مرحله بررسی امکان‌پذیری قرار دارد (دی ویلدر<sup>۳</sup>) (اونواچو<sup>۴</sup>). جدول ۴ ویژگی‌های اصلی پروژه‌های SPHS با هد پایین مورد بررسی 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 برق آبی جزر و مدی<sup>۵</sup> آغاز می‌شود و سپس بر ذخیره‌سازی انرژی برق آبی با آب دریا (SPHS) تمرکز می‌کند. برای SPHS، انتخاب اصلی بین مخزن بالا و پایین توضیح داده شده و مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست شناسایی شده‌اند.

#### ۲-۱-۱- نیروگاه‌های جزر و مدی

نیروگاه‌های PHS با هد بالا اغلب از توربین‌های فرانسسیس برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، اما این توربین‌ها برای عملیات با هد پایین طراحی نشده‌اند. در مقابل، ایستگاه‌های انرژی جزر و مدی از عملیات با هد پایین انرژی استخراج می‌کنند و بنابراین به عنوان 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 مورد بررسی قرار می‌گیرند (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). طراحی یک

<sup>4</sup> Onwuachu

<sup>5</sup> Tidal power

<sup>6</sup> Wang & Wang

<sup>7</sup> Breakwaters

<sup>8</sup> Developments\_in\_Hydraulic\_Engineering

<sup>1</sup> Lievens Plan

<sup>2</sup> TIESI (Technical Institute for Energy and Sustainable Development)

<sup>3</sup> De Vilder

خطرات احتمالی از جمله 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.

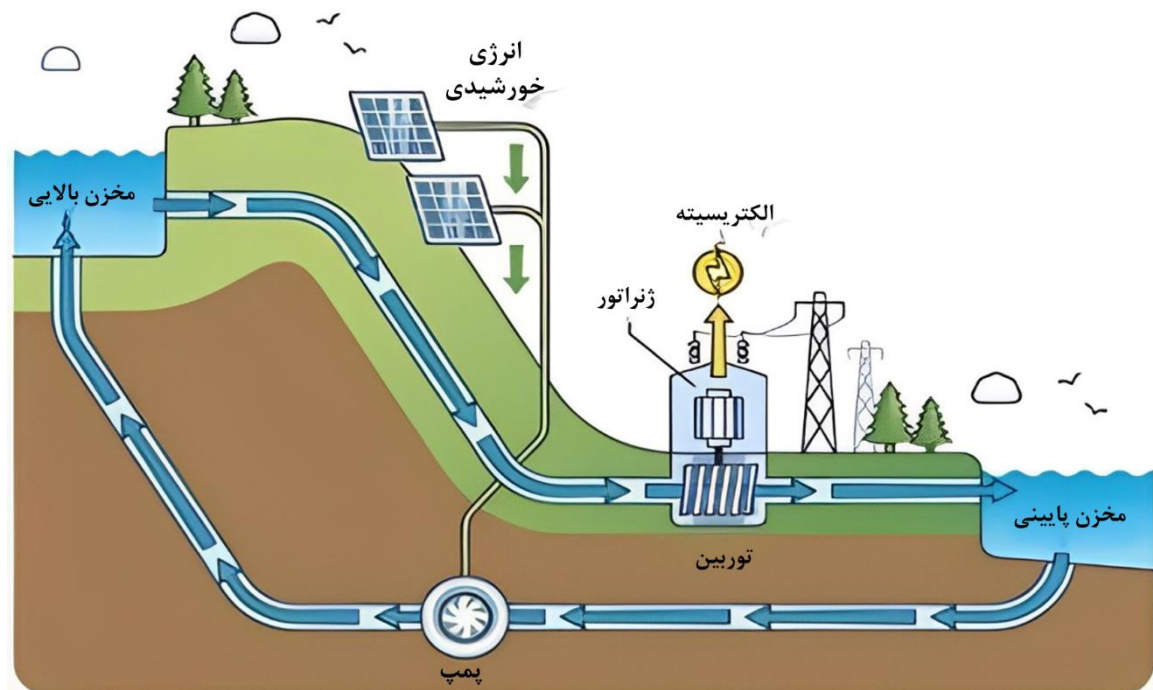
## ۲-۲-۱- ویژگی‌های اصلی ذخیره‌سازی انرژی تلمبه ذخیره‌ای در دریا

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.

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.

## ۲-۲-۲- ذخیره‌سازی انرژی برق آبی با هد 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،



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

( $\rho$ )، 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.

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.

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

## ۲-۲-۲- مخزن بالا یا پایین

$$\eta_{gem} = 0.55 \frac{Q_{max}}{\sqrt{ga_0 R}} \quad (۳)$$

انتخاب استفاده از دریا به عنوان مخزن بالا یا پایین برای طرح‌هایی که از اختلاف ارتفاع طبیعی در طول خط ساحلی با صخره‌ها استفاده می‌کنند، روشن و ساده است. با این حال، برای تأسیسات فراساحلی، هر دو گزینه قابل بررسی هستند. مطالعات انجام شده 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 کما و لیونس فرآیند معکوسی را پیشنهاد دادند که از دریاچه داخلی به عنوان مخزن پایین استفاده می‌کند، که به آن "والمیر" می‌گویند. از آن زمان به بعد، تمامی مطالعات فراساحلی بر اساس اصل "والمیر" انجام شده‌اند، زیرا که به طور قابل توجهی حجم سد را کاهش می‌دهد.

## ۲-۳- ساختار سد

انتخاب استفاده از دریا به عنوان مخزن بالا یا پایین برای طرح‌هایی که از اختلاف ارتفاع طبیعی در طول خط ساحلی با صخره‌ها استفاده می‌کنند، روشن و ساده است. با این حال، برای تأسیسات فراساحلی، هر دو گزینه قابل بررسی هستند. مطالعات انجام شده 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 کما و لیونس فرآیند معکوسی را پیشنهاد دادند که از دریاچه داخلی به عنوان مخزن پایین استفاده می‌کند، که به آن "والمیر" می‌گویند. از آن زمان به بعد، تمامی مطالعات فراساحلی بر اساس اصل "والمیر" انجام شده‌اند، زیرا که به طور قابل توجهی حجم سد را کاهش می‌دهد.

در پروژه‌های PHS با هد کم، تنوع گسترده‌ای در انواع ساختارهای سد وجود دارد که در شکل ۴ قابل مشاهده است. هنگامی که 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 آب شور است که به وسیله "نشت دور<sup>۲</sup>" 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

به غیر از اندازه گیری‌های حجمی، پتانسیل سیل نیز یک جنبه اساسی دیگر است، زیرا شکستن بخش‌های سد می‌تواند خطرات قابل توجهی را ایجاد کند. در مناطقی که شکست سد والمیر به طور 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 برووردام (یکپارچه در خط ساحلی) و در آیسلمیر<sup>۱</sup> (دریاچه داخلی) محاسبه شده 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 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

۲-۲-۲-۲- ریسک سیل

به غیر از اندازه گیری‌های حجمی، پتانسیل سیل نیز یک جنبه اساسی دیگر است، زیرا شکستن بخش‌های سد می‌تواند خطرات قابل توجهی را ایجاد کند. در مناطقی که شکست سد والمیر به طور 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 برووردام (یکپارچه در خط ساحلی) و در آیسلمیر<sup>۱</sup> (دریاچه داخلی) محاسبه شده 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 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = \sqrt[5]{\frac{(Q_{max})^2}{\pi g f^3}} \quad (۲)$$

<sup>2</sup> Far seepage

<sup>1</sup> IJsselmeer

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.

سالن تعمیر و نگهداری با تجهیزات بالابر است. قسمت پایینی به‌صورت جانبی به زیر بخش‌هایی تقسیم می‌شود، هر کدام 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. از آنجاکه مسیرهای آب به یکدیگر

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

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

### ۳-۳- ساختار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دریایی و

#### روش‌های ساخت

برای جلوگیری از کاویتاسیون در ایستگاه‌های پمپ با هد بالا، پمپ باید در عمق زیر سطح آب مخزن پایینی قرار گیرد. در جدول ۶ عمق نصب نشان داده شده است. نیروگاه با هد 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 اسپخو د تاراپاکا پیشنهاد شده است. برای این پروژه‌ها، نیروگاه دارای پمپ توربین است. اما، پروژه‌هایی مانند پیشنهاد های SPHS یونان، ساخت ایستگاه‌های جداگانه برای پمپاژ و توربین را در نظر می‌گیرند (کاتسپراکاکیس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). برای یک حداکثر عمق حفاری، هرچه پمپ-توربین‌ها بزرگ‌تر باشند، حداکثر اختلاف سطح آب

### 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<sup>۱</sup> و خشک کردن محل ساخت هستند، در حالی که روش‌های ساخت تر به این اقدامات نیازی ندارند. برای روش ساخت تر (wet)، نیروگاه قبل از ساخت به صورت پیش‌تولید شده و سپس با استفاده از آب به محل ساخت منتقل می‌شود. این روش برای نیروگاه TPP کیسلا یا گوبا به کار رفت (کلارک<sup>۲</sup>، 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).

<sup>3</sup> Katsaprakakis

<sup>1</sup> cofferdam

<sup>2</sup> Clark

است. در نیروگاه TPP لا رانش، علاوه بر ساخت تجهیزات از فولاد ضدزنگ و رنگ آمیزی پروانه های توربین، از حفاظت کاتدی فعال برای ۲۴ واحد توربین، ۶ دروازه سیلابی و قطعات فلزی کشتیرانی استفاده می شود. توان الکتریکی مورد نیاز برای تأمین حفاظت کاتدی فعال در نیروگاه TPP لا رانش، ۲۰ کیلووات با مصرف سالانه ۱۵۰,۰۰۰ کیلووات ساعت می باشد که علاوه بر حفاظت کاتدی فعال، در نیروگاه TPP آناپولیس نیز از فولاد ضدزنگ برای تیغه های توربین استفاده شده است.

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

موجود در والمیر کمتر می شود. جدول ۷ مقادیر مختلف فرو بردگی را برای پمپ-توربین هایی که توسط (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲). برای نیروگاه دلتا ۲۱ در نظر گرفته شده اند، نشان می دهد. توجه کنید که هر چه هر واحد پمپ-توربین بزرگ تر باشد، واحدهای کمتری برای تأمین قدرت مورد نیاز یک نیروگاه SPHS با هید پائین نیاز است و بنابراین عرض کلی نیروگاه کاهش می یابد (کاهش مواد).

### ۳-۴- اقدامات پیشگیری از خوردگی

یک روش معمول جلوگیری از خوردگی که در بیشتر نیروگاه های TPP استفاده می شود، حفاظت کاتدی فعال

جدول ۶: ویژگی های لوله ورودی و عمق غوطه وری توربین های پمپ برگشت پذیر در طرح های SPHS هد بالا (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲)

نام	کاسوسا <sup>۱</sup>	رودسیا <sup>۲</sup>	کریته <sup>۳</sup>	کوراچائو <sup>۴</sup>	اوکیناوا <sup>۵</sup>	اسپخو د تاراپاکا	کولتنا <sup>۶</sup>	گلینسک <sup>۷</sup>
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
۲۷	۶۰	۱۰۰	۱۶۰	۲۰۰
۵	۱۱.۱	۱۸.۵	۲۹.۶	۳۷
۲.۴	۳.۶	۴.۷	۵.۹	۶.۶
۳۳۲۰	۲۲۲۸	۱۷۲۲	۱۳۷۲	۱۲۱۸

رسوب گذاری دریایی، که به عنوان تجمع ناخواسته موجودات دریایی در سطح های غوطه ور در دریا تعریف می شود، یک عامل مهم هم از دیدگاه اقتصادی (یبرا و دام-یوهانسون<sup>۷</sup>، ۲۰۰۴) و هم از دیدگاه زیست محیطی است. مشکلات مربوط به رسوب گذاری به طور کلی در نیروگاه های TPP رخ می دهد و باعث تخریب سازه و فراهم کردن شرایط

عملیات (با نرخ دسترسی ۹۹٪) نشان داد که تنها نقاط کوچکی از خوردگی حفره ای بر روی پروانه وجود دارد. این نشان دهندهی اثربخشی حفاظت کاتدی فعال است. اقدامات جلوگیری از خوردگی مواد می تواند بسیار هزینه بر باشد.

### ۳-۵- اقدامات ضد رسوب

<sup>5</sup> Cultana  
<sup>6</sup> Glinsk  
<sup>7</sup> Yebra & Dam-Johansen

<sup>1</sup> Kasosa  
<sup>2</sup> Rhodesa  
<sup>3</sup> Cretea  
<sup>4</sup> Curaçao

واحدهای پمپ-توربین این نیروگاه‌ها برای کاربردهای با ارتفاع پایین کارآمد نیستند. توان موجود (W) بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta \quad (4)$$

$\rho$  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  $\eta$  بازدهی کلی نیروگاه است.

معادله‌ی (۴) نشان می‌دهد که برای هدهای پایین، نرخ جریان حجمی باید افزایش یابد تا توان بالایی تولید شود (هانت<sup>۵</sup> 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 هد کم مناسب هستند، نشان داده شده است. اخیراً پمپ-توربین‌های ضد چرخش به‌عنوان یک تکنولوژی امیدوارکننده برای سیستم‌های پمپاژ و ذخیره انرژی با هد کم در نظر گرفته شده‌اند. در مقایسه با پمپ-توربین‌های سنتی، نوع ضد چرخش، می‌تواند اندازه‌ی کوچک‌تری داشته باشد و بازدهی بالاتری را برای محدوده گسترده‌تری از هدها ارائه دهد (فورکاو<sup>۶</sup> 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 (بوکل و جانینگ<sup>۷</sup>، ۲۰۰۵). با این حال، 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<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۰)، حتی با وجود اینکه واحدهای با سرعت متغیر تضمین می‌کنند که نفوذ

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<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰) نشان داده‌اند که سطوحی که دچار رسوب‌گذاری شده‌اند نیاز به فعالیت‌های مکرر نگهداری و تمیزکاری دارند که هزینه قابل توجهی 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 راه آب استفاده می‌شود. یک تحقیق در سال ۱۹۹۸ بیان کرد که واحد الکترولیز به مدت ۲۰ سال از راه آب 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.

با این حال، طبق آژانس شیمیایی اروپا<sup>۲</sup>، 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 ضد عفونی‌کننده واسطه‌ای مانند کلر (چن و نوی<sup>۳</sup>، 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 افزایش یافته است.

#### ۴- پمپ توربین‌ها

بهره‌وری گردشی نیروگاه‌های ذخیره تلمبه‌ای (PHS) متعارف در مناطق کوهستانی با ارتفاع بالا می‌تواند بین ۷۰٪ تا ۸۵٪ باشد (رحمان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال،

<sup>5</sup> Hunt

<sup>6</sup> Furukawa

<sup>7</sup> Bocquel & Janning

<sup>8</sup> J. D. Hunt

<sup>1</sup> Champ

<sup>2</sup> European Chemicals Agency

<sup>3</sup> X. Chen & Noy

<sup>4</sup> Rehman

(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) سوئیس و شبکه رودخانه‌های اروپا که به هماهنگی کمپین بازگشت ماهیان سالمون و انجمن سومون-رین<sup>۵</sup> مشارکت دارند (آنسورنا رویز و همکاران، ۲۰۲۲).

انرژی‌های تجدید پذیر بالاتر باشد (جاوید<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>، 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 مطرح شده است:

جدول ۸: 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. هزینه 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٪ آزمایش شده‌اند با توجه به سرعت پایین، می‌توانند دوستدار ماهی در نظر گرفته شوند.

<sup>4</sup> World Wildlife Fund

<sup>5</sup> Saumon-Rhin

<sup>1</sup> Javed

<sup>2</sup> Marcelli

<sup>3</sup> Schilt

## ۶- بحث

بیشتر تجربیات در زمینه تکنیک‌های تولید انرژی در آب شور دریا، به واسطه‌ی انواع مختلف نیروگاه تولید برق بوده است. تنها فناوری SPHS که تاکنون اجرا شده، نیروگاه اوکیناکا است، با این حال چندین پروژه دیگر در آینده نزدیک مانند پروژه SPHS اسپخو در تاراپاکا در در انتظار تامین مالی جهت اجرا هستند. در زمینه PHS با هد کم، هنوز هیچ طرحی اجرا نشده است.

تجهیزات نصب شده 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 مورد استفاده قرار گرفته‌اند. 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 هد کم، توصیه می‌شود که در آب‌های کم‌عمق (۵ تا ۱۰ متر) از یک مخزن بالا استفاده شود، در حالی که در آب‌های عمیق‌تر (۱۰ تا ۳۰ متر)، استفاده از جایگزین "والمیر" بهتر است اگر به توازن بین حجم حفر و ساخت سد نگاه‌دارید. با این حال، 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. با اینکه افزایش سطح ایمنی هزینه‌های بیشتری را در پی دارد، اما منتظر نیستیم که این هزینه بیشتر از جایگزین "والمیر" با تفاوت بزرگ حجم حفر شده 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 هد کم شناسایی شده‌اند. 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 توجه است. به‌طور مشابه با PHS سنتی، SPHS با هد 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 داده شده است که SPHS با هد کم می‌تواند یک فناوری رقابتی برای ادغام انرژی‌های تجدید پذیر متغیر به شبکه باشد.

همچنان که این انرژی تولیدی می‌تواند در جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای و پایدار سازی محیط زیست بسیار اثر گذار باشد. تجربیات جهانی، به ویژه پس از بحران انرژی ناشی از جنگ اکرین، نشان داد که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و در ترکیب با نیروگاه‌های برق آبی می‌تواند امنیت انرژی

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](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

کشورها را در دنیای بدون سوخت فسیلی تأمین کند. از این رو 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 وضعیت 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

- 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>
- Yebara, 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., & Vandeveld, 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 Deltaaap 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

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

Mohammad Mazlomi Mochani <sup>1</sup>

Ali Moridi <sup>\*2</sup>

Mojtaba Dadkhah Tehrani <sup>3</sup>

Reza Khalili <sup>4</sup>

### 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

<sup>1</sup> Master's student in Civil Engineering, Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran

<sup>2\*</sup> 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).

<sup>3</sup> Master's student in Civil Engineering, Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran

<sup>4</sup> PhD student in Environmental, Water and Wastewater Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran