



A Comprehensive Review of the Wavebob Wave Energy Converter Technology

Mohammad Hossein Jahangir^{1*} | Mehrrasadat Tayebi²

1. Corresponding Author, Department of Renewable Energy Technologies and Energy Resources Engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mh.jahangir@ut.ac.ir

2. Master student, Renewable Energies and Environmental Department, Faculty of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehrsa.tayebi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 20 November 2024

Revised 19 December 2024

Accepted 19 January 2025

Published Online 18 March 2025

Keywords:

Renewable energy,
Wave energy converter,
Point absorber,
Wavebob,
Ocean energy technology.

ABSTRACT

Ocean wave energy, as a renewable and clean energy source, has significant potential for electricity generation. The decline of fossil fuel resources and their environmental impact have increased the need for renewable energy sources. In this review article, the operating principles and history of the Wavebob wave energy converter, along with the latest research findings in this field, are examined. Furthermore, a comparison between the performance of the Wavebob converter and other wave energy converters is conducted to clearly identify their features and differences. This study addresses the advantages and limitations of the design and performance of this converter, analyzing its strengths and weaknesses in various geographical and temporal conditions. According to the results of this study, it has been shown that the Wavebob wave energy converter, with its simple design featuring two oscillating bodies (one fully submerged and the other semi-submerged), has the capability to generate 1000 kW of electric power in real-scale applications. This converter is anchored to the seabed using two cables, resulting in lower repair costs compared to other models due to reduced damage risks. This article explores the operating principles and the design and construction history of the Wavebob wave energy converter, as well as the findings from the latest research conducted on this subject.

Cite this article: Jahangir, M. H. & Tayebi, M. (2025). A Comprehensive Review of the Wavebob Wave Energy Converter Technology. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (2), 123-137. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.385972.1107>



© Mohammad Hossein Jahangir, Mehrrasadat Tayebi
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.385972.1107>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Energy is a fundamental reason of economic and social progress. With the global population growing and economies expanding, the demand for energy is increasing at an unprecedented rate. Projections indicate that by 2050, global energy demand will rise by 70% compared to 2014 levels. This growing need poses significant challenges as fossil fuels, the primary source of energy, are depleting rapidly while contributing to severe environmental issues such as greenhouse gas emissions and climate change. Consequently, transitioning to renewable energy sources has become a necessity rather than an option [1].

Among renewable energy options, ocean energy which includes wave energy, offshore wind, and tidal energy holds vast potential due to its abundance and predictability. Wave energy, in particular, stands out as one of the most promising options, offering high energy density and the ability to provide a reliable, clean energy source. Over the past two centuries, wave energy research has advanced significantly, resulting in the development of numerous devices to harness wave power. Among these,

point absorbers have attracted attention for their efficiency in absorbing wave energy from all directions [2].

The Wavebob Wave Energy Converter represents a breakthrough in point absorber technology. This device consists of two oscillating bodies: one fully submerged and the other half-submerged. These bodies move relative to each other under the influence of wave forces, and this relative motion drives a power-take-off (PTO) system to generate electricity. Operating in deep waters, the Wavebob is designed for locations 10–25 kilometers offshore, at depths exceeding 100 meters, and can produce up to 1000 kW of electrical power at full scale. The device also employs a unique mooring system with two cables connected to the seabed, minimizing repair costs and improving durability compared to other technologies [2, 3].

Methodology

This paper examines the principles, development history, and operational features of the Wavebob. It also evaluates its performance compared to other wave energy converters and explores its strengths and limitations. Early research on the Wavebob began in the late 1990s, with scaled prototypes tested in controlled laboratory environments. Initial tests, including those at scales of 1:50 and 1:20, demonstrated the feasibility of the device in capturing wave energy. Subsequent field trials in real ocean conditions provided critical insights into its efficiency and performance [4]. The Wavebob's design includes two oscillating bodies with distinct hydrodynamic properties. The upper body is half-submerged and features low inertia, while the lower body is fully submerged with high inertia. These contrasting properties enable the device to create significant relative motion between the two bodies, which is converted into electrical energy by the PTO system. The PTO system uses hydraulic cylinders and gear mechanisms to transform the mechanical energy into rotational motion, driving a generator [5]. Comparative analysis of wave energy converters highlights the Wavebob's competitive edge. As a medium-sized device, it produces substantial power in deep waters while maintaining lower maintenance costs due to its mooring design. However, its relatively high production cost remains a challenge [6].

Conclusions

Based on the analyses and results obtained from comparing different wave energy converters, it can be concluded that the selection and design of wave energy converters must be carried out with precision and consideration of local and climatic conditions. Larger converters installed at shallower depths produce more power but also require specific conditions and incur higher installation and maintenance costs. On the other hand, smaller converters may produce less power but can be used in various geographical conditions. A thorough examination of the performance differences of converters across different time periods can lead to improved designs and increased efficiency of these systems. Furthermore, it has been found that the Wavebob wave energy converter, as a successful example of wave energy converters, demonstrates the capabilities of this technology in converting wave energy into electrical energy. However, the high costs associated with designing and constructing these converters remain a significant challenge for the development of this technology. Technological advancements and cost reductions could provide a solution to enhance efficiency and expand the use of wave energy in the future.



مروری بر فناوری سیستم مبدل انرژی موج ویوباب

محمدحسین جهانگیر^{۱*} | مهرسasadات طیبی^۲

۱. نویسنده مسؤل، دانشیار دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mh.jahangir@ut.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehrsa.tayebi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

کلیدواژه:

انرژی‌های تجدیدپذیر،
مبدل انرژی موج،
جاذب نقطه‌ای،
ویوباب،
فناوری انرژی اقیانوسی.

انرژی امواج دریا به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر و پاک، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی الکتریکی دارد. کاهش منابع سوخت فسیلی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را افزایش داده است. در این مقاله مروری، اصول عملکرد و تاریخچه مبدل انرژی موج ویوباب به همراه نتایج آخرین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه بررسی می‌شوند. همچنین، مقایسه‌ای بین عملکرد مبدل ویوباب و سایر مبدل‌های انرژی موج انجام می‌شود تا ویژگی‌ها و تفاوت‌های آن‌ها به خوبی مشخص شود. در این بررسی، به مزایا و محدودیت‌های طراحی و عملکرد این مبدل پرداخته می‌شود و قوت‌ها و ضعف‌های آن در شرایط مختلف جغرافیایی و زمانی تحلیل می‌شود. طبق نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، مبدل انرژی موج ویوباب یکی از تجهیزات ساده با دو بدنه نوسانی (یک بدنه کاملاً مستغرق و دیگری نیمه‌مستغرق) است که در مقیاس واقعی قابلیت تولید توان الکتریکی ۱۰۰۰ کیلووات را دارد. این مبدل با استفاده از دو کابل متصل به بستر دریا مهار می‌شود، از این‌رو هزینه تعمیرات ناشی از آسیب‌های احتمالی آن نسبت به نمونه‌های دیگر بسیار کمتر است. در این مقاله اصول عملکرد و تاریخچه‌ای از روند طراحی و ساخت مبدل انرژی موج ویوباب و نتایج آخرین تحقیقات انجام‌شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

استناد: جهانگیر، محمدحسین و طیبی، مهرسasadات (۱۴۰۴). مروری بر فناوری سیستم مبدل انرژی موج ویوباب. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۲) ۱۲۳-۱۳۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.385972.1107>

© محمدحسین جهانگیر، مهرسasadات طیبی ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.385972.1107>



۱. مقدمه

انرژی یکی از عوامل کلیدی توسعه اقتصادی و اجتماعی است که در دنیای امروز نقشی حیاتی در زندگی بشر ایفا می‌کند. افزایش جمعیت جهانی و رشد اقتصادی جوامع، نیاز به منابع انرژی را بیش از پیش افزایش داده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند تقاضای انرژی در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۲۰ حدود ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت [۱ و ۷]. این رشد سریع تقاضا، فشار مضاعفی بر منابع انرژی متداول وارد کرده است. سوخت‌های فسیلی به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین انرژی، علاوه بر کاهش سریع، اثرات مخرب زیست‌محیطی از جمله تولید گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی را نیز به دنبال دارند. در نتیجه، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان راهکاری ضروری برای تأمین پایدار انرژی مورد توجه قرار گرفته است [۴ و ۸]. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی اقیانوس‌ها شامل انرژی جزر و مد، بادهای فراساحلی و امواج، پتانسیل بالایی در تولید انرژی پایدار و پاک دارند. به‌ویژه، انرژی امواج به دلیل تراکم بالای انرژی و پیش‌بینی‌پذیری مناسب، به یکی از گزینه‌های جذاب برای تولید انرژی تبدیل شده است [۳]. برآوردها نشان می‌دهند انرژی نهفته در امواج اقیانوس‌ها به اندازه‌ای است که می‌تواند بخش قابل توجهی از نیاز انرژی جهان را پوشش دهد، اما این فناوری همچنان به بهبود در بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها نیاز دارد [۹].

بیش از ۲۰۰ سال از شروع تحقیقات انرژی موج و اولین بهره‌برداری از انرژی موج به طور فعال که در سال ۱۷۹۹ در پاریس توسط پیر سیمون جارد^۱ انجام شد، می‌گذرد. صدها مبدل انرژی موج در دهه‌های گذشته توسعه یافته است. انواع مبدل‌های انرژی امواج شامل ژنراتورهای جزر و مدی، سیستم‌های ستون آب نوسانی، و جاذب‌های نقطه‌ای هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود [۱۰]. به طور کلی، ژنراتورهای جزر و مدی مزایای زیادی در تولید انرژی پایدار دارند، اما محدودیت‌هایی از جمله وابستگی به مکان‌های خاص و هزینه‌های بالا برای نصب و نگهداری دارند. سیستم‌های ستون آب نوسانی، توانایی جذب انرژی از امواج را دارند، اما در شرایط موجی شدید عملکرد مناسبی ندارند [۱۱]. در میان طیف گسترده‌ای از مبدل‌های انرژی امواج، جاذب‌های نقطه‌ای شناور به دلیل توانایی بسیار خوب در مقابل موج‌های عمودی و همچنین، جذب انرژی موج از هر سو، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این جاذب‌ها دارای قابلیت تطبیق با شرایط مختلف موجی و بهره‌وری بالاتر نسبت به سایر سیستم‌ها هستند [۳].

یکی از فناوری‌های نوآورانه در حوزه انرژی امواج، مبدل انرژی موج ویوواب است که در دسته جاذب‌های نقطه‌ای قرار می‌گیرد. این مبدل به عنوان یک سیستم پیشرفته طراحی شده تا انرژی حاصل از امواج را در محیط‌های دریایی با عمق زیاد به طور مؤثر جمع‌آوری و به انرژی الکتریکی تبدیل کند [۱۲]. ویوواب از دو بدنه نوسانی تشکیل شده است: یکی کاملاً مستغرق و دیگری نیمه‌مستغرق. این دو بدنه با حرکت نسبی خود در اثر امواج، انرژی مکانیکی تولید می‌کنند که از طریق سیستم تولید توان^۲ موسوم به Power Take-Off (PTO) به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. PTO در مبدل‌های انرژی موج، نقشی کلیدی در تبدیل انرژی مکانیکی امواج به انرژی الکتریکی دارد [۱۳ و ۱۴]. این سیستم شامل اجزای مختلفی مانند مبدل‌های هیدرولیکی، ژنراتورهای الکتریکی، و سیستم‌های مکانیکی است که با جذب و تبدیل حرکت امواج به توان مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی عمل می‌کند. مکانیزم PTO از طریق سیستم‌های هیدرولیکی و الکتریکی، انرژی جنبشی امواج را به فشار هیدرولیکی یا جریان الکتریکی تبدیل می‌کند، که در نهایت از طریق ژنراتور، به برق تبدیل می‌شود [۱۵].

مبدل ویوواب به گونه‌ای طراحی شده است که در محیط‌های عمیق‌تر از ۱۰۰ متر و فاصله ۱۰ تا ۲۵ کیلومتری از ساحل کار کند. سیستم PTO در این مبدل شامل سیلندرهای هیدرولیکی و چرخ‌دنده‌هایی است که حرکت نسبی دو بدنه را به حرکت چرخشی تبدیل می‌کنند و یک ژنراتور را برای تولید توان الکتریکی به حرکت درمی‌آورند. این طراحی به دلیل تفاوت در جرم و ویژگی‌های هیدرودینامیکی دو بدنه (یکی با اینرسی بالا و دیگری با اینرسی پایین)، کارایی بالایی در تولید انرژی دارد [۱۶]. ویژگی منحصر به فرد دیگر ویوواب، سیستم مهارکننده آن است که از دو کابل متصل به بستر دریا تشکیل شده است. این سیستم علاوه بر کاهش جابه‌جایی‌های جانبی و طولی مبدل در شرایط توفانی، باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود [۱۷]. توسعه

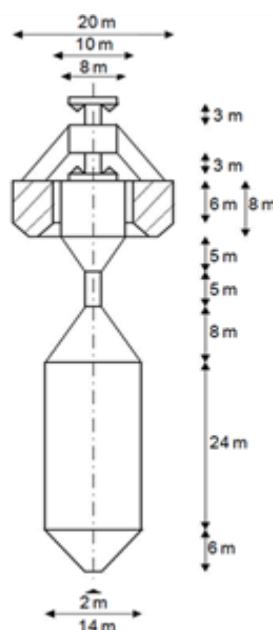
1. Pierre-Simon Girard
2. Power Take-Off (PTO)

ویوباب از اواخر دهه ۱۹۹۰ آغاز شد و اولین نمونه‌های آزمایشی آن در مقیاس کوچک در دانشگاه کورک ایرلند آزمایش شدند. در سال ۲۰۰۶، آزمایش‌های میدانی با مقیاس بزرگ‌تر (۱:۴) در آب‌های ایرلند انجام شد و نشان داد این مبدل می‌تواند تحت شرایط واقعی محیطی نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد [۱۸]. در نهایت، نمونه کامل ویوباب در سال ۲۰۱۲ در سواحل پرتغال نصب شد و توانایی تولید ۱۰۰۰ کیلووات توان الکتریکی را به اثبات رساند. در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار کمپانی ویوباب آزمایش دریایی پیشرفته خود را با ساخت نمونه مبدل در مقیاس ۱ به ۴، در ایرلند انجام داد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۶].



شکل ۱. نمونه مبدل انرژی موج ویوباب در مقیاس ۱:۴ در سال ۲۰۰۶ در ایرلند [۵]

پس از تحقیقات انجام شده بر نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشی ساخته شده در مقیاس‌های کوچک‌تر، در سال ۲۰۱۲ با ساخت یک نمونه پیشرفته در مقیاس کامل در سواحل پرتغال، توان تولیدی ۱۰۰۰ کیلو وات توسط کمپانی ویوباب گزارش شد [۶]. شکل ۲، ابعاد قسمت‌های مختلف ویوباب در مقیاس کامل را نمایش می‌دهد. در سال ۲۰۱۳ کمپانی ویوباب به فعالیت خود در زمینه ساخت مبدل انرژی امواج خاتمه داد.



شکل ۲. ابعاد قسمت‌های مختلف مبدل انرژی موج ویوباب در مقیاس واقعی [۶]

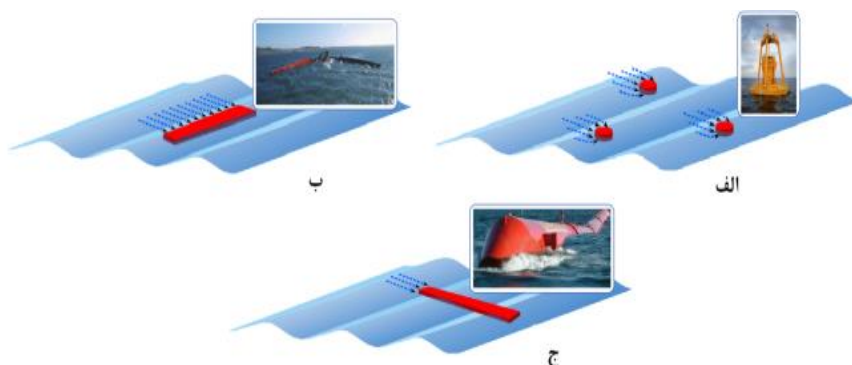
در مقایسه با سایر مبدل‌های انرژی موج، ویوباب به دلیل قابلیت جذب انرژی از تمامی جهات و کارایی بالا در عمق‌های زیاد، برتری دارد. به عنوان مثال، مبدل‌های پایان‌دهنده (terminators) و تضعیف‌کننده (attenuators) به دلیل نیاز به زیرساخت‌های سنگین‌تر، هزینه‌های بیشتری در بر دارند. همچنین، طراحی ویوباب باعث شده که تعمیرات آن در شرایط دشوار دریایی نسبت به سایر مبدل‌ها آسان‌تر باشد [۶ و ۱۹]. با وجود موفقیت‌های فنی، هزینه زیاد طراحی و ساخت مبدل ویوباب یکی از موانع اصلی در تجاری‌سازی آن بوده است. در سال ۲۰۱۳، به دلیل چالش‌های مالی، توسعه این مبدل متوقف شد. با این حال، ویوباب به عنوان نمونه‌ای موفق در تحقیقات انرژی امواج، دانش ارزشمندی برای توسعه فناوری‌های آینده فراهم کرده است [۱۶].

از این‌رو، در این مقاله مروری، به طور جامع‌تر و دقیق‌تر به بررسی فناوری سیستم مبدل انرژی موج ویوباب پرداخته شده است. مقاله حاضر به تحلیل عملکرد و کارایی این سیستم‌ها در شرایط مختلف جوی و محیطی تمرکز دارد. همچنین، مطالعات پیشین بیشتر بر جنبه‌های تئوریک و آزمایشگاهی این فناوری تمرکز داشته‌اند؛ اما این مقاله با تحلیل داده‌های میدانی و تجربی، شکاف‌های علمی مرتبط با پیاده‌سازی و عملکرد واقعی این سیستم را پر می‌کند. به علاوه، در این مقاله به بررسی جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی فناوری ویوباب نیز پرداخته شده است که در مقالات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. لذا، این مقاله به شکلی جامع‌تر و چندبعدی‌تر به این فناوری می‌پردازد و شکاف‌های موجود در مطالعات قبلی را پر می‌کند. در بخش‌های بعدی این مقاله، ابتدا به معرفی مواد و روش‌ها پرداخته می‌شود. سپس، انواع مبدل‌های انرژی امواج و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، به تفصیل فناوری مبدل انرژی موج ویوباب، تاریخچه پیدایش این مبدل و نیروهای واردشده بر آن تشریح می‌شود. در نهایت، یافته‌های تحقیقاتی مرتبط با این مبدل ارائه می‌شود.

۲. فناوری مبدل‌های انرژی امواج

۱-۲. مبدل‌های انرژی امواج

دستگاه‌های مورد استفاده برای استحصال انرژی امواج وظیفه دارند انرژی امواج را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این سیستم‌ها را می‌توان به سه دسته جاذب نقطه‌ای^۱، تضعیف‌کننده^۲ و پایان‌دهنده^۳ تقسیم کرد [۳]. سیستم‌های جاذب نقطه‌ای، ابعاد کوچک‌تری نسبت به طول موج دارند و انرژی موج را در تمامی جهات جذب کرده و به انرژی مکانیکی و سپس انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۳]. تضعیف‌کننده‌ها، ساختارهای طولانی دارند و به خلاف سیستم‌های جاذب نقطه‌ای، نسبت به طول موج بزرگ‌تر هستند. این سیستم‌ها در راستای حرکت موج نوسان می‌کنند [۴]. پایان‌دهنده‌ها مشابه مبدل‌های تضعیف‌کننده هستند، اما در راستای عمود بر حرکت موج نوسان می‌کنند [۴]. شکل ۳ تقسیم‌بندی مبدل‌ها را در سه گروه یادشده نشان داده است.

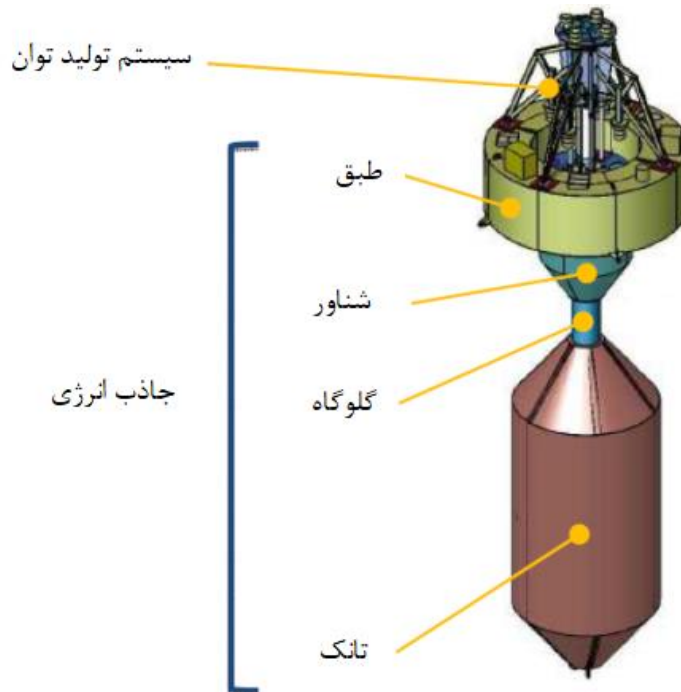


شکل ۳. تقسیم‌بندی مبدل‌های انرژی امواج؛ (الف) سیستم جاذب نقطه‌ای، (ب) تضعیف‌کننده، (ج) پایان‌دهنده [4].

1. Point absorber
2. Attenuator
3. Terminator

۲-۲. مبدل انرژی موج ویویاب

مبدل انرژی موج ویویاب، یک جاذب نقطه‌ای محور متقارن^۱ و خود واکنش^۲ است که تنها قادر به جذب حرکات عمودی رو به بالا و پایین امواج بوده و برای موقعیت‌های مکانی با عمق بیشتر از ۱۰۰ متر و فاصله ۱۰ تا ۲۵ کیلومتری از ساحل طراحی شده است [۵]. شکل ۴ شماتیکی از قسمت‌های اصلی مبدل انرژی موج ویویاب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، ویویاب از دو قاعده نوسانی که چنبره^۳ و مخزن-گردن-شناور^۴ نام دارند، و سیستم تولید توان تشکیل شده است. با توجه به خواص جرمی و هیدرودینامیکی، چنبره با فرکانس طبیعی بالا عمل می‌کند، در حالی که مخزن-گردن-شناور یک بدنه با اینرسی بالا بوده و با فرکانس طبیعی پایین عمل می‌کند. نتیجه این تفاوت پاسخ‌دهی شناورها به جریان‌های اقیانوسی با دامنه و فازهای مختلف، ایجاد حرکات نسبی بین دو شناور است که سیستم تولید توان با دریافت این حرکات نسبی وظیفه تولید توان الکتریکی را انجام می‌دهد [۵]. سیستم تولید توان، حرکات نسبی دو قاعده نوسانی را دریافت کرده و به وسیله چهار سیلندر و پیستون هیدرولیکی و چرخ‌دنده‌ها به حرکت چرخشی تبدیل می‌کند که باعث حرکت ژنراتور و تولید توان الکتریکی می‌شود [۵].



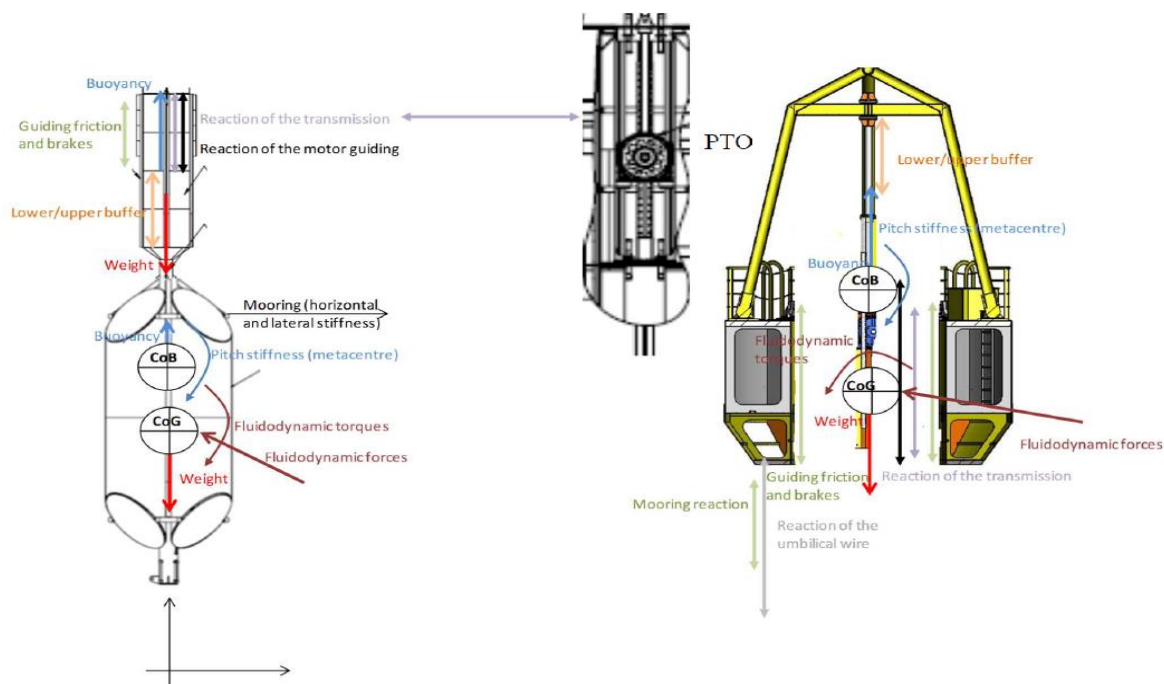
شکل ۴. شماتیکی از قسمت‌های اصلی مبدل انرژی موج ویویاب [۵]

۲-۳. نیروهای وارد شده بر مبدل انرژی موج ویویاب

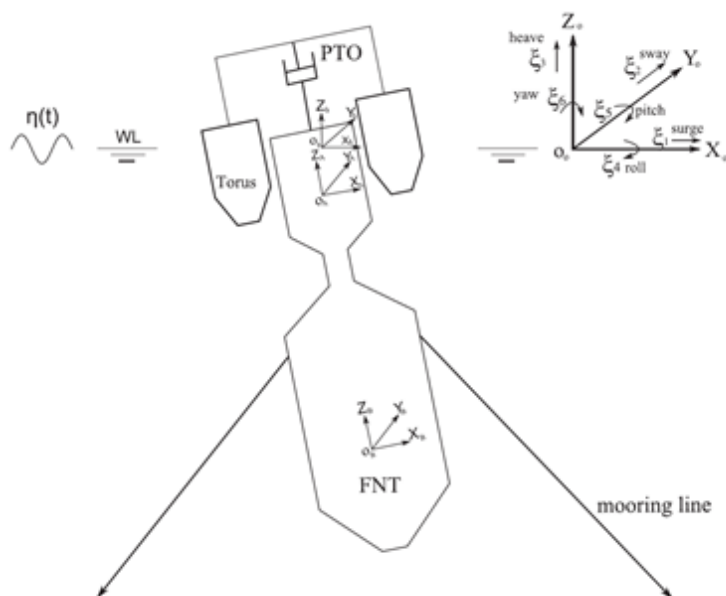
به منظور توصیف الگویی نیروهای وارد شده بر سیستم ویویاب، شکل ۵ شماتیکی از این سیستم را با استفاده از دستگاه مختصات نمایش می‌دهد. در این توصیف الگویی یک چهارچوب ثابت زمینی O_0XYZ فرض شده است تا درون صفحه O_0XY که روی سطح آب افتاده، قرار بگیرد. این چهارچوب علاوه بر امواج، مسیر حرکت بدنه را نیز تعریف می‌کند. چهارچوب‌های ثابت بدنه چنبره (بدنه A) و مخزن-گردن-شناور (بدنه B) به ترتیب با O_{AXYZ} و O_{BXYZ} تعریف شده‌اند و مبدأ مختصات آن‌ها در مرکز ثقل بدنه‌های مربوطه‌شان است، آن‌ها حرکت زاویه‌ای هر تک‌بدنه را نسبت به قالب ثابت زمینی تعریف می‌کنند. یک چهارچوب انتقالی درونی O_1XYZ در حالت تعادل نسبت به محورهای عمودی که از مرکز ثقل چنبره عبور می‌کند، ثابت شده است.

1. Axi-symmetric
2. Self reacting
3. Torus
4. Float-Neck-Tank (FNT)

چهارچوب O_hXYZ به بدنه وصل نشده و محور O_{hZ} همواره به سطح آب ساکن عمود است و حرکت انتقالی هر بدنه را تعریف می‌کند [۱۸]. شکل ۶ ساختار الگویی ویوباب را نشان می‌دهد که شامل دو بخش اصلی است: یک چنبره (بدنه A) و یک مخزن شناور (بدنه B). این دو بخش فقط به صورت عمودی نسبت به یکدیگر نوسان می‌کنند. هریک از این بدنه‌ها می‌توانند به شش روش مختلف حرکت کنند که شامل سه حرکت چرخشی (پیچ، سرازیری و خمش) و دو حرکت انتقالی (حرکت موجی و حرکت نوسانی) هستند. علاوه بر این، دو حرکت انتقالی اضافی وجود دارد که هر بدنه به صورت جداگانه در جهت عمودی حرکت می‌کند. این ترکیب حرکتی به این دستگاه امکان می‌دهد تا با هفت درجه آزادی، انرژی جنبشی امواج را به بهترین شکل ممکن جذب و به انرژی مکانیکی تبدیل کند [۱۸ و ۲۰].



شکل ۵. نیروهای وارد شده بر قسمت‌های مختلف مبدل انرژی موج ویوباب [۲۱]



شکل ۶. توصیف الگویی ویوباب که چنبره (بدنه A) و مخزن - گردن - شناور (بدنه B) را نشان می‌دهد. همچنین، چهارچوب‌های بدنه ثابت هم‌پایه (O_{BXYZ} و O_{AXYZ})، چهارچوب درونی ثابت زمینی (O_0XYZ) و چهارچوب درونی انتقالی (O_hXYZ) نشان داده شده‌اند [۱۷]

به منظور بررسی نیروهای وارد شده بر مبدل، شکل ۵ ساختار الگویی ویوایب را به عنوان یک سیستم پویای ساده با ۷ درجه آزادی و سه عنصر اصلی به تصویر می‌کشد. این سه عنصر اصلی شامل: چنبره، که بخش اصلی و خارجی سیستم است و به عنوان بدنه اصلی عمل می‌کند؛ مخزن-گردن-شناور، که به عنوان بخشی که حرکت عمودی سیستم را تسهیل می‌کند و نقش کلیدی در جذب انرژی امواج دارد؛ و سیستم تولید توان، که شامل اجزای مختلفی مانند نگه‌دارنده، چرخ‌دنده‌ها، گیربکس و ژنراتور است و وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را به عهده دارد. این سه عنصر با همدیگر تعامل دارند و نیروهای مختلفی را ایجاد می‌کنند که بر دینامیک کلی سیستم تأثیر می‌گذارد [۱۷].

۳. ورودی‌های سیستم

ورودی‌های سیستم به مجموعه نیروها و پارامترهایی اشاره دارد که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. این ورودی‌ها شامل نیروهای هیدرودینامیکی، جرم هیدرودینامیکی اضافه شده و نیروهای ویسکوز هستند. در ادامه، هر یک از این ورودی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند [۶ و ۲۲].

۳-۱. نیروهای هیدرودینامیکی

نیروهای هیدرودینامیکی شامل نیروی تحریک و گشتاور فرود-کریلو بین چنبره و مخزن-گردن-شناور هستند. این نیروها به دلیل میدان فشار تولیدی توسط امواج غیر توزیعی تولید می‌شوند. این نیروها به دلیل میدان فشار تولیدی توسط امواج غیر توزیعی تولید می‌شوند. هنگامی که دستگاه، حرکات دامنه بزرگ ناشی از وضعیت‌های تشدید و امواج با دامنه بزرگ را متحمل می‌شود، تغییر قابل توجهی در مساحت سطح مرطوب شده و پروفایل موج با زمان به وجود می‌آید. بنابراین، حرکات دامنه بزرگ مبدل انرژی معرف یک رابطه غیر خطی بین فشار اعمالی روی سطح بدنه ناشی از امواج غیر توزیعی و جابه‌جایی‌های بدنه است. از این رو، می‌توان گفت که نیروهای فرود-کریلو به حرکت مبدل انرژی مربوط می‌شوند، زیرا فشار موج وارد شده غیر توزیعی روی سطح مرطوب لحظه‌ای $S_b(t)$ بدنه انتگرال‌گیری شده است، که با زمان تغییر می‌کند. نیروهای تحریک و گشتاورهای فرود-کریلو غیر خطی را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد [۲۱]:

$$P_d = -\rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه ۱، ϕ_i پتانسیل سرعت موج غیر توزیعی است. با فرض آب عمیق، پتانسیل سرعت در عمق z در زیر سطح آب آرام با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\phi_i = \frac{A_w g}{w_e} e^{kz} \sin(kx + w_e t) \quad (2)$$

در رابطه ۲، A_w دامنه موج است، k عدد موج است که توسط $k = 2\pi / \lambda \approx 1.56$ تعریف شده است (برای آب‌های عمیق)، T دوره تناوب موج است، λ طول موج و w_e فرکانس برخورد موج است [۲۳].

$$F_{FK_d} = \iint S_b(t) P_d \left(\begin{matrix} n_i^j \\ r_i^j \times n_i^j \end{matrix} \right) dS \quad (3)$$

در رابطه ۳، F_{FK_d} نیروی فرود-کریلو^۱ است که به دلیل میدان فشار تولیدی توسط امواج غیر توزیعی ایجاد می‌شود. همچنین، S_b سطح مرطوب لحظه‌ای بدنه در زمان t است. این متغیر نشان‌دهنده سطحی از بدنه است که در تماس با آب قرار دارد و تحت تأثیر فشار امواج قرار می‌گیرد. Γ_j^1 بردار مکان صفحه مرطوب i با مساحت dS است که در چهارچوب بدنه کلی بیان شده است؛ و Π_1^1 بردار واحد نرمال است که به بیرون همین صفحه اشاره می‌کند. P_d فشار دینامیکی امواج غیر توزیعی است که بر سطح مرطوب بدنه اعمال می‌شود. فشار دینامیکی موج وارد شده P_d از بخش هیدرودینامیکی معادله برنولی خطی شده که در رابطه ۱ آورده شده است [۲۱].

۳-۲. جرم هیدرودینامیکی اضافه شده

جرم هیدرودینامیکی اضافه شده به جرم آبی اشاره دارد که به دلیل حرکت بدنه با آن در تعامل است. این جرم اضافه باعث افزایش اینرسی سیستم می‌شود و بر حرکت کلی و کارایی دستگاه تأثیر می‌گذارد [۲۴].

۳-۳. نیروهای ویسکوز

نیروهای ویسکوز شامل نیروهای درگ و تشعشی هستند [۲۵]. نیروی درگ به دلیل حرکات دامنه بزرگ دستگاه به صورت غیرخطی و به وسیله یک رابطه درجه دوم و مشابه با معادله موریسون^۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۷ و ۲۶]. نیروی تشعشی^۲ به نیرویی اشاره دارد که به دلیل انتشار امواج از بدنه نوسانی مبدل انرژی موج ایجاد می‌شود. این نیرو زمانی ایجاد می‌شود که بدنه مبدل انرژی امواج را به صورت پیوسته و متناوب منتشر کند. نیروی تشعشی به طور معمول در محاسبات هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر پایداری و حرکت کلی دستگاه تأثیرگذار است. به بیانی، زمانی که بدنه مبدل انرژی موج نوسان می‌کند، امواجی را ایجاد و منتشر می‌کند که به نوبه خود نیرویی را به بدنه بازمی‌گرداند [۲۷]. این نیروی بازگشتی به عنوان نیروی تشعشی شناخته می‌شود و می‌تواند بر حرکت و رفتار کلی سیستم تأثیر بگذارد. نیروی تشعشی می‌تواند به صورت رابطه ۴ محاسبه شود [۲۱].

$$F_r = -A\xi - \int_0^t K_r(t-\tau)\xi(\tau) d\tau \quad (4)$$

که در آن $A \in R^{7*7}$ ماتریس جرم اضافه شده فرکانس نامحدود ثابت است که معرف سکون مایعی است که به واسطه بدنه در حال نوسان، در حرکت است. همچنین، $K_r \in R^{7*7}$ ماتریس تشعشی توابع پاسخ ضربه و $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7]^T$ بیانگر بردار حرکت سیستم است [۲۱]. بردار حرکت سیستم ξ شامل شش نوع حرکت مختلف بدنه در جهت‌های مختلف است. این حرکات شامل سه حرکت چرخشی و سه حرکت انتقالی است. به طور دقیق‌تر، این حرکات عبارت‌اند از: حرکت در جهت محور x که شامل حرکت انتقالی به سمت جلو و عقب است، حرکت در جهت محور y که شامل حرکت انتقالی به سمت چپ و راست است، و حرکت در جهت محور z که شامل حرکت انتقالی به سمت بالا و پایین است [۲۸]. همچنین، سه حرکت چرخشی شامل چرخش حول محور x به نام رول، چرخش حول محور y به نام پیچ، و چرخش حول محور z به نام یاؤ است. این ترکیب حرکتی به سیستم اجازه می‌دهد تا با ۷ درجه آزادی حرکت کند [۲۹]. ماتریس A به عنوان ماتریس جرم هیدرودینامیکی یا ماتریس جرم افزوده^۳ شناخته می‌شود. این ماتریس نشان‌دهنده تأثیر جرم اضافی آب روی دینامیک سیستم است که به دلیل حرکت بدنه با آن در تعامل است. به بیان دیگر، ماتریس A بیانگر اینرسی اضافی ایجاد شده توسط آب پیرامون بدنه مبدل انرژی است [۳۰]. برای محاسبه ماتریس A، از روش‌های هیدرودینامیکی و تحلیلی استفاده می‌شود [۳۱]. این روش‌ها شامل حل معادلات جریان سیال و تحلیل پاسخ دینامیکی بدنه در برابر امواج است. به طور خاص، محاسبه ماتریس جرم افزوده نیازمند تعیین رفتار دینامیکی بدنه مبدل انرژی در آب و اندازه‌گیری نیروهای واکنشی آب در مقابل حرکت بدنه است [۳۲]. برای محاسبه ماتریس A از نرم‌افزارهای تخصصی هیدرودینامیکی و مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود که توانایی تحلیل و شبیه‌سازی جریان سیال و نیروهای هیدرودینامیکی را دارند [۳۳ و ۳۴]. همچنین، مقادیر ماتریس A بر اساس نتایج تجربی و آزمایشگاهی نیز به دست می‌آیند که شامل تست‌های تجربی در محیط‌های واقعی یا شبیه‌سازی شده است [۳۵].

۴. خروجی‌های سیستم

خروجی‌های سیستم به پارامترها و نیروهایی اشاره دارد که از عملکرد سیستم ناشی می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم کرد: توان تولیدی توسط ژنراتور و نیروهای واکنشی بین اجزای سیستم [۳۶].

1. Morison Equation
2. Radiation Force
3. Added Mass Matrix

۴-۱. توان تولیدی توسط ژنراتور

از اصلی‌ترین خروجی‌های سیستم، توان تولیدی توسط ژنراتور است [۱۳ و ۳۷]. این توان به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و نشان‌دهنده کارایی کلی سیستم در تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی است. میزان توان تولیدی وابسته به عوامل مختلفی از جمله شرایط جوی، نوع موج و کارایی سیستم تولید توان است [۳۸].

۴-۲. نیروهای واکنشی بین اجزای سیستم

نیروهای واکنشی بین سیستم تولید توان و مخزن-گردن-شناور، سیستم تولید توان و چنبره، و بین مخزن-گردن-شناور و چنبره از دیگر خروجی‌های سیستم هستند [۳۹]. این نیروها به دینامیک سیستم و تعامل بین اجزای مختلف آن اشاره دارند و بر پایداری و کارایی کلی سیستم تأثیر می‌گذارند [۲۴ و ۴۰].

- نیروهای واکنشی بین سیستم تولید توان و مخزن-گردن-شناور: این نیروها نشان‌دهنده تأثیر متقابل این دو بخش بر یکدیگر هستند و بر انتقال انرژی و حرکت کل سیستم اثر دارند.
- نیروهای واکنشی بین سیستم تولید توان و چنبره: این نیروها نشان‌دهنده تعامل بین سیستم تولید توان و چنبره هستند و بر استحکام و پایداری سیستم در برابر امواج تأثیر می‌گذارند.
- نیروهای واکنشی بین مخزن-گردن-شناور و چنبره: این نیروها به دینامیک حرکت و تعامل بین مخزن-گردن-شناور و چنبره مربوط می‌شوند و بر عملکرد کلی سیستم و کارایی آن در جذب انرژی امواج اثر دارند.

۵. یافته‌ها

جدول ۱، مقایسه‌ای بین مبدل‌های مختلف انرژی موج را، با توجه به گزارش شرکت‌های سازنده مبدل‌ها ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۱، مبدل انرژی موج ویوباب ساخته‌شده در مقیاس واقعی و در سایز متوسط توان ۱۰۰۰ کیلووات را در آب‌های عمیق تولید می‌کند. مبدل «cak» در سایز متوسط و عمق زیاد (Deep) توان ۱۰۰۰ کیلووات را تولید می‌کند. مبدل «Oceantec» نیز در سایز متوسط و عمق ۳۰-۵۰ متر قادر به تولید ۵۰۰ کیلووات توان است. مبدل «Plamis» در سایز متوسط و عمق ۵۰-۷۰ متر، ۷۵۰ کیلووات توان تولید می‌کند. مبدل «P-P Converter» که در سایز بزرگ و عمق زیاد (Deep) قرار دارد، توان تولیدی بالایی معادل ۳۶۲۰ کیلووات دارد. مبدل «Seabased» که در سایز کوچک و عمق ۳۰-۵۰ متر قرار دارد، توان کمی معادل ۱۵ کیلووات تولید می‌کند. مبدل «Wave Dragon» در سایز بزرگ و عمق ۳۰-۵۰ متر توان بسیار بالایی معادل ۷ هزار کیلووات تولید می‌کند. مبدل «Aqua Buoy» در سایز کوچک و عمق بیشتر از ۵۰ متر، ۲۵۰ کیلووات توان تولید می‌کند. مبدل «AWS» در سایز متوسط و عمق ۴۰-۱۰۰ متر، توان تولیدی معادل ۲۳۲۰ کیلووات دارد. مبدل «Langlee» نیز در سایز متوسط و عمق زیاد (Deep)، ۱۶۶۵ کیلووات توان تولید می‌کند. در نهایت، مبدل «OE Bouy» در سایز متوسط و عمق زیاد (Deep) توان بالایی معادل ۲۸۰۰ کیلووات تولید می‌کند [۴۱].

جدول ۱. مقایسه توان تولیدی مبدل‌های انرژی امواج [۱۶، ۱۸ و ۴۱]

مبدل	توان تولیدی (کیلووات)	عمق (متر)	اندازه
cak	۱۰۰۰	>100	متوسط
Oceantec	۵۰۰	۳۰-۵۰	متوسط
Plamis	۷۵۰	۵۰-۷۰	متوسط
P P Converter	۳۶۲۰	>100	بزرگ
Seabased	۱۵	۳۰-۵۰	کوچک
Wave Dragon	۷۰۰۰	۳۰-۵۰	بزرگ
Aqua Buoy	۲۵۰	> ۵۰	کوچک
A W S	۲۳۲۰	۴۰-۱۰۰	متوسط
Langlee	۱۶۶۵	Deep	متوسط
OE Bouy	۲۸۰۰	Deep	متوسط

مقایسه‌ای دیگر بین برخی مبدل‌های انرژی امواج، در سال ۲۰۱۴ در ۱۰ نقطه مرجع جزایر قناری انجام شده که نتایج حاصل از این مقایسه در جدول ۲ قابل مشاهده است [۱۸]. منظور از TT، زمان کل (Total Time) و منظور از WT، زمان زمستان (Winter Time) است. همین‌طور، منظور از Point/period نقاط مرجع و دوره‌های زمانی هستند که در آن‌ها توان تولیدی مبدل‌های مختلف انرژی موج اندازه‌گیری شده است. این نقاط مرجع (C1 تا C10) به مناطق جغرافیایی خاص در جزایر قناری اشاره دارند که در آن‌ها اندازه‌گیری‌های مربوط به توان تولیدی انجام شده است. هر نقطه مرجع دارای دو مقدار برای زمان کل (Total Time) و زمان زمستان (Winter Time) است [۴۲]. این دوره‌های زمانی به بازه‌هایی اشاره دارند که در آن‌ها داده‌ها جمع‌آوری شده‌اند تا میانگین توان تولیدی هر مبدل انرژی موج در شرایط مختلف جوی و زمانی محاسبه شود. این جدول نشان‌دهنده میزان متوسط توان تولیدی هر مبدل انرژی موج در دوره‌های مختلف زمانی است. مبدل «Langlee» یکی از انواع مبدل‌های انرژی امواج است که در این جدول با مقایسه توان تولیدی آن در دوره‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مبدل «OE Buoy» نیز نوعی دیگر از مبدل‌های انرژی امواج است که توان تولیدی آن در زمان کل و زمان زمستان در جدول ذکر شده است. مبدل «Aqua Buoy» نیز در این جدول مورد بررسی قرار گرفته و میزان توان تولیدی آن در دوره‌های مختلف زمانی مقایسه شده است. مبدل «AWS» که یکی دیگر از مبدل‌های انرژی امواج است، توان تولیدی آن در جدول مشخص شده است. مبدل «Pelamis» نیز در این جدول مورد بررسی قرار گرفته و میزان توان تولیدی آن در زمان‌های مختلف ذکر شده است. در نهایت، مبدل «Wavebob» که یکی از مبدل‌های انرژی امواج است، توان تولیدی آن در دوره‌های زمانی مختلف در جدول ۲ مقایسه شده است.

جدول ۲. میزان متوسط توان تولیدی ۶ مبدل انرژی موج در جزایر قناری [۱۸ و ۴۲]

P_E (kW) Point/period	Wavebob		Pelamis		AWS		Aqua Buoy		OE Buoy		Langlee	
	TT	WT	TT	WT	TT	WT	TT	WT	TT	WT	TT	WT
C1	۸۹/۶	۱۱۲/۸	۶۵/۴	۷۸/۸	۲۶۰/۱	۴۰۳/۲	۲۴/۳	۵۲/۲	۵۲/۹	۳۲/۳	۱۲۶/۹	۱۶۸/۸
C2	۸۷/۴	۱۱۳/۴	۶۶/۲	۷۹/۵	۲۶۰/۲	۴۰۳/۰	۲۴/۶	۵۲/۱	۵۳/۰	۳۲/۵	۱۲۸/۲	۱۷۱/۲
C3	۹۵/۵	۱۲۳/۰	۷۶/۰	۹۰/۰	۲۷۳/۵	۴۲۱/۰	۲۷/۶	۶۱/۵	۶۲/۰	۳۶/۰	۱۴۳/۱	۱۸۸/۵
C4	۹۴/۴	۱۲۱/۳	۷۴/۸	۸۸/۳	۲۷۱/۸	۴۱۸/۵	۲۷/۲	۶۰/۵	۶۰/۶	۳۵/۴	۱۴۱/۱	۱۸۵/۵
C5	۸۹/۷	۱۱۱/۵	۷۲/۵	۸۰/۸	۲۵۵/۳	۳۹۱/۱	۲۵/۸	۶۱/۵	۵۷/۲	۳۲/۳	۱۳۴/۴	۱۶۹/۲
C6	۹۱/۳	۱۱۲/۹	۷۴/۱	۸۲/۱	۲۵۷/۷	۳۹۴/۰	۳۲/۳	۶۳/۱	۵۸/۲	۳۲/۷	۱۳۷/۱	۱۷۱/۸
C7	۹۸/۳	۱۲۱/۹	۸۱/۳	۹۰/۴	۲۷۰/۰	۴۱۲/۶	۲۸/۷	۶۹/۲	۶۴/۲	۳۵/۸	۱۴۹/۵	۱۸۷/۹
C8	۱۰۳/۷	۱۲۴/۹	۸۷/۸	۹۳/۴	۲۷۵/۶	۴۱۷/۱	۳۰/۷	۷۵/۶	۶۶/۳	۳۷/۰	۱۵۹/۶	۱۹۳/۷
C9	۱۰۴/۲	۱۲۴/۷	۸۸/۵	۹۳/۲	۲۷۵/۸	۴۱۶/۶	۳۱/۰	۷۶/۳	۶۶/۱	۳۷/۰	۱۶۰/۷	۱۹۳/۴
C10	۱۰۵/۷	۱۲۵/۷	۹۰/۳	۹۴/۲	۲۷۷/۴	۴۱۸/۱	۳۱/۵	۷۸/۳	۶۷/۱	۳۷/۳	۱۶۳/۶	۱۹۵/۵

۶. بحث

انرژی موجود در امواج اقیانوس‌ها به دلیل انباشتگی و پتانسیل بالای خود به عنوان منبعی تجدیدپذیر و پاک از اهمیت زیادی برخوردار است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مبدل‌های انرژی موج دارای تنوع و قابلیت‌های مختلفی هستند که به شرایط محیطی و طراحی خاص هر یک وابسته است. برای مثال، مبدل «Wave Dragon» که در سایز بزرگ و در عمق ۳۰-۵۰ متر نصب می‌شود، با تولید ۷ هزار کیلووات توان، عملکرد بسیار بالاتری نسبت به دیگر مبدل‌ها دارد. این نکته نشان می‌دهد مبدل‌های بزرگ‌تر و با عمق نصب کمتر توان بیشتری تولید می‌کنند، اما همچنین نیازمند شرایط خاص و هزینه‌های بیشتری برای نصب و نگهداری هستند. در جدول ۲، نتایج اندازه‌گیری توان تولیدی مبدل‌های مختلف در نقاط مرجع جزایر قناری نشان می‌دهد که شرایط جغرافیایی و جوی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مبدل‌ها دارد. برای مثال، مبدل «Wavebob» در اکثر نقاط مرجع توان بالایی تولید می‌کند، اما مبدل «Aqua Buoy» در همین نقاط توان کمتری تولید می‌کند که ممکن است به دلیل محدودیت‌های طراحی یا کارایی کمتر در شرایط خاص باشد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد هر مبدل باید با دقت و بر اساس شرایط

محیطی محل نصب انتخاب شود تا عملکرد بهینه‌ای داشته باشد. یکی دیگر از نکات مهم در تحلیل داده‌های جدول ۲، تغییرات توان تولیدی در دوره‌های زمانی مختلف است. برای مثال، مبدل «OE Buoy» در دوره زمانی زمستان (WT) توان کمتری نسبت به دوره زمانی کل (TT) تولید می‌کند. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر شرایط جوی و دریایی فصلی بر عملکرد مبدل‌ها است. این امر نیازمند طراحی مبدل‌هایی با قابلیت تطبیق با شرایط فصلی و جغرافیایی است تا توانایی تولید انرژی در تمامی فصل‌های سال حفظ شود. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب و طراحی مبدل‌های انرژی موج باید با دقت و با توجه به شرایط محلی و جوی انجام شود.

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه مبدل‌های مختلف انرژی موج، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب و طراحی مبدل‌های انرژی موج باید با دقت و با توجه به شرایط محلی و جوی انجام شود. مبدل‌های بزرگ‌تر و با عمق نصب کمتر توان بیشتری تولید می‌کنند، اما همچنین نیازمند شرایط خاص و هزینه‌های بیشتری برای نصب و نگهداری هستند. از طرف دیگر، مبدل‌های کوچک‌تر ممکن است توان کمتری تولید کنند، اما در شرایط جغرافیایی مختلف قابل استفاده باشند. بررسی دقیق تفاوت‌های عملکردی مبدل‌ها در دوره‌های زمانی مختلف به بهبود طراحی‌ها و افزایش کارایی این سیستم‌ها منجر می‌شود. همین‌طور، نتیجه شده است که مبدل انرژی موج ویوباب به عنوان یک نمونه موفق از مبدل‌های انرژی موج، نشان‌دهنده توانایی‌های این فناوری در تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی است. با این حال، هزینه‌های زیاد طراحی و ساخت این مبدل‌ها، یکی از چالش‌های اصلی پیش روی توسعه این فناوری است. بهبود تکنولوژی و کاهش هزینه‌ها می‌تواند راه‌حلی برای افزایش بهره‌وری و استفاده گسترده‌تر از انرژی موج در آینده باشد.

منابع

- [1] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. M. De Alegría, and I. Kortabarria, "Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 27, pp. 413-434, 2013.
- [2] L. Rusu and F. Onea, "The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1348-1362, 2017.
- [3] Y. Hong, R. Waters, C. Boström, M. Eriksson, J. Engström, and M. Leijon, "Review on electrical control strategies for wave energy converting systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 329-342, 2014.
- [4] S. Lindroth and M. Leijon, "Offshore wave power measurements—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4274-4285, 2011.
- [5] A. Clément *et al.*, "Wave energy in Europe: current status and perspectives," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 6, no. 5, pp. 405-431, 2002.
- [6] E. Ozkop and I. H. Altas, "Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 106-115, 2017.
- [7] O. Choupin, F. P. Andutta, A. Etemad-Shahidi, and R. Tomlinson, "A decision-making process for wave energy converter and location pairing," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111225, 2021.
- [8] D. Satrio *et al.*, "Technical feasibility of implementing heaving device wave energy converter: a case study in Mentawai Waters, Indonesia," *Marine Systems & Ocean Technology*, vol. 20, no. 1, p. 4, 2025.
- [9] L. Wan, T. Moan, Z. Gao, and W. Shi, "A review on the technical development of combined wind and wave energy conversion systems," *Energy*, p. 130885, 2024.
- [10] X. Dong, Y. Li, D. Li, F. Cao, X. Jiang, and H. Shi, "A state-of-the-art review of the hybrid wind-wave energy converter," *Progress in Energy*, vol. 4, no. 4, p. 042004, 2022.
- [11] L. Xue *et al.*, "Control optimization and dynamic response analysis of a combined semi-submersible floating wind turbine and point-absorber wave energy converters," *Ocean Engineering*, vol. 320, p. 120212, 2025.
- [12] H. Bouhrim, A. El Marjani, R. Nechad, and I. Hajjout, "Ocean Wave Energy Conversion: A Review," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 11, p. 1922, 2024.
- [13] A. Shadmani, M. R. Nikoo, A. H. Gandomi, M. Chen, and R. Nazari, "Advancements in optimizing wave energy converter geometry utilizing metaheuristic algorithms," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 197, p. 1. 2024, 14398
- [14] J. Saldaña, M. Yurukcu, N. Boppana, S. Arbabi, J. Henry, and S. Ziyanak, "Ocean Energy," in *Energy Transition in the Oil and Gas Industry*: CRC Press, 2025, pp. 446-483.
- [15] S. Foteinis, "Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112448, 2022.
- [16] J. Weber, F. Mouwen, A. Parish, and D. Robertson, "Wavebob—research & development network and tools in the context of systems engineering," in *Proc. Eighth European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009*, vol. 8, no. 1, pp. 416-420 .
- [17] M. Shadman, S. F. Estefen, C. A. Rodriguez, and I. C. Nogueira, "A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter," *Renewable energy*, vol. 115, pp. 533-546, 2018.
- [18] E. Rusu, "Evaluation of the wave energy conversion efficiency in various coastal environments," *Energies*, vol. 7, no. 6, pp. 4002-4018, 2014.
- [19] Y. Zhang, Y. Zhao, W. Sun, and J. Li, "Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110764, 2021.
- [20] A. Majidi, B. Bingölbali, A. Akpınar, G. Iglesias, and H. Jafali, "Downscaling wave energy converters for optimum performance in low-energy seas," *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 705-722, 2021.

- [21] K. Tarrant and C. Meskell, "Investigation on parametrically excited motions of point absorbers in regular waves," *Ocean Engineering*, vol. 111, pp. 2016, 67-81.
- [22] I. Ö. Erselcan, D. Özkan, E. Sulukan, and T. S. Uyar, "Wave Energy Conversion Technologies," in *Renewable Energy Based Solutions*: Springer, 2022, pp. 345-361.
- [23] J. B. Frandsen, M. Doblaré, and P. Rodríguez-Cortez, "Preliminary technical assessment of the Wavebob Wave Energy Converter concept," *Abengoa Seapower, AR_WBPTA_rep_v0*, vol. 2, 2012.
- [24] T. Vervaet, V. Stratigaki, B. De Backer, K. Stockman, M. Vantorre, and P. Troch, "Experimental modelling of point-absorber wave energy converter arrays: A comprehensive review, identification of research gaps and design of the wecfarm setup," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 8, p. 1062, 2022.
- [25] M. H. Fakhri and D. Satrio, "Numerical analysis of drag coefficient for damping plate on the submerged body of two-body point absorber device as wave energy converter," 2023.
- [26] A. G. Majidi, B. Bingölbali, A. Akpınar, and E. Rusu, "Wave power performance of wave energy converters at high-energy areas of a semi-enclosed sea ", *Energy*, vol. 220, p. 119705, 2021.
- [27] B. Jozanović, I. Temiz, D. Šljivac, and B. Nakomčić-Smaragdakis, "Optimal Integration of Wave Energy Converters in the Vis Island Renewable Microgrid," *Tehnički vjesnik*, vol. 31, no. 5, pp. 1642-1652, 2024.
- [28] M. Tan, Y. Yang, P. Qian, Y. Si, and D. Zhang, "Numerical and experimental study on a scaled TALOS wave energy converter," in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, 2023*: ISOPE, pp. ISOPE-I-23-089 .
- [29] J. Zhang, H. Yu, and M. Chen, "Direct- Drive wave energy conversion with linear generator: A review of research status and challenges," *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 4, pp. 1020-1034, 2023.
- [30] A. G. Majidi, V. Ramos, K. Amarouche, P. R. Santos, L. Das Neves, and F. Taveira-Pinto, "Assessing the impact of wave model calibration in the uncertainty of wave energy estimation," *Renewable Energy*, vol. 212, pp. 415-429, 2023.
- [31] R. Mayon, D. Ning, B. Ding, and N. Y. Sergiienko, "Wave energy converter systems—status and perspectives," in *Modelling and Optimization of Wave Energy Converters*: CRC Press, 2022, pp. 3-58.
- [32] S. Prats Moreu, "Wave Energy Converter: Status, challenge and time-domain solvers," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2022 .
- [33] H. Zhang, N. Zhang, and X. Cao, "Conceptualization and dynamic response of an integrated system with a semi-submersible floating wind turbine and two types of wave energy converters," *Ocean Engineering*, vol. 269, p. 113517, 2023.
- [34] K. A. Prasad, A. A. Chand, N. M. Kumar, S. Narayan, and K. A. Mamun, "A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2354, 2022.
- [35] D. Curto, V. Franzitta, and A. Guercio, "Sea wave energy. A review of the current technologies and perspectives," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6604, 2021.
- [36] M. Rus, E. Mereuta, and M. Novetschi, "The potential of wave energy in the coastal region of Romania," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1037, no. 1: IOP Publishing, p. 012047 .
- [37] D. Ning and B. Ding, *Modelling and optimization of wave energy converters*. CRC Press, 2022.
- [38] S. Chandrasekaran and V. Sricharan, "Numerical study of beam-float wave energy converter with float number parametrization using WEC-Sim in regular waves with the Levelized Cost of Electricity assessment for Indian sea states," *Ocean Engineering*, vol. 237, p. 109591, 2021.
- [39] S. Jin, S. Zheng, and D. Greaves, "On the scalability of wave energy converters," *Ocean Engineering*, vol. 243, p. 110212, 2022.
- [40] B. Guo, T. Wang, S. Jin, S. Duan, K. Yang, and Y. Zhao, "A review of point absorber wave energy converters," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 10, p. 1534, 2022.
- [41] M. Satriawan, L. Liliyasi, W. Setiawan, and A. G. Abdullah, "Unlimited energy source: a review of ocean wave energy utilization and its impact on the environment," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, 2021.
- [42] M. A. Santoso *et al.*, "A Mini Review: Wave Energy Converters Technology, Potential Applications and Current Research in Indonesia," 2023.