

ارزیابی تجربی مبدل انرژی موج نوع تضعیف کننده در استخر موج آزمایشگاهی<sup>۱</sup>رضوان عالمیان<sup>۱</sup>، روزبه شفقت<sup>۲\*</sup>، میلاد قاسمی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> محقق ارشد گروه پژوهشی انرژی‌های دریایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ [ralamian@nit.ac.ir](mailto:ralamian@nit.ac.ir)<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، گروه پژوهشی انرژی‌های دریایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ [rshafaghat@nit.ac.ir](mailto:rshafaghat@nit.ac.ir)<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، گروه پژوهشی انرژی‌های دریایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ [miladghasemi1370@stu.nit.ac.ir](mailto:miladghasemi1370@stu.nit.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

انرژی‌های دریایی و اقیانوسی بخشی از انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که برای استحصال آن، از مبدل‌های انرژی امواج استفاده می‌شود. برای بررسی عملکرد این مبدل‌ها، مدل‌سازی تجربی کمک بسیار زیادی خواهد کرد. در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی مبدل انرژی موج از نوع سامانه تضعیف کننده در گروه پژوهشی انرژی‌های دریایه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده و در استخر موج این دانشگاه با اعمال شرایط امواج دریا مورد بررسی و ارزیابی تجربی قرار گرفته است. در این ارزیابی، اثرات پارامترهای دامنه و دوره تناوب موج، بر روی توان تولیدی متوسط و ماکزیمم سامانه ویواستار مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده شد که در دامنه‌های موج بالا (وضعیت ۱۳ تا ۱۵)، در سرعت‌های ۳۵ rpm و ۲۵ rpm توان تولیدی ماکزیمم، نزدیک به هم و به ترتیب برابر با ۳۶/۷ و ۳۱ وات بوده است. با توجه به آشفته بودن جریان و آسیب دیدن احتمالی سامانه در سرعت ۳۵ rpm، دامنه موج ۱۵ و سرعت ۲۵ rpm به دلیل عملکرد بهتر سامانه به عنوان بهینه‌ترین حالت انتخاب گشته است.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:

مبدل انرژی موج ویواستار

مدل‌سازی تجربی

استخر موج

دامنه موج

توان متوسط و ماکزیمم

## Experimental Evaluation of Attenuator WEC in A Laboratory Wave Tank

Rezvan Alamian<sup>1</sup>, Rouzbeh Shafaghat<sup>2\*</sup>, Milad Ghasemi<sup>3</sup><sup>1</sup> Senior Researcher Associate, Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology; [ralamian@nit.ac.ir](mailto:ralamian@nit.ac.ir)<sup>2</sup> Associate Professor of Mechanical Engineering, Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology; [rshafaghat@nit.ac.ir](mailto:rshafaghat@nit.ac.ir)<sup>3</sup> MSc of Mechanical Engineering, Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology; [ghasemi.milad1370@gmail.com](mailto:ghasemi.milad1370@gmail.com)

## ARTICLE INFO

## Article History:

Received: 14 Aug. 2018

Accepted: 16 Oct. 2018

## Keywords:

Wavestar WEC

Experimental modeling

Wave tank

Wave amplitude

Average and maximum power

## ABSTRACT

The marine and ocean energies are part of renewable energy that Wave energy converters (WECs) are used to extract them. Experimental modeling will be useful in evaluating their performance. In this research, the experimental model of an attenuator WEC is built in the Sea-Based Energy Research Group of the Babol Noshirvani University of Technology, and its performance is studied and evaluated in the wave tank of the university by applying the sea waves conditions. In this evaluation, the effects of wave amplitude and wave period on the average and maximum net power of the Wavestar system are investigated. According to the results, it was observed that in larger wave amplitudes (13 to 15), at 35 and 25 rpm, the maximum net power was close to each other and was 36.7 (Watts) and 31 (Watts), respectively. Due to the irregular wave and possible damage to the system at 35 rpm, the wave amplitude of 15 and the speed of 25 rpm are chosen as the optimal mode for better performance of the system.

<sup>۱</sup> نتایج ارائه شده در این مقاله حاصل طرح پژوهشی استانداری مازندران (مصوب شورای عالی عتف) می‌باشد.

۱:۴۰ سامانه‌ی ویواستار پرداخته شد. تست‌های آزمایشگاهی بر روی یک سامانه با ۴۰ شناور در دانشگاه آلبورگ با در نظر گرفتن شکل، سایز و وزن متغیر برای شناور انجام گردید. در این سیستم از سیستم انتقال توان مکانیکی با مکانیزم چرخ‌دنده و سیستم ترمز دیسکی استفاده شد [۹]. همچنین در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱، توسعه سامانه‌ی ویواستار نیسوم<sup>۳</sup> با همکاری دانشگاه آلبورگ انجام شد. این سامانه متشکل از ۳۸ شناور به قطر ۱ متر بوده که با اتصال به شبکه مورد استفاده قرار گرفت. بیش از ۵ سال عملیات آزمایشی این سامانه به طور مداوم در دریا انجام گرفت. قابل ذکر است این سامانه از یک سیستم انتقال توان هیدرولیکی و ژنراتور بهره برده است [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ سامانه‌ی ویواستار پلیموت<sup>۴</sup> مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش استخر موج در دانشگاه پلیموت بر روی سامانه با یک شناور به قطر ۱ متر و با هدف بررسی جزئی بر روی نیروهای وارد بر یاتاقان‌ها و نیز فشار وارد بر پوسته‌ی شناور انجام گرفت. در این سیستم نیز از سیستم انتقال توان هیدرولیکی مطابق با سامانه هیدرولیکی ویواستار کوچک نیسوم با کنترل لحظه‌ای استفاده شده است [۱۱-۱۳]. در مطالعه دیگری طی سال-های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ سامانه‌ی ویواستار هنسولم<sup>۵</sup> ساخته و بررسی شده است. بررسی این سیستم با ۴ سال آزمایش‌های مداوم در دریا و با اتصال به شبکه انجام شده است. این سیستم دارای ۲ شناور با قطر ۵ متر بوده و از سیستم انتقال توان هیدرولیکی با ژنراتور مجزا برای هر شناور استفاده شده است [۱۴-۱۷]. در کنار آزمایش‌های تجربی، کارهای بسیار با ارزشی نیز مرتبط با مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی به منظور شبیه‌سازی مبدل ویواستار و توسعه‌ی بیشتر و بهبود مستمر مفاهیم مورد نظر انجام شده است. هانسن و هدگارد [۱۸، ۱۹] در پژوهش خود به بررسی بهبود بازدهی سیستم انتقال توان به منظور کاهش اتلاف در زنجیره‌ی تبدیل انرژی مکانیکی (به‌دست آمده از شناور) به انرژی الکتریکی جهت اتصال به شبکه پرداختند. آنها با اعمال شرایط مختلف دریا بر روی سیستم انتقال توان و با شبیه‌سازی عددی اجزاء سیستم به بررسی توان خروجی سیستم پرداختند. همچنین در پژوهش‌های متعددی به بهبود پارامترهای فیزیکی (شکل شناور، شکل آرایه شناورها، وزن، ممان اینرسی و ...) به منظور بهبود عملکرد سیستم و افزایش انرژی خروجی پرداخته شده است. در این راستا، نامبیار و همکاران [۲۰] در مطالعه خود به بررسی استراتژی‌های مختلف کنترل سیستم انتقال توان سامانه ویواستار پرداختند و با یکدیگر مقایسه کردند. آنها تاثیراتی که کنترل سیستم انتقال توان بر روی تعاملات هیدرودینامیکی بین شناورها و توان کلی تولید شده توسط سیستم در محدوده موج‌های نامنظم داشته را مورد مطالعه قرار دادند. شکل شناورهای ویواستار نیز در تولید انرژی مهم می‌باشد. به این منظور نیز، کرامر و همکاران [۲۱] به ارزیابی عددی

نگرانی از گرما و آلودگی محیط‌زیست و همچنین از بین رفتن منافع فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را امری ضروری می‌نماید. امواج اقیانوس یکی از منابع مهم تولید انرژی هستند که تا کنون روش‌های گوناگونی برای استحصال انرژی از آن به کار گرفته شده است. لازمه جذب انرژی امواج، وجود دستگاهی است که بتواند با برخورد صحیح امواج با آن حداکثر انرژی موجود در آنها را جذب نماید. برای دستیابی به این هدف، مطالعات بسیار زیادی بر روی انرژی امواج انجام شده است و در برخی موارد سیستم‌های استحصال انرژی در شرایط واقعی دریا آزمایش و ساخته شدند [۱-۴]. مهار انرژی امواج دریا از آن جهت پیشنهاد بسیار قابل‌توجهی است که امواج ۱۵ تا ۲۰ برابر باد یا انرژی خورشیدی انرژی در دسترس دارند [۵]. به دستگاه‌هایی که انرژی امواج را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند، مبدل انرژی موج می‌گویند. اولین مرحله‌ی تبدیل انرژی موج معمولاً به وسیله یک سیستم نوسانی صورت می‌گیرد. این سیستم معمولاً می‌تواند انرژی پتانسیل و یا جنبشی را ذخیره کند. دومین مرحله، تبدیل انرژی به شکل‌های مؤثر انرژی مانند الکتریسیته است. به تجهیزات مورد استفاده در مرحله دوم، سیستم انتقال توان<sup>۱</sup> می‌گویند [۶]. مهم‌ترین کاربرد سیستم انتقال توان، تبدیل انرژی حاصل از موج به شکلی با کارایی بیشتر است که عموماً توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به این که روش‌های گوناگونی برای جذب انرژی امواج توسعه داده شده‌اند، فرآیند این تبدیل به صورت‌ها و اشکال مختلفی رخ می‌دهد که یکی از این روش‌ها استفاده از سامانه ویواستار می‌باشد. این دستگاه یکی از انواع سامانه‌های تضعیف‌کننده می‌باشد که توسط شرکت ویواستار انرژی<sup>۲</sup> ساخته شده است [۷]. سامانه‌های تضعیف‌کننده متمایل به جهت ورود امواج قرار داده می‌شوند که این کار تحریک یک سری قطعات و اجزای مفصلی و در نتیجه به حرکت درآمدن ژنراتورهای مولد الکتریسیته را در پی خواهد داشت. این سامانه‌ها معمولاً از یک سمت به کف دریا متصل شده و چیزی شبیه یک قطار دنباله‌دار نیمه‌مغروق به‌وجود می‌آورند. توسعه‌ی مبدل ویواستار، بر مبنای یک ارتباط نزدیک بین سرمایه‌گذار پروژه، شرکت ویواستار انرژی و دانشگاه آلبورگ انجام شده است. دانشگاه آلبورگ که در به سرانجام رسیدن این پروژه، از جایگاه بسیار ویژه‌ای برخوردار است، از سال ۲۰۰۱ در توسعه سامانه هزارپای ویواستار همکاری داشته و تست‌های استخر موج در این دانشگاه انجام شده است. سامانه آزمایشگاهی این مبدل، متشکل از ۲۰ شناور کروی با قطر ۲۰ سانتی‌متر بوده و با بهره‌گیری از سیستم انتقال توان مکانیکی بر اساس مکانیزم چرخ-دنده‌ای به بررسی عملکرد سامانه پرداخته است [۸]. در ادامه، در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ به بررسی عملکرد سیستم در مقیاس

(الف)



(ب)



شکل ۱: (الف) نمای سمت راست (ب) نمای سمت چپ استخر موج مستقر در گروه پژوهشی انرژی‌های دریای پایه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل [۲۳]

جدول ۱: جابجایی افقی موج‌ساز (دامنه موج) در ۱۵ وضعیت مختلف وضعیت بازو [۲۳]

شماره وضعیت بازو	جابجایی افقی موج‌ساز (cm)	شماره وضعیت بازو	جابجایی افقی موج‌ساز (cm)
۱	۶	۹	۱۹
۲	۷	۱۰	۲۱
۳	۹	۱۱	۲۲
۴	۱۱	۱۲	۲۳
۵	۱۳	۱۳	۲۸
۶	۱۴	۱۴	۲۹
۷	۱۵	۱۵	۳۶
۸	۱۷		

شکل ۲ شکل ۲-الف، سامانه موج‌ساز را نشان می‌دهد که توسط دستگاه اینورتر<sup>۶</sup> کنترل می‌شود. این سامانه به یک موتور ۵ کیلوواتی و یک گیربکس کاهنده دور، مجهز بوده و دور موتور را از ۱۰ تا ۱۵۰ دور بر دقیقه برای سامانه موج‌ساز تامین می‌نماید. در شکل ۲-ب شمایی از موتور متصل به موج‌ساز ارائه شده است. شکل ۲-ج نیز دمپر استفاده شده در استخر موج را نشان می‌دهد. این دمپر در ۴ حالت قابل تنظیم می‌باشد که وضعیت آن برای عمق‌های مختلف آب تغییر داده می‌شود. دوربین استفاده شده برای

شناورهای مختلف از جمله شناورهای دیسکی، مخروطی و کروی پرداختند. بررسی‌ها نشان دادند که تغییر شکل شناور می‌تواند بهبود و افزایشی در حدود ۵٪ تا ۱۰٪ در توان ایجاد نماید. در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات انجام شده، یک سیستم مبدل انرژی موج از نوع ویواستار با سامانه انتقال توان مکانیکی به عنوان طرحی نو و جدید در کشور طراحی و ساخته شده است. این سامانه آزمایشگاهی دارای شش شناور کروی می‌باشد که در استخر موج دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مورد ارزیابی تجربی قرار گرفته است. عملکرد سامانه در دامنه موج‌های مختلف و دورهای مختلف موتور مورد بررسی قرار گرفته و توان تولیدی متوسط و ماکزیمم سامانه در شرایط مختلف موج دریا با توجه به ولتاژ و جریان تولیدی سامانه محاسبه شده است. در انتها نیز مطلوب‌ترین دامنه موج و دور موتور با توجه به شرایط موج و توان تولیدی انتخاب شده تا در گام‌های بعدی توسعه طرح، مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲ - تجهیزات آزمایشگاهی

برای آزمایش سامانه مبدل انرژی موج طراحی شده، استخری به طول ۱۱ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۳ متر در گروه پژوهشی انرژی-های دریای پایه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل طراحی و ساخته شده است. این استخر، شامل سامانه موج‌ساز جهت تولید امواج منظم مورد نظر و دمپر جهت شبیه‌سازی ساحل دریا و جلوگیری از آشفستگی موج‌های برگشتی و برخورد آن‌ها با مبدل می‌باشد. در شکل ۱ نماهای چپ و راست از استخر ارائه شده است. همانطور که در این نماها مشاهده می‌شود، راهرویی جهت دسترسی به مبدل و سیستم مهاربندی آن و همچنین پنجره‌هایی جهت مشاهده عملکرد مبدل و فیلم‌برداری از آن تعبیه شده است. سامانه موج‌ساز طراحی شده، امکان آزمایش را در ۱۵ طول بازو (۱۵ دامنه موج مختلف) با جابجایی افقی ۶ تا ۳۶ سانتی‌متر برای صفحه موج‌ساز فراهم می‌نماید. مقدار جابجایی افقی صفحه موج‌ساز برای ۱۵ وضعیت مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

## Archive of SID

مقاومت ثابت به وجود خواهد آمد و با قرار دادن یک سر متغیر بین این سیم ها و حرکت آن، مقدار مقاومت مطلوب به دست می آید. در این سامانه، مقاومت رئوستا بر روی ۲۰ اهم تنظیم شده است. زیرا این مقدار منجر به تقابلی مناسب بین سرعت چرخش و گشتاور تولیدی سامانه برای دستیابی به مناسب ترین توان شده است. همچنین، ولتاژ و جریان خروجی سامانه توسط دو مولتی متر مدل HIOKI 3256-DIGITAL Hi TESTER و TESTER و HIOKI 3200-DIGITAL Hi مطابق شکل ۳-ب ثبت شده است. از یک ژنراتور مدل TGET260-I-0.1KW-100R برای تبدیل انرژی مکانیکی سیستم به انرژی الکتریکی استفاده شده است که در شکل ۳-ج نشان داده شده است.

(الف)



(ج)

(ب)



شکل ۳: الف) رئوستا (ب) مولتی مترها (ج) ژنراتور مدل TGET260-I-0.1KW-100R

### ۳- طراحی و ساخت مدل

سیستم انتقال توان مکانیکی طراحی شده برای مبدل در شکل ۴ نشان داده شده است. به این منظور، از شش شناور کروی به قطر ۳۶ سانتی متر استفاده شده است که همگی از جنس فولاد بوده و با اتصال به بازویی به طول ۱ متر بر روی سیستم سوار شده اند. بازوهای مورد استفاده در سامانه از نوع پیچی بوده و موقعیت شناور با حرکت در راستای محور بازو قابل تنظیم می باشد. همچنین، در طراحی، تکیه گاهی برای پایدار ماندن سیستم در مقابل موج در نظر گرفته شده و به دیواره استخر موج جوش داده شده است.

ثابت حرکت مبدل و نوسانات امواج در این تست ها، دوربین نیکون مدل COOLPIXL830 می باشد.

(الف)



(ب)



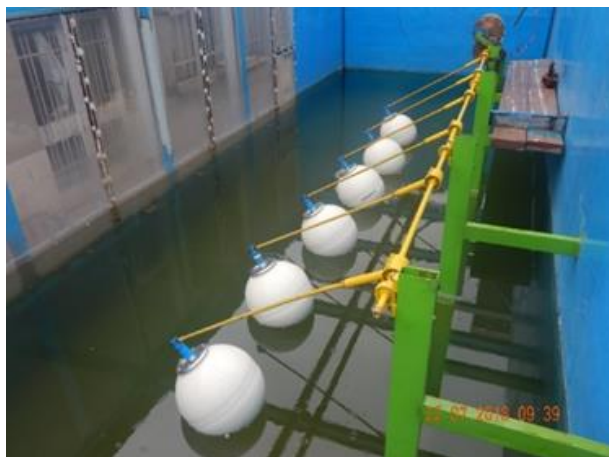
(ج)



شکل ۲: الف) سامانه موج ساز استخر موج (ب) موتور ۵ کیلوواتی به همراه گیربکس کاهنده دور (ج) دمپر مستقر در استخر موج [۲۳]

به منظور اعمال مقاومت متغیر در توان بالا از یک رئوستا مطابق شکل ۳-الف استفاده شده است. رئوستاها معمولاً خطی هستند. در رئوستا یک سیم با دور بالا بر روی یک استوانه پیچیده شده و

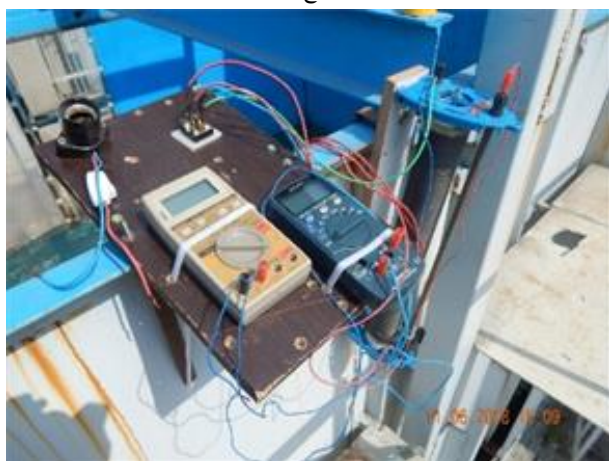
(الف)



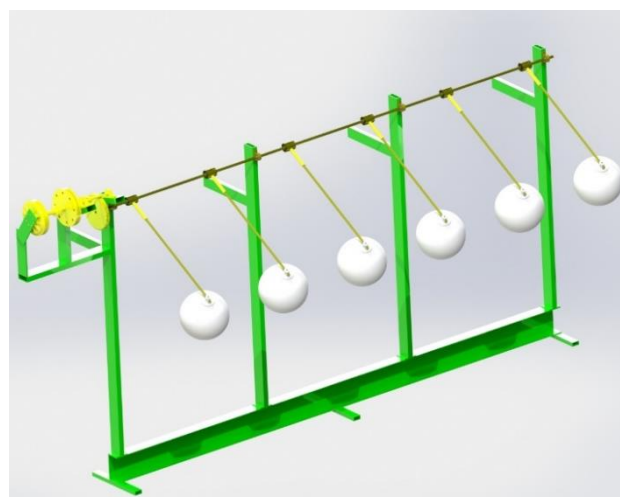
(ب)



(ج)



شکل ۵: الف) مجموعه کامل مبدل انرژی موج مستقر در استخر موج (ب) مجموعه چرخ دنده، چرخ طیار و ژنراتور (ج) مجموعه رنوستا و مولتی متر-ها برای ثبت ولتاژ و جریان تولیدی توسط سامانه

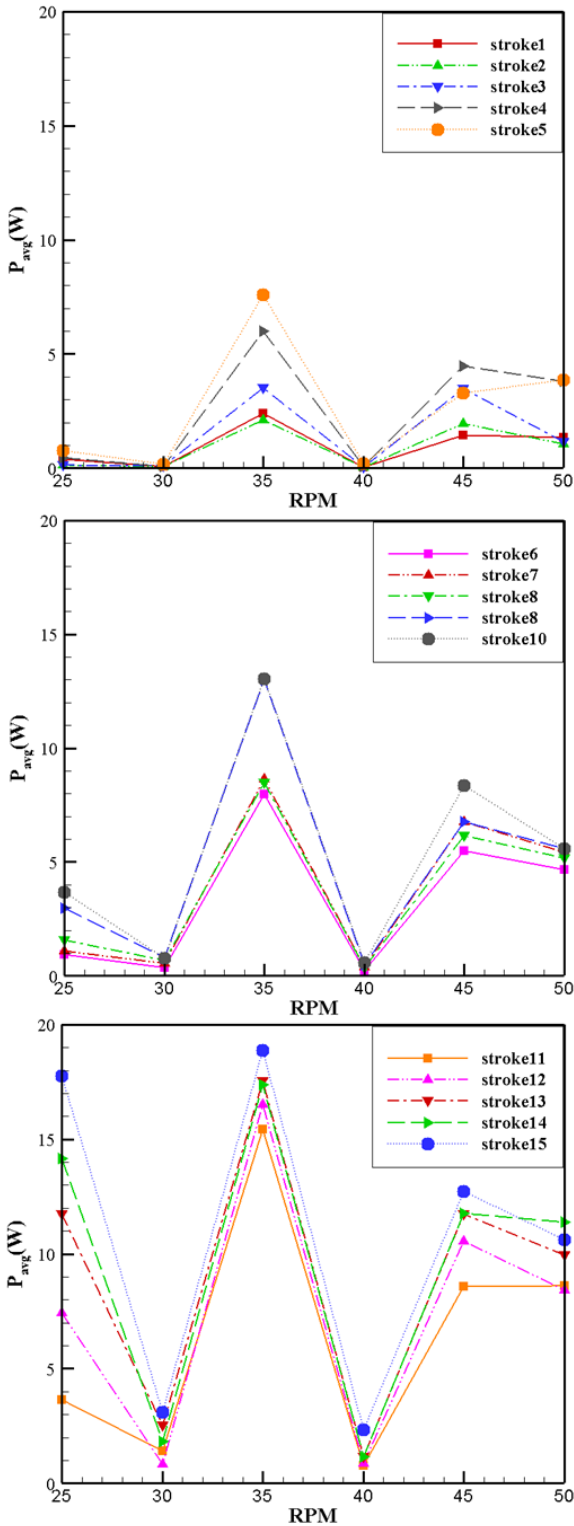


شکل ۴: سیستم مبدل انرژی موج طراحی شده از نوع سامانه ویواستار

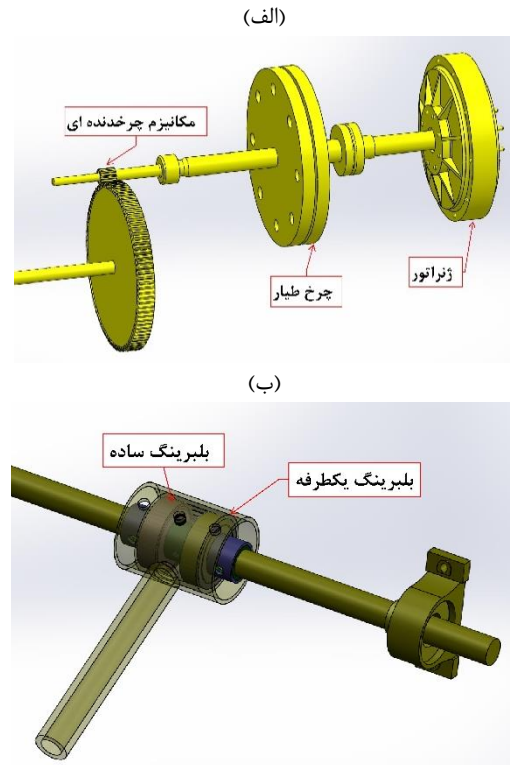
سیستم آزمایشگاهی سامانه طراحی شده و مجموعه تجهیزات استفاده شده در ساخت آن، در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف نحوه استقرار سامانه در استخر موج و چگونگی اتصال تکیه گاه سامانه به دیواره استخر موج نشان داده شده است که مطابق شکل از یک سمت توسط موج ساز تحت تاثیر قرار می گیرد. همچنین در شکل ۵-ب مجموعه چرخ دنده، چرخ طیار و ژنراتور نشان داده شده است. شماتیک این مجموعه نیز در شکل ۶-الف نشان داده شده است. با توجه به چرخش آرام محور، مشابه یک توربین بادی، برای اتصال محور به ژنراتور از سیستم چرخ دنده ای استفاده شده است. همچنین، در این سامانه برای یکنواخت نگه داشتن چرخش محور از چرخ طیار استفاده شده است تا زمانی که یک گشتاور نامنظم به آن اعمال می شود در مقابل تغییر سرعت دورانی مقاومت کند. طول یک ردیف از شناورها، حداقل معادل یک طول موج بوده، با عبور موج از شناورها، بنابر شرایط قرارگیری، شناورها به ترتیب یا به طور هم زمان به طرف بالا حرکت نموده، با اعمال گشتاور سبب دوران محور می شوند؛ سپس در مرحله ی بعد و پس از عبور موج، شناورها بدون این که تأثیری بر روی سرعت دوران محور داشته باشند، به طرف پایین حرکت می نمایند تا با ورود موج بعدی عملکرد شناورها تکرار شود. از آنجایی که با برخورد موج به سامانه، شناورها به سمت بالا حرکت می کنند و برگشت آنها به واسطه نیروی وزن نشان انجام می گیرد، از بلبرینگ های یک طرفه استفاده شده است. در این سامانه از شش بلبرینگ یک طرفه CSK25PP استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از لغزش بازوها و ایجاد پایداری بیشتر، شش بلبرینگ ساده 62.5XS در کنار بلبرینگ های یک طرفه و در نقطه اتصال بازوها به محور به کار برده شده است. محل نصب این بلبرینگ ها در شکل ۶-ب نشان داده شده است.

## Archive of SID

در دوره‌های بالا وجود دارد، آشفتگی زیاد موج می‌باشد که منجر به صدمه دیدن شناورها و جذب و انتقال نامناسب انرژی موج و در نتیجه توان تولیدی کمتر می‌شود، بنابراین باید دامنه موج و دور به درستی انتخاب شوند. به این منظور شکل ۸ برای دامنه موج ۱۵ و دوره‌های ۲۵ و ۳۵ ارائه شده است.



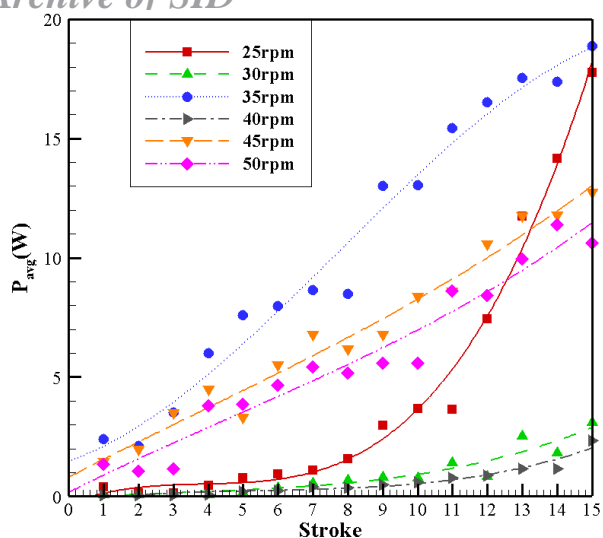
شکل ۷: نمودار متوسط توان تولیدی بر حسب دور موتور برای ۱۵ دامنه موج مختلف



شکل ۶: شماتیکی از (الف) مجموعه ژنراتور، چرخ طیار و چرخنده (ب) بلبرینگ یک طرفه و ساده در نقطه اتصال بازو به شفت

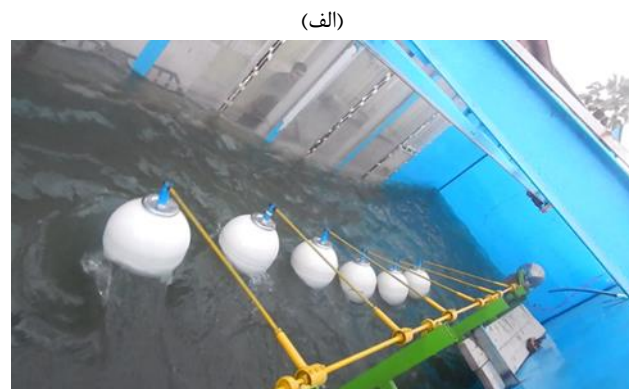
### ۴- نتایج

با توجه به نتایج تجربی حاصل از تست سامانه در داخل استخر موج، نمودار متوسط توان تولیدی بر حسب دور برای ۱۵ دامنه موج مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در دامنه موج ۱ تا ۱۲، توان متوسط تولیدی در دور ۳۵ دارای ماکزیمم مقدار می‌باشد. پس از آن نیز دور ۴۵، ۵۰ و ۲۵ به ترتیب دارای بیشترین توان متوسط تولیدی هستند. این امر به دلیل نوع موج تشکیل شده و نحوه حرکت شناورهای مستقر در استخر موج می‌باشد. در این دامنه موج‌ها، موج همچنان شکل منظمی داشته و شناورها به صورت تقریباً منظمی جابجا شده و در دور ۳۵ متوسط بیشتری با اختلاف فاحشی نسبت به دوره‌های دیگر تولید می‌کنند. در دامنه موج ۱۳ تا ۱۵ نیز دور ۳۵ دارای بیشترین توان متوسط تولیدی است اما نزدیک به دور ۲۵ می‌باشد. مطابق شکل ۷، بعد از آن‌ها به ترتیب دور ۴۵ و ۵۰ توان متوسط بیشتری تولید کرده‌اند. مشاهده می‌شود نتایج کاملاً متفاوت با حالت‌های قبلی است، چرا که در این دامنه‌ها در دور ۲۵ موج بسیار منظم و کارآمد بوده و شناورها با جذب انرژی و جابجایی مناسب، توانی نزدیک به دور ۳۵ تولید می‌کنند. مطابق شکل به دلیل جذب انرژی نامناسب در دور ۳۵ برای دامنه موج ۱۳ تا ۱۵ توان تولیدی اختلاف زیادی با دور ۲۵ ندارد. متوسط توان تولیدی در دور ۳۵ و ۲۵ به ترتیب ۱۸/۹ و ۱۷/۸ وات بوده است. ایراد بزرگی که در دامنه موج‌های بالا



شکل ۹: نمودار متوسط توان تولیدی بر حسب دامنه‌های موج برای دورهای مختلف موتور

مورد دیگری که حائز اهمیت است، حداکثر توان تولیدی در دامنه موج‌ها و دورهای مختلف می‌باشد. در شکل ۱۰ ماکزیمم توان تولیدی توسط سامانه بر حسب دور برای دامنه‌های موج مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل در دامنه موج ۱ تا ۱۲ در دور ۲۵ و ۵۰ ماکزیمم توان تولید می‌شود و بعد از آن دور ۴۵، ۱۵ تا ۳۵ ماکزیمم توان را تولید می‌کنند. اما در دامنه موج ۱۳ تا ۱۵ ماکزیمم توان تولیدی در دور ۲۵ و ۳۵ نزدیک به هم می‌باشد به طوری که در دور ۳۵ مقدار توان ماکزیمم ۳۶/۷ وات و در دور ۲۵ مقدار توان ماکزیمم ۳۱ وات به دست آمده است.

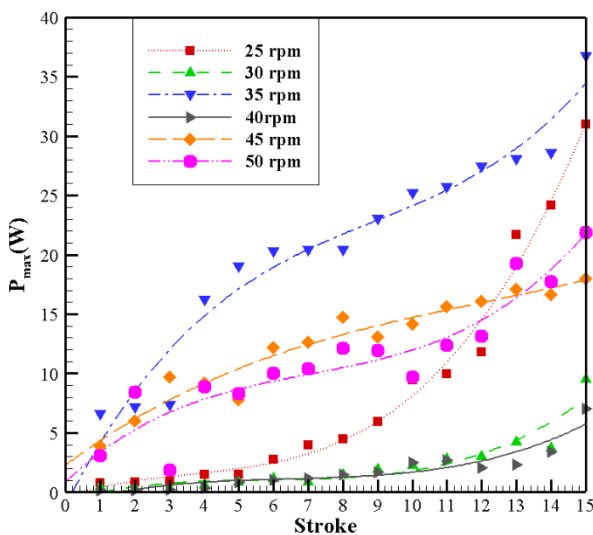


شکل ۸: الف) موج منظم حاصل از سرعت ۲۵ rpm (ب) موج نامنظم حاصل از سرعت ۳۵ rpm

در شکل ۹ نمودار توان متوسط تولیدی بر حسب دامنه موج برای دورهای مختلف ارائه شده است. نمادهای نشان داده شده، داده‌های تجربی از تست سامانه در استخر موج بوده و نمودارها نیز با میانمایی از داده‌های تجربی ترسیم گشته‌اند. همانطور که پیداست با افزایش دامنه موج توان تولیدی نیز افزایش می‌یابد و در دور ۳۵ توان بیشتری تولید می‌شود. قابل توجه است که در دور ۲۵ از دامنه موج ۱۳ تا ۱۵ توان تولیدی از دور ۴۵ و ۵۰ سبقت می‌گیرد و حتی به مقادیر دور ۳۵ می‌رسد. چرا که در این حالت موج مناسب و منظمی ایجاد شده و جابجایی مناسبی در شناورها و در نتیجه انتقال توان ایجاد کرده که منجر به این رفتار شده است.

## Archive of SID

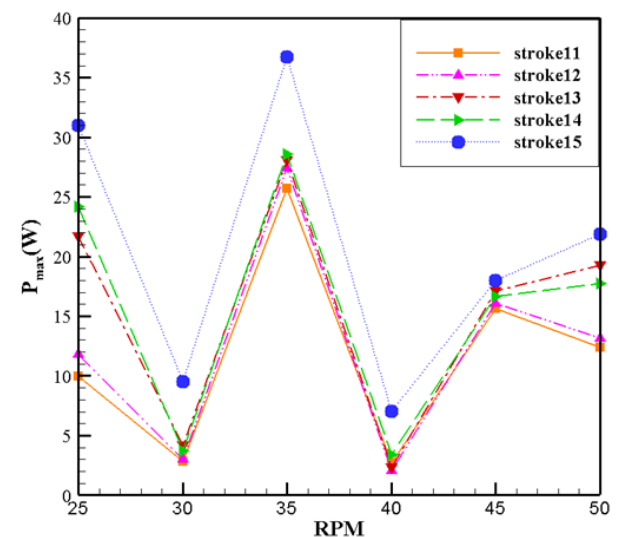
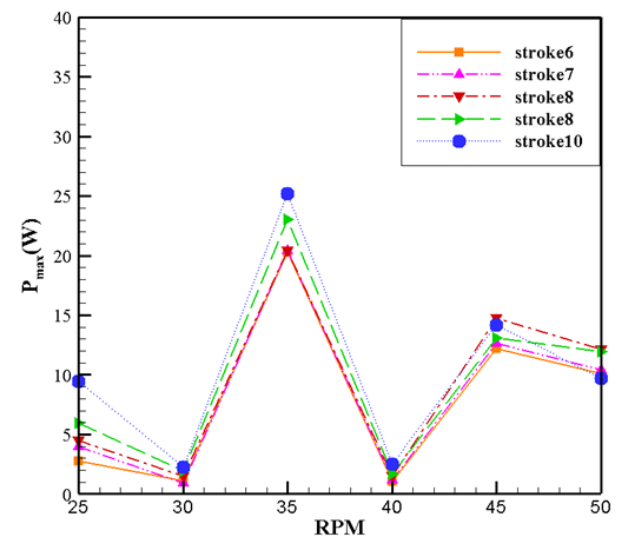
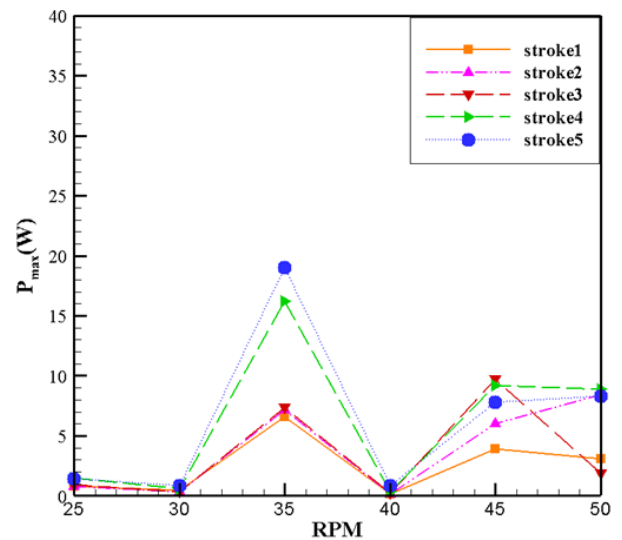
مطابق شکل با افزایش دامنه موج، توان تولیدی نیز به واسطه جذب و انتقال بیشتر انرژی توسط شناورها، افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که در دور ۲۵ در دامنه موج ۱۳ تا ۱۵ ماکزیمم توان تولیدی بالا و نزدیک به دور ۳۵ می‌باشد و با توجه به اینکه موج منظم‌تر، صدمات کمتر و در نتیجه جذب انرژی بیشتر است، سیستم از عملکرد مناسب‌تری برخوردار خواهد بود. برای دور ۳۰ و ۴۰ تقریباً رفتار مشابهی دیده می‌شود و تنها در دامنه‌های موج بالاتر اندکی اختلاف دیده می‌شود. ماکزیمم توان تولیدی در دور ۵۰ نیز تا دامنه موج ۱۳ کمتر از دور ۴۵ و از دامنه موج ۱۳ به بعد، ماکزیمم توان بیشتر از دور ۴۵ شده است. این رفتار ناشی از تغییرات موج و جذب انرژی توسط شناور می‌باشد. چرا که تا قبل از دامنه موج ۱۳ موج منظم‌تر بوده و جذب انرژی بیشتری به دلیل جایابی مناسب شناورها انجام گرفته است، اما بعد از دامنه موج ۱۳ در دور ۴۵ آشفتگی جریان زیاد شده و موجب جذب انرژی کمتر نسبت به دور ۵۰ شده است.



شکل ۱۱: نمودار ماکزیمم توان تولیدی بر حسب دامنه‌های موج برای دورهای مختلف موتور

### ۵ - نتیجه گیری

در این پژوهش، مبدل انرژی موج ساخته شده با ایده سامانه ویواستار در استخر موج دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تست و مورد ارزیابی تجربی قرار گرفته است. آزمون تجربی برای دامنه‌های مختلف (وضعیت ۱ تا ۱۵) و دورهای مختلف موتور (۲۵ تا ۵۰ دور بر دقیقه) برای دستیابی به بهترین حالت و بیشترین توان تولیدی توسط سامانه انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی دامنه‌های موج‌ها و دورهای مختلف موتور، بیشترین توان تولیدی در سرعت ۳۵ rpm اتفاق افتاده است. در دامنه موج‌های بالا یعنی وضعیت ۱۳ تا ۱۵، توان تولیدی در سرعت ۲۵ rpm نیز قابل توجه و نزدیک به سرعت ۳۵ rpm به دست آمده است. با توجه به اینکه موج در سرعت ۳۵ rpm نسبت به سرعت ۲۵ rpm کاملاً آشفته و نامنظم است و در کار تجربی خسارت و ضربات ناشی از موج به سامانه



شکل ۱۰: نمودار ماکزیمم توان تولیدی بر حسب دور موتور برای ۱۵ دامنه موج مختلف

همچنین، ماکزیمم توان تولیدی بر حسب دامنه‌های موج برای دورهای مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در دامنه موج‌های مختلف، ماکزیمم توان تولیدی در دور ۳۵ تولید شده است.



## Archive of SID

Access Report, User-Project: AAUWS, Wave-Structure interactions on point absorber. Marine Renewables Infrastructure Network, MARINET, last visited January 14th 2016.

12- Jakobsen, M.M., Beatty, S., Kramer, M. and Iglesias, G. (2016). MARINET Characterization of loads on a hemispherical point absorber wave energy converter. International Journal of Marine Energy. IJOME-D-15-00017R1.

13- Jakobsen, M.M., (2015). Wave-Structure Interactions on Point Absorbers – an experimental study. Ph.D. Dissertation from Aalborg University, Department of Civil Engineering.

14- Kramer, M.M., Marquis, L., and Frigaard, P. (2011). Performance Evaluation of the Wavestar Prototype. EWTEC European Wave and Tidal Energy Conference.

15- Vidal, E., Hansen, R.H. and Kramer, M.M. (2012). Early Performance Assessment of the Electrical Output of Wavestar's prototype. International Conference on Ocean Energy ICOE.

16- Wave Star A/S (2013). Wavestar prototype at Roshage - Performance data for ForskVE project no 2009- 1- 10305 phase 1 & 2. Project report for EnergiNet.dk ForskVE project no. 2009- 1- 10305.

17- Marquis, L. (2014). Wavestar- 4 years of continuous operation in the North Sea. International Conference on Ocean Energy ICOE.

18- Hansen, R.H. (2013). Design and Control of the Power Take-Off System for a Wave Energy Converter with Multiple Absorbers. PhD-thesis from Department of Energy Technology, Aalborg University. Last visited January 14th 2016.

19- Hansen, A.H. (2014). Investigation and Optimization of a Discrete Fluid Power PTO-system for Wave Energy Converters. ISBN 978-87-92846-44-0, PhD-thesis from Department of Energy Technology, Aalborg University. Last visited January 14th 2016.

20- Nambiar, A., Forehand, D., Kramer, M., Hansen, R., Ingram, D. (2014). Effects of hydrodynamic interactions and control within a point absorber array on electrical output. International Journal of Marine Energy 9.

21- Kramer, M., Brorsen, M. and Frigaard, P. (2004). Wave Star - Indledende undersøgelse af flydergeometri. Hydraulics and Coastal Engineering No. 4, Aalborg University, Department of Civil Engineering, ISSN: 1603-9874, in Danish. Last visited January 22th 2016.

22- Kramer, M. and Andersen, T.L (2005). Wave Star – Skala 1:40 modelforsøg, forsøgsrapport 2. Hydraulics and Coastal Engineering No. 14. ISSN: 1603-9874. Aalborg University, Department of Civil Engineering, in Danish.

23- Alamian R., Shafaghat R., M. Khazaei A. and Yousefi A., (2017). Experimental Evaluation of a Point Absorber Wave Energy Converter in a Laboratory Wave Tank, Amirkabir J. Mech. Eng., 49(1) 93-100.

در سرعت ۳۵ rpm دیده شده است، در نهایت دامنه موج ۱۵ و سرعت ۲۵ rpm با حداکثر تولید توان ۳۱ وات به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته شده تا در گام‌های بعدی توسعه طرح استفاده گردد.

## ۶ – تشکر و قدردانی

نتایج ارائه شده در این مقاله حاصل طرح پژوهشی مصوب شورای عالی عتف بوده، به این وسیله از حمایت‌های معنوی و مادی استانداری استان مازندران، معاونت هماهنگی امور اقتصادی و توسعه منابع استانداری کمال تشکر را اعلام می‌داریم.

## کلید واژگان

- 1- Power Take Off (PTO)
- 2- Wave Star Energy
- 3- Nissum
- 4- Plymouth
- 5- Hanstholm
- 6- Inverter

## ۷ – مراجع

- 1- Falnes, J., (2007), a review of wave-energy extraction, Mar. Struct. 20 185-201.
- 2- Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M., (2009), a review of wave energy converter technology, Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy 223 887-902.
- 3- Falcao, A.F. de O., (2010), Wave energy utilization: a review of the technologies, Renew. Sustain. Energy Rev.14 899-918.
- 4- Lopez, I., Andreu J., Ceballos S., Martinez de Alegria I. and Kortabarria I., (2013), Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, Renew. Sust. Energy Rev. 27 413-434.
- 5- “Electric Power from Ocean Waves,” Wavemill Energy Corp., <http://www.wavemill.com>, (current 1 Dec. 2005).
- 6- kolestani. A., (2015), BSc thesis, “Numerical investigation of the geometry parameters on oscillating water column at different wave steepness”, Shiraz University (In Persian).
- 7- [www.wavestarenergy.com](http://www.wavestarenergy.com)
- 8- Svendsen, R. and Frigaard, P., (2001). Indledende hydrauliske undersøgelser af bølgeenergianlægget Tusindben. Aalborg Universitet, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning.
- 9- Frigaard, P. B., Andersen, T. L., Kofoed, J. P., Kramer, M. M. and Ambühl, S., (2016). Wavestar Energy Production Outlook. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical Reports, No. 201.
- 10- Frigaard, P. and Andersen, T.L., (2009). Effektmålinger på Wave Star i Nissum Bredning. Aalborg Universitet, Department of Civil Engineering, ISSN 1901-726X, DCE Technical Report No. 61.
- 11- Jakobsen, M.M., Kramer, M., Holk, N., Pedersen, M. and Vidal, E., (2013). MARINET Infrastructure