

Experimental Study of Hydrodynamic Performance of Floating Oscillating Water Column as Wave Energy Convertors


Afsaneh Shahsavari¹, Javad Zahiri^{2*}, Ahmad Jafari³

1. M.Sc. in Water Structures, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan.

3. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan.

* j.zahiri@asnrukh.ac.ir

Received: 23 November 2021, Accepted: 8 April 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Population increment along with the environmental crisis due to the fossil fuels use has led humans to seek other sources such as renewable energy. One of the most important sources of renewable energy is sea and ocean waves, which can meet some of the human needs for energy resources. One of the key steps in development of wave energy renewable technology is the design and validation of physical models. Although physical models can not be accurately simulated, all the details and performance of the original prototype, they can be a valuable source of information for researchers, developers, and inventors in this area. Due to its simple mechanical structure, the oscillating water column has become one of the most common tools for converting wave energy in the world. The oscillating water column could be used as a breakwater on the shores in addition to generating energy from the waves. Due to the complexities related to the hydrodynamic conditions of air and airflow inside the system, it is necessary to use laboratory models to study it more precisely.

Methodology: In the present study, laboratory flume model GUNT HM162 with a length of 12.5 m, width 0.31 m, and height 0.47 m with glass walls and the metal floor was used. A centrifugal pump with a flow rate of 165 m³/h and a height of 16 m was used for the experiments. A wave generator with a frequency of 0.5 to 1.11 Hz was applied to create a wave in the laboratory flume. All the experiments were performed at a constant flow depth of 200 mm. Three values were chosen for the distance of the OWC device from the water surface in the normal state (d), according to the chamber length (B). Therefore, distances of 10%, 25%, and 45% of the OWC chamber length were used as parameter d. To investigate the effects of back wall height (Z) on OWC efficiency, three physical models were made in three modes without back wall and with 5 and 10 cm back wall. In this research, the power generated by the wave inside the device was performed to evaluate the OWC performance. In addition, a two-way analysis of the variance test was used to investigate the effects of independent parameters such as back wall height, the depth of the system, and the frequency of waves on the output power to determine the main and interaction effects.

Results and Discussion: The results show that as the installation depth of the system

increase, the amount of output power initially increased, then it had a decremental trend. Accordingly, the depth with the best performance must be considered for OWC. In this study, it was found that $0.25B$ (chamber length) installation depth has better performance compared with two other cases. Comparison of the effect of the back wall on the performance of the device at a depth of $0.25B$ shows that the models with the back wall have better performance compared with the model without a back wall. The performance of the two back walls at frequencies less than 0.8 is similar, while for higher frequencies, the 10 cm back wall has better performance compared with another back wall. All the main effects have a significant influence on the output power, which the frequency of the waves and the height of the back wall have a higher effect. The results related to the interaction effects of independent parameters show that the interaction effects have a high influence on the amount of output power. Among the interaction effects, $(Z \times d)$ and $(Z \times \text{Frequency})$ have a significant effect on the output power, which indicates the effect of the back wall on the total power. The results of the margin averages show that at the maximum frequency used, the 5 and 10 cm back walls were increased the efficiency of the OWC by 98% and 182% , respectively, compared to the model without a back wall.

Conclusions: Based on the results of the experiments, the presence of the back wall has a high effect on the OWC output power. Specifically, in the best installation depth ($d = 0.25B$) and frequency of 1.1 Hz, the 5 and 10 cm back wall, increases the output power by 1.18 and 1.83 , respectively. A two-way analysis of the variance was used to investigate the effect of different parameters on OWC efficiency. The results of two-way ANOVA shows that the frequency of the waves and the back wall had the greatest effect on the output power. Moreover, the interaction of the back wall with the frequency and installation depth also had a significant effect on output power. The performance of the two back walls used at low frequencies was similar, but for the higher frequencies, the 10 cm back wall performed better. Accordingly, it can be concluded that the presence of a larger back wall cannot produce more power in all frequencies.

Keywords: Oscillating water column, Renewable energy, Wave energy conversion, Laboratory modeling, Two-way ANOVA.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی کارایی هیدرودینامیکی ستون نوسانگر آب شناور در استحصال انرژی موج

افسانه شهسواری زاده^۱، جواد ظهیری^{۲*}، احمد جعفری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران.

* j.zahiri@asnruk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: امواج دریاها و اقیانوس‌ها از مهم‌ترین منابع انرژی تجدید پذیر هستند که می‌توانند در آینده جایگزین بخشی از سوخت‌های فسیلی شوند. جهت استفاده از انرژی امواج روش‌ها و دستگاه‌های متعددی طراحی و ساخته شده است که غالباً دارای پیچیدگی‌های فراوان می‌باشند. ستون نوسانگر آب به دلیل ساختار ساده مکانیکی به یکی از متداول‌ترین ابزارهای استحصال انرژی امواج در دنیا تبدیل شده است. با توجه به پیچیدگی‌های مربوط به شرایط هیدرودینامیک جریان و هوا در داخل این سیستم، نیاز است که از مدل‌های آزمایشگاهی جهت بررسی دقیق‌تر آن استفاده شود. در این تحقیق تأثیر ارتفاع دیواره انتهایی، موقعیت قرارگیری سازه در امتداد قائم و فرکانس امواج بر روی میزان توان خروجی با استفاده از مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره انتهایی در قسمت پایین دست دستگاه قرار گرفته و می‌تواند حجم بیشتری از جریان را به مجرای ستون نوسانگر آب هدایت کند. جهت بررسی تأثیر مستقیم و متقابل پارامترهای مختلف از تحلیل واریانس استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هر سه پارامتر مورد بررسی بر روی توان خروجی موثر بوده ولی تأثیر فرکانس و دیواره انتهایی بیشتر بوده است. بر اساس میانگین‌های حاشیه‌ای، وجود دیواره انتهایی تأثیر بالایی بر میزان توان خروجی دارد. استفاده از دیواره ۵ و ۱۰ سانتیمتری به ترتیب باعث افزایش توان خروجی به میزان ۸۸ و ۱۴۸ درصد نسبت به حالت بدون دیواره شده است. علاوه بر این وجود اثر متقابل میان ارتفاع دیواره انتهایی و عمق کارگذاری، باعث کاهش کارایی دیواره ۱۰ سانتیمتری در حالت قرارگیری سیستم در عمق زیاد گردید. این نشان می‌دهد که جهت به دست آوردن بهترین کارایی می‌بایستی علاوه بر ارتفاع دیواره انتهایی، عمق کارگذاری نیز لحاظ شود.

کلیدواژگان: ستون نوسانگر آب شناور، انرژی تجدیدپذیر، تبدیل انرژی امواج، مدل‌سازی آزمایشگاهی، تحلیل واریانس.

۱- مقدمه

نیازهای بشر به منبع‌های انرژی را مرتفع سازد. از گام‌های بنیادین در توسعه فناوری انرژی تجدید پذیر امواج، ساخت و درستی‌سنجی مدل‌های فیزیکی است (Portillo et al., 2020). اگرچه مدل‌های فیزیکی قادر به شبیه‌سازی دقیق همه جزئیات و کارایی نمونه اصلی را ندارند، ولی می‌توانند به عنوان ابزار ارزشمندی توسط محققان و مخترعان استفاده شوند (Falcão and Henriques, 2014). یکی از متداول‌ترین سامانه‌های استحصال انرژی از امواج، ستون نوسانگر آب است که به‌طور گسترده می‌توان از آن در

امروزه کشف منبع‌های اقیانوس‌ها و رفتار آن‌ها در کنار افزایش نیاز به انرژی به امری چالش‌برانگیز تبدیل شده است (Portillo et al., 2020). افزون بر این، رشد روزافزون جمعیت کره زمین در کنار بحران‌های زیست‌محیطی در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث شده است تا انسان به دنبال استفاده از منبع‌های انرژی تجدید پذیر باشد. یکی از مهم‌ترین منبع‌های انرژی‌های تجدید پذیر مربوط به امواج دریاها و اقیانوس‌ها بوده که می‌تواند بخشی از

(2017) به بررسی عددی کارکرد دستگاه ستون نوسانگر آب تحت امواج موجود در ساحل‌های جنوب ایران بر مبنای روش حجم محدود و بر پایه معادله‌های ناپیراستوکس پرداختند. نتایج این محققان نشان می‌دهد که برای یک دستگاه با قطر ثابت، تغییر در دامنه موج و دوره تناوب باعث تغییر ۲/۹۴ درصدی در کارکرد دستگاه می‌شود. این در حالی است که افزایش دو و چهار برابری در قطر دستگاه به ترتیب باعث افزایش کارکرد دستگاه به میزان ۲/۵۴ و ۱۰/۲۷ برابر می‌شود. Masoomi and Yousefifard (2020) به بررسی عددی کارکرد مبدل انرژی امواج تحت اثر موج منظم با استفاده از پویایی (دینامیک) سیال‌های محاسبه‌ای پرداختند. بر مبنای نتایج به دست آمده می‌توان از مدل عددی برای دستیابی به بهترین ابعاد و جانمایی این مبدل در شرایط واقعی دریا استفاده کرد. (Mendonça 2018) به بررسی عددی هیدرودینامیک امواج برخوردی با سازه و شرایط هیدرودینامیک و آئرو دینامیک پیچیده در درون OWC در ترکیب با یک موج شکن قائم کردند. در این تحقیق از اطلاعات امواج شماری از جزایر پرتقال استفاده شد که نشان می‌دهد در زمستان در همه قسمت‌ها، توان بالقوه استحصال امواج وجود داشته در حالی که در تابستان تنها در قسمت‌های شمال غربی، امکان استحصال انرژی کافی از امواج وجود دارد. (Zabihi et al. 2018) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع طیف موج بر روی نوسان‌های محفظه درونی، تغییرپذیری‌های فشار و کارایی دستگاه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که چنانچه نوع طیف برخوردی با دستگاه OWC حالت JONSWAP باشد، کارایی دستگاه در بیشترین بسامد به میزان ۵۰٪ نسبت به موج Pierson-Moskowitz افزایش خواهد یافت. (Portillo et al. 2020) با استفاده از مدل فیزیکی اقدام به طراحی و آزمون ستون نوسانگر معلق در آب پرداختند. در این تحقیق از دو نمونه ستون نوسانگر آب به صورت مجرای هم‌محور^۳ و بویه شناور^۴ استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بویه شناور تحت بازه متنوعی از بسامدها،

ساحل‌های دریاها و اقیانوس‌ها و یا به صورت شناور بر روی سطح آزاد آب استفاده کرد (Antonio, 2010; Liu et al. 2018; Zabihi et al. 2021). ستون نوسانگر آب^۱ (OWC) در میان روش‌های پرشمار موجود برای استحصال انرژی امواج در جهان به دلیل ساده بودن ساختار مکانیکی از همگان پذیری بالاتری پیدا کرده است (He and Huang, 2014; Pereiras, 2015; Sheng, 2019; Zheng et al. 2019). این سامانه نه تنها به عنوان دستگاهی برای تولید انرژی از امواج می‌تواند استفاده شود بلکه به عنوان یک موج شکن در ساحل‌ها نیز می‌تواند از آن استفاده کرد (Zheng et al., 2020). این سامانه به دو صورت متصل به ساحل و یا شناور بر روی آب استفاده می‌شود. ستون نوسانگر آب از یک محفظه^۲ تشکیل شده که در درون آب قرار گرفته و با بالا آمدن سطح آب در محفظه تحت تأثیر امواج دریا، هوای قسمت درون محفظه به سمت بالای آن که شامل یک مجرای باریک تر است هدایت می‌شود. در این قسمت از توربین‌های خاصی استفاده می‌شود تا تحت تأثیر خروج هوا به چرخش درآمده و انرژی تولید کند. با پایین رفتن موج و کاهش سطح آب در محفظه، مکشی ایجاد شده که باعث چرخش دوباره توربین می‌شود. این دو حالت را به عنوان دم و بازدم در نظر می‌گیرند (Shahsavari-zadeh et al., 2019). نوع شناور این سامانه اغلب در محلی نصب می‌شود که امواج از نوع عمیق باشند، زیرا قسمت اعظم انرژی امواج هنگامی که به ساحل نزدیک می‌شوند از بین می‌رود (Morrison and Greated, 1992). در زمینه استحصال انرژی با استفاده از ستون نوسانگر آب بررسی و ارزیابی‌های چندی انجام شده است که نشان دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد. Ketabdari and Ahmadi (2012) با استفاده از مدل سازی عددی به بررسی امکان سنجی جذب انرژی از امواج دریا در ساحل‌های جنوبی ایران به وسیله ستون نوسانگر آب پرداختند. نتایج مدل سازی عددی نشان داد که اگر ارتفاع امواج ورودی به سامانه ۱۰٪ بیشتر شود، توان دستگاه ۴۰٪ افزایش می‌یابد. Hashemi and Sadeghzadeh

3 Coaxial-duct
4 Spar-buoy

1 Oscillating water column
2 Chamber

مؤثر بر روی کارایی دستگاه به‌عنوان متغیرهای آزمایش در نظر گرفته شدند. افزون بر این برای بررسی تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر میزان توان خروجی از تجزیه واریانس دو طرفه استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فلوم آزمایشگاهی مدل HM162 گنت آلمان به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۰/۳۱ متر و ارتفاع ۰/۴۷ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی استفاده شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان صورت پذیرفت. برای انجام آزمایش‌ها از یک پمپ گریز از مرکز با دبی ۱۶۵ مترمکعب بر ساعت و ارتفاع ۱۶ متر استفاده شد. برای ایجاد موج در فلوم آزمایشگاهی، دستگاه موج ساز نصب شده بر روی فلوم با بسامد ۰/۵ تا ۱/۱۱ هرتز به کار گرفته شد. در شکل ۱ نمایی از فلوم مورد استفاده در این تحقیق به همراه دستگاه موج ساز قرار گرفته بر روی آن نشان داده شده است. افزون بر این در انتهای فلوم از صفحه شیب‌دار برای کاهش تأثیر موج‌های بازگشتی استفاده شد. در برخورد امواج به ساحل و یا سازه‌های ساحلی، بخشی از موج انعکاس پیدا کرده و به سمت بالادست پیشروی می‌کند. ویژگی‌های موج بازگشتی تحت تأثیر موج اصلی و نوع سازه ساحلی می‌باشد. به‌طور معمول فراسنجه ضریب انعکاس^۱ برای معرفی موج‌های بازگشتی استفاده می‌شود. یکی از فراسنجه‌های مهم در محاسبه ضریب انعکاس موج، تیزی موج^۲ بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{(2\pi H_t)/(gT_m^2)}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، α شیب ساحل، H_t ارتفاع موج در ساحل و میزان $T_m = \frac{T}{1.1}$ می‌باشد. (Seelig and Ahrens (1981) رابطه زیر را برای محاسبه ضریب انعکاس در سطح‌های صاف ارائه کردند:

$$K_r = \frac{a_1 \cdot \xi_0^2}{\xi_0^2 + b_1} \quad (2)$$

که میزان $a_1 = 1.0$ و $b_1 = 5.0$ در نظر گرفته شده است.

تحت امواج منظم و نامنظم، کارکرد بهتری داشته است. سامانه مجرای هم‌محور نیز در مقایسه با بویه شناور جابجایی کمتری داشته است. (Zheng et al. (2020) به بررسی عددی کارایی هیدرودینامیکی دستگاه OWC چندتایی پرداختند. بر مبنای نتایج این تحقیق، کاهش ارتفاع دیواره جلویی و افزایش ارتفاع دیواره انتهایی می‌تواند از لحاظ اقتصادی برای افزایش بازدهی دستگاه مؤثر باشد. افزون بر این سامانه چندتایی با دیواره نازک‌تر برای بازه‌های مختلف امواج از نظر استحصال انرژی کارکرد بهتری داشته است. درحالی‌که از نقطه نظر کاهش انرژی موج برای موج‌شکن، سامانه‌های با دیواره ضخیم‌تر دارای کارکرد قابل قبول‌تری بوده‌اند. (Liu et al. (2021) با استفاده از چند آزمون آزمایشگاهی به بررسی کارایی هیدرودینامیکی و اثرودینامیکی سامانه OWC و توربین در شرایط چرخش آزاد پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین توان خروجی مربوط به طول موج نسبی (نسبت طول موج به عرض مجرای دستگاه) ۶ تا ۸ است، بر همین مبنای طول محفظه می‌بایستی با توجه به موج غالب محلی طراحی شود. (Alizadeh Kharkeshi et al. (2020) به بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار هیدرودینامیکی OWC در شرایط امواج دریای خزر پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که افزایش بسامد امواج باعث افزایش نوسان‌های سطح آب در بیرون از مجرای دستگاه می‌شود، این در حالی است که نوسان‌های سطح آب و در نتیجه سرعت و نرخ جریان خروجی درون دستگاه کاهش یافته و باعث کاهش توان خروجی می‌شود. افزون بر این عمق دیواره به دو صورت تحلیلی و آزمایشگاهی برای سه عمق مختلف ارزیابی و مشخص شد که افزایش عمق دیواره از ۵ به ۲۵ سانتی‌متر و افزایش بسامد از ۳۲ به ۴۲ دور در دقیقه باعث کاهش توان خروجی می‌شود.

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر ویژگی‌های ساختاری و چگونگی قرارگیری دستگاه و نیز تأثیر فراسنجه‌های هیدرولیکی موج بر میزان توان خروجی ستون نوسانگر شناور می‌باشد. بر همین مبنای طول دیواره انتهایی دستگاه، موقعیت قرارگیری آن و بسامد امواج به‌عنوان فراسنجه‌های

1 Reflection coefficient

2 Breaker parameter

بازگشتی، می‌بایست مدت زمان هر آزمایش به گونه‌ای در نظر گرفته شود که موج‌های انعکاس یافته تا جای ممکن با امواج ایجاد شده تداخل نداشته باشند. در تحقیق Ferguson et al. (2015) برای فلوم با طول ۱۰۰ متر، بیشینه زمان آزمایش برابر با ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در این تحقیق نیز مدت زمان هر آزمایش کمتر از ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

جدول ۱ میزان ضریب انعکاس با استفاده از رابطه‌های تجربی

Table 1 Reflection coefficient based on empirical equations

Method	min (K_r)	max (K_r)
Seelig and Ahrens (1981)	0.49	0.83
Postma (1989)	0.26	0.63
Zanuttigh and Van der Meer (2008)	0.46	0.89

Postma (1989) برای شیب ملایم رابطه زیر را ارائه کرد:

$$K_r = 0.15 \cdot \xi_0^{0.73} \quad (3)$$

Zanuttigh and Van der Meer (2008) رابطه زیر را برای محاسبه فراسنجه ضریب انعکاس برای سطوح مختلف ارائه کردند:

$$K_r = \tanh(a \cdot \xi_0^b) \quad (4)$$

در رابطه (۴) میزان‌های a و b برای سطح‌های صاف به ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۱/۴۳ توسط این محققان ارائه شده است. بر مبنای رابطه‌های ارائه شده، کمینه و بیشینه ضریب انعکاس برای آزمایش‌های صورت گرفته در جدول ۱ ارائه شده است.

بر مبنای جدول ۱ کمترین میزان ضریب انعکاس مربوط به رابطه Postma (1989) می‌باشد. بر مبنای نظر Ferguson et al. (2015) برای عدم تداخل موج‌های

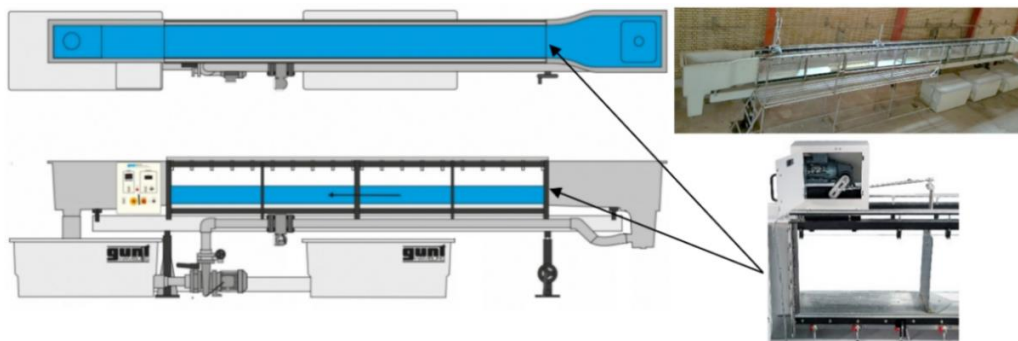


Fig. 1 Plan and profile of GUNT flume along with the wave generator

شکل ۱ طرح و نیمرخ فلوم گنت مورد استفاده در تحقیق همراه با دستگاه موج ساز

مثبت و منفی در مجرای OWC از لوله پیتوت نوع S استفاده شد. از این دستگاه می‌توان برای اندازه‌گیری فشار با بازه ± 1000 پاسکال با دقت ۱ پاسکال استفاده کرد. همه آزمایش‌های صورت گرفته در عمق جریان ثابت و برابر با ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد. افزون بر این برای بررسی تاثیر محل قرارگیری سامانه، سه میزان برای فاصله دستگاه OWC نسبت به سطح آب در حالت بدون موج (d)، با توجه به طول محفظه (B) انتخاب شد. بر این مبنای فاصله‌های ۱۰٪، ۲۵٪، و ۴۵٪ طول محفظه OWC به‌عنوان فراسنجه d استفاده شد ($d=0.1B, 0.25B, 0.4B$). با توجه به ابعاد 18×18 سانتی‌متری محفظه دستگاه،

برای ساخت مدل ستون نوسانگر آب، از پلکسی گلاس شفاف به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد. دستگاه OWC از یک محفظه مستطیل شکل و یک مجرای انتقال تشکیل شده است که برای بررسی تأثیر ارتفاع دیواره انتهایی (Z) بر روی کارایی آن، سه مدل فیزیکی در سه حالت بدون دیواره و با دیواره‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری ساخته شد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری فشار پویایی در مجرای مستطیلی دستگاه از یک دستگاه فشارسنج دیجیتال مدل MP110 شرکت کیمو فرانسه استفاده شد. این دستگاه دارای صفحه نمایش بوده و برای اندازه‌گیری فشار مثبت و منفی دارای دو حسگر می‌باشد. برای اندازه‌گیری فشارهای

جریان درون دستگاه آغاز به نوسان می‌کند. در این حالت با استفاده از حسگر فشار (لوله پیتوت نوع S) در محفظه دستگاه، فشارهای مثبت و منفی توسط دستگاه فشارسنج ثبت می‌شود. در شکل ۲ موقعیت قرارگیری و ویژگی‌های هندسی ستون نوسانگر آب نمایش داده شده است.

محل قرارگیری دستگاه نسبت به سطح آب ۱۸، ۴۵ و ۷۲ میلی‌متر تعیین شد. برای بررسی تأثیر بسامد امواج بر روی میزان کارایی دستگاه از ۶ بسامد ۰/۵۶، ۰/۶۴، ۰/۷۲، ۰/۸، ۰/۹۵ و ۱/۱۱ هرتز استفاده شده است. پس از رسیدن موج ناشی از دستگاه موج‌ساز به دستگاه OWC،

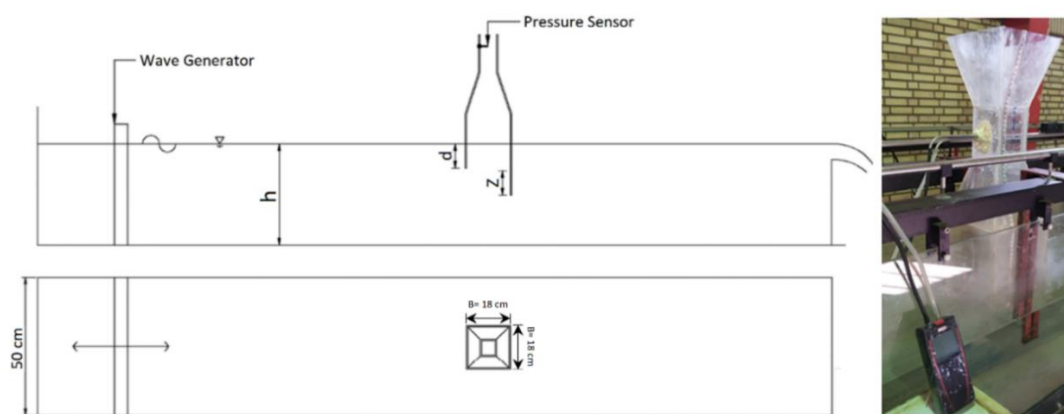


Fig. 2 Oscillating water column specifications and placement in the flume

شکل ۲ مشخصات و نحوه قرارگیری ستون نوسانگر آب در فلوم

با داشتن حجم هوای عبوری می‌توان تولیدشده توسط موج (P_t) را از حاصل ضرب رابطه (۷) در فشار پویایی اندازه‌گیری شده (P_{dyn}) محاسبه کرد.

$$P_t = P_{dyn} V_a \quad (8)$$

در این تحقیق از توان تولیدشده بر اثر موج درون دستگاه OWC برای بررسی کارایی دستگاه تحت تأثیر ارتفاع دیواره انتهایی و موقعیت قرارگیری آن استفاده شده است. برای محاسبه نسبت فشار در مجرای ستون نوسانگر آب که فراسنجه بدون بعد است، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\text{Pressure ratio} = \frac{P_{dyn}}{H} \quad (9)$$

برای مدل‌سازی فشار پویایی در محفظه سامانه OWC از تحلیل ابعادی استفاده شد. بر این مبنا فراسنجه‌های مؤثر بر روی میزان فشار پویایی درون محفظه مشخص شده و آن‌گاه بر مبنای نظریه باکینگهام فراسنجه‌های بی‌بعد استخراج شد. فراسنجه‌های مهم و مؤثر بر روی فشار پویایی به شرح زیر می‌باشند:

$$f(P_{dyn}, \lambda, H, T, \gamma, f, c, g, \rho, \eta, w, l, d, Z) = 0 \quad (10)$$

برای بررسی کارایی دستگاه در حالت‌های مختلف می‌بایستی توان خروجی دستگاه در هر حالت محاسبه شود. بر این مبنا در آغاز با در نظر گرفتن رابطه پیوستگی برای حجم کنترل انتخابی می‌توان رابطه زیر را برای هوای درون محفظه نوشت:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (5)$$

\dot{m}_{out} و \dot{m}_{in} به ترتیب نشان‌دهنده تغییرپذیری‌های زمانی جرم ورودی و خروجی به درون حجم کنترل می‌باشند. با در نظر گرفتن تراکم ناپذیر بودن هوا، نرخ تغییرپذیری‌های حجم هوا $\dot{V}_a(t)$ که نشان‌دهنده تغییرپذیری‌های حجم هوای عبوری از توربین است به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V}_a(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{wH\omega}{k} \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t = wHc \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t \quad (6)$$

برای محاسبه حجم هوای عبوری (V_a) می‌توان از معادله بالا در بازه یک دوره تناوب نسبت به زمان انتگرال گرفت (Sameti and Farahi, 2014):

$$V_a = \int_0^T wHc \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t dt = \frac{wHc}{\omega} \sin \frac{kl}{2} \sin \omega T \quad (7)$$

در رابطه بالا λ طول موج، H ارتفاع موج، T زمان تناوب موج، γ عمق جریان، f بسامد موج، c سرعت موج، g شتاب گرانشی، ρ چگالی آب، q چگالی هوا و w و l ابعاد OWC می باشد. شماری از فراسنجه های ارائه شده مانند ابعاد محفظه به دلیل ثابت بودن در همه آزمایش ها حذف شد. با در نظر گرفتن سه فراسنجه ρ ، g و γ به عنوان متغیرهای تکراری، پنج فراسنجه بی بعد به صورت $\pi_1 = \pi_5 = \frac{Z}{y}$ و $\pi_4 = d$ ، $\pi_3 = \frac{c}{\sqrt{gy}}$ ، $\pi_2 = \frac{H}{\lambda} \frac{P_{dyn}}{\rho gy}$ با توجه به اینکه اغلب معادله های ارائه شده در این زمینه توانی هستند، بر همین مبنا معادله پیشنهادی که بر مبنای رگرسیون غیرخطی به دست می آید، با فرم توانی فرض شد. از آنجا که متغیر $\frac{Z}{H}$ دارای میزان های صفر می باشد، در معادله پیشنهادی از تابع نمایی (exp) برای این متغیر استفاده شد. با در نظر گرفتن فشار پویایی به عنوان متغیر خروجی، می توان معادله مربوط به تحلیل ابعادی را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{P_{dyn}}{\rho gy} = \alpha \left(\frac{H}{\lambda}\right)^\beta \left(\frac{c}{\sqrt{gy}}\right)^\gamma d^\delta \left(\exp \frac{Z}{y}\right)^\sigma \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) فراسنجه های α ، β ، γ ، δ و σ ضریب های معادله بوده که با توجه به آزمایش های صورت گرفته و از طریق رگرسیون غیرخطی محاسبه می شوند.

بررسی دامنه حرکت سطح آزاد در درون محفظه پنوماتیک نشان می دهد که مدل های فیزیکی بزرگ مقیاس در مقایسه با مدل های کوچک مقیاس، از لحاظ رفتاری، همانندی بیشتری به محفظه های واقعی دارند (Viviano et al., 2018). بررسی ها در زمینه اثر مقیاس بر روی کارکرد ستون نوسانگر آب نشان می دهد که تنش های لزوجتی در مدل های فیزیکی با مقیاس کوچک باعث کاهش بیشتر سرعت جریان در مقایسه با مدل های با مقیاس بزرگ می شود (Viviano et al., 2018). بنا بر نتایج به دست آمده توسط Sheng et al. (2014) چنانچه عدد رینولدز سرعت ذرات آب در امواج بیشتر از 10^5 باشد، مدل سازی فیزیکی درست خواهد بود. در چنین حالتی نیروهای لزوجتی قابل صرف نظر کردن خواهند بود. در این پژوهش عدد رینولدز سرعت ذرات آب در امواج از میزان اشاره شده بیشتر بوده که نشان می دهد، کارکرد

مدل فیزیکی درست می باشد. افزون بر این Falcão and Henriques (2014) بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی نشان دادند که اثر مقیاس بر روی توان تولیدی به صورت $\varepsilon^{7/2}$ می باشد، به عبارتی چنانچه مدل دارای مقیاس ۱:۱۰ باشد، نسبت توان تولیدی به صورت ۱:۳۲۰۰ محاسبه خواهد شد. بر مبنای مشاهده های (Viviano et al., 2018)، در مدل های کوچک مقیاس با افزایش ارتفاع محفظه ستون نوسانگر آب می توان انتظار کارکرد بهتری داشت. بر همین مبنا در چنین مدل هایی برای کاهش اثر مقیاس، ارتفاع محفظه ها را بزرگتر در نظر می گیرند. این مسئله در این تحقیق در نظر گرفته شده است. فرض تراکم ناپذیر بودن هوا در مقیاس های کوچک باعث می شود که میزان کارایی ستون نوسانگر آب بیشتر از میزان واقعی برآورد شود. (Weber (2007) نشان داد که بدون در نظر گرفتن تراکم پذیری هوا، توان تولیدی سالانه به میزان ۱۰٪ بیشتر محاسبه می شود. (Elhanafi et al. (2017) از مدل عددی برای بررسی تاثیر تراکم پذیری هوا بر روی میزان کارایی ستون نوسانگر آب استفاده کردند. نتایج این محققان نشان می دهد که در مقیاس های ۱:۵۰ تا ۱:۱، تاثیر بالایی در میزان کارایی ستون نوسانگر آب با فرض تراکم ناپذیر بودن هوا مشاهده نشده است. ولی برای مقیاس های کوچک تر، فرض تراکم ناپذیر بودن هوا می تواند بر روی میزان کارایی دستگاه بویژه در حالت دم تاثیرگذار باشد. بر مبنای مدل سازی های عددی صورت گرفته توسط این محققان، عدم در نظر گرفتن تراکم پذیری هوا در مدل های مقیاس کوچک می تواند کارایی ستون نوسانگر آب را ۱۲٪ بیشتر نشان دهد.

در این بررسی از آزمون تجزیه واریانس دو طرفه برای ارزیابی تأثیر فراسنجه های مستقل مانند ارتفاع دیواره انتهایی، موقعیت قرارگیری دستگاه و نیز بسامد امواج بر روی میزان توان تولید شده استفاده شده است تا تأثیرهای اصلی و متقابل این فراسنجه ها مشخص شود. برای استفاده از تجزیه های واریانس می بایستی فراسنجه های مورد استفاده، از توزیع نرمال پیروی کنند. در این تحقیق هر سه فراسنجه ورودی دارای مقیاس ترتیبی بوده و تنها فراسنجه خروجی که شامل توان تولید شده است، دارای

دستگاه با توجه به طول دیواره انتهایی ارائه شده است.

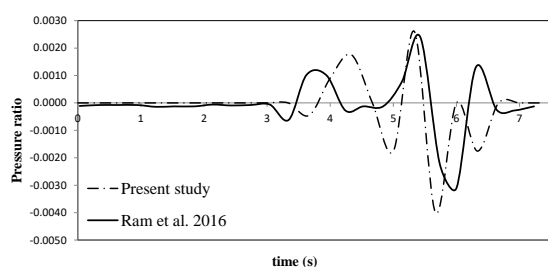
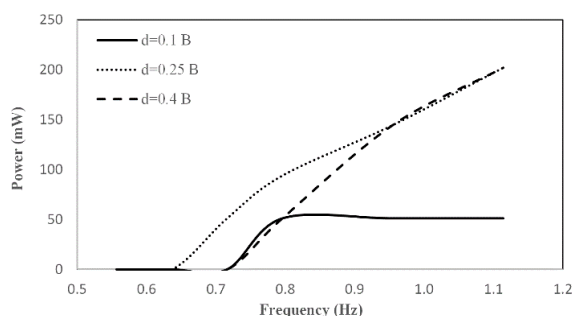
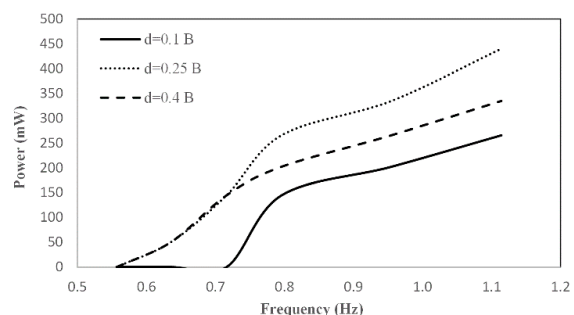


Fig. 4 Comparison of pressure ratio in the present study and Ram et al. (2016) at a frequency of 0.8 Hz

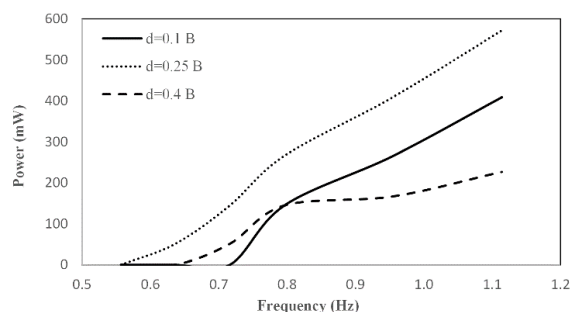
شکل ۴ مقایسه نسبت فشار اندازه گیری شده در این تحقیق و Ram et al. (2016) در بسامد ۰/۸ هرتز



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Effect of OWC placement on output power: (a) without a back wall, (b) back wall height=5 cm, and (c) back wall height=10 cm

شکل ۵ تاثیر موقعیت قرارگیری ستون نوسانگر آب بر توان خروجی در سه حالت: (a) بدون دیواره انتهایی، (b) با دیواره ۵ سانتی متر و (c) با دیواره ۱۰ سانتی متر

مقیاس کمی است. بر همین مبنا از نمودار احتمال P-P برای بررسی نرمال بودن داده‌های توان تولیدشده استفاده شد که نتیجه آن در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که میزان‌های توان تولیدشده از توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

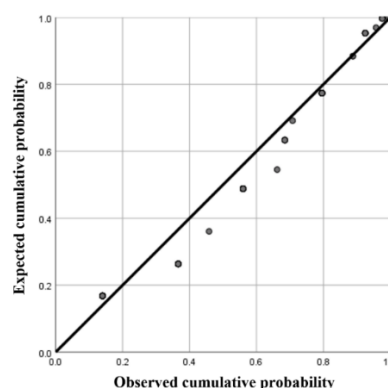


Fig. 3 Probability-probability plot of power output
شکل ۳ نمودار پراکنش احتمال P-P برای توان خروجی

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق برای بررسی درستی نتایج مدل مورد استفاده از اطلاعات Ram et al. (2016) استفاده شد. یکی از حالت‌های مشترک این تحقیق و بررسی‌های Ram et al. (2016) مربوط به قرارگیری مدل در زاویه ۹۰ درجه است. مقایسه نتایج دو تحقیق نشان می‌دهد که فشار پویایی ایجاد شده در دو مدل مورد استفاده به ازای بسامد ۰/۸ همخوانی خوبی با یکدیگر دارد. بیشینه نسبت فشار مثبت و منفی ایجاد شده در این تحقیق بین ۰/۰۲۶+ و ۰/۰۴۰- متغیر بوده، این در حالی است که میزان نسبت فشار در بررسی‌های Ram et al. (2016) بین ۰/۰۲۴+ و ۰/۰۳۱- ارائه شده است. تفاوت اندک موجود بین میزان بیشینه نسبت فشار مثبت و منفی گزارش شده می‌تواند ناشی از متفاوت بودن اندازه دو مدل مورد استفاده و نوع وسیله اندازه‌گیری فشار باشد. نسبت فشار ایجاد شده در مجرای ستون نوسانگر آب در دو مدل اشاره شده در شکل ۴ ارائه شده است.

برای بررسی تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر میزان کارایی ستون نوسانگر آب، میزان توان خروجی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد. در شکل ۵ تأثیر موقعیت قرارگیری

حالت‌های مختلف دیواره در این عمق در شکل ۶ ارائه شده است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که دو دیواره ۵ و ۱۰ سانتی‌متری دارای کارکرد بهتری در مقایسه با حالت بدون دیواره هستند. کارکرد دو دیواره در بسامدهای کمتر از ۰/۸ هرگز همانند بوده ولی به ازای بسامدهای بالاتر، دیواره ۱۰ سانتی‌متری کارکرد بهتری نسبت به دیواره ۵ سانتی‌متری داشته است.

نتایج این تحقیق از لحاظ ارتباط توان خروجی با ارتفاع امواج تحت تاثیر بسامد با نتایج Hashemi and Ketabdari and Ahmadi و Sadeghzadeh (2017) (2012) همخوانی داشته که نشان دادند با افزایش بسامد امواج، توان خروجی نیز افزایش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر فراسنجه‌های طول دیواره، موقعیت قرارگیری و بسامد امواج بر روی میزان توان تولیدشده توسط ستون نوسانگر آب از تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه استفاده شده است. در جدول ۲ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه تنها بر مبنای اثرگذاری‌های اصلی ارائه شده است که بر مبنای آن سه فراسنجه دیواره دستگاه، محل قرارگیری و بسامد موج بر روی توان تولیدشده موثر هستند. ضریب تبیین محاسبه‌شده برابر با ۰/۶۷ بوده که نشان می‌دهد، اثرگذاری‌های اصلی می‌توانند ۰/۶۷ توان خروجی دستگاه را برآورد کنند. با توجه به اینکه در این قسمت تنها از اثرگذاری‌های اصلی استفاده شده است، فراسنجه مجذور اتای جزئی (Partial Eta Squared) می‌تواند درصد تأثیرگذاری هر فراسنجه را نشان دهد. بر مبنای این فراسنجه، حدود ۶۰٪ توان خروجی دستگاه تحت تأثیر بسامد موج و ۲۹٪ آن نیز تابع دیواره انتهایی است. محل قرارگیری دستگاه کمترین تأثیر را در مقایسه با دیگر فراسنجه‌ها داشته است.

برای مشاهده اثرگذاری‌های اصلی فراسنجه‌های مختلف بر روی میزان کارکرد ستون نوسانگر آب از نگاره‌های ۷ تا ۹ استفاده شده است. در این نگاره‌ها تنها از اثرگذاری‌های اصلی استفاده شده و اثرگذاری‌های متقابل لحاظ نشده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش بسامد و قرارگیری دیواره در انتهای دستگاه، میزان توان خروجی

در شکل ۵ (a) که مربوط به حالت بدون دیواره انتهایی است، کارایی دستگاه در موقعیت $0.1B$ نسبت به دو موقعیت دیگر کمتر است. در این حالت دو موقعیت $0.25B$ و $0.4B$ کارایی تا حدودی همانند در میزان توان خروجی دارند. هنگامی که از دیواره ۵ سانتی‌متری استفاده شود (شکل ۵ (b))، کارایی دستگاه در موقعیت $0.4B$ نسبت به حالت $0.25B$ کاهش پیدا کرده ولی همچنان از حالت $0.1B$ بیشتر است. در شکل ۵ (c) از دیواره ۱۰ سانتی‌متری در انتهای دستگاه استفاده شده است. در این حالت میزان کارایی دستگاه در موقعیت $0.4B$ نسبت به دو حالت دیگر به شدت کاهش یافته است ولی همچنان حالت $0.25B$ بهترین کارایی را در مقایسه با دو حالت دیگر داراست. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که با افزایش عمق کارگذاری دستگاه، در آغاز میزان توان تولیدشده افزایش یافته ولی پس از آن روند کاهشی داشته است. بر همین مبنای بایستی عمقی را انتخاب کرد که در آن دستگاه دارای بیشترین کارایی باشد. در این تحقیق مشخص شد که عمق کارگذاری $0.25B$ نسبت به دو عمق کارگذاری دیگر دارای کارکرد بهتری است. برای مقایسه تأثیر دیواره انتهایی بر روی کارکرد دستگاه در عمق $0.25B$ ، نتایج

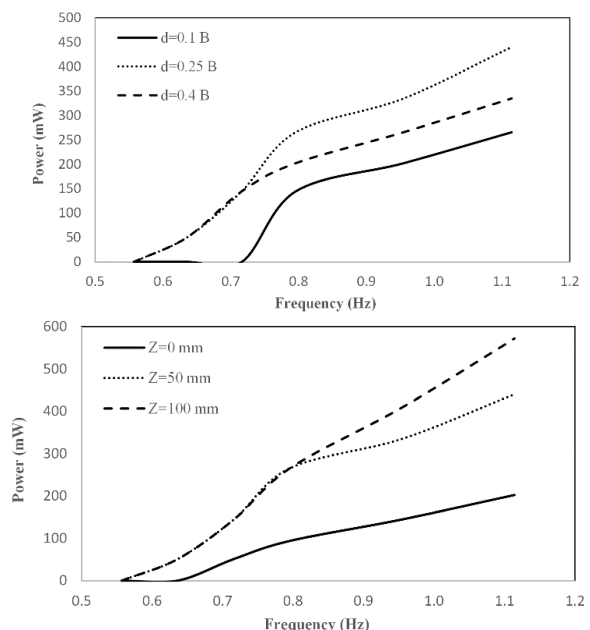


Fig. 6 Effect of back wall height on OWC efficiency at the depth of 0.25 of chamber length

شکل ۶ مقایسه تأثیر ارتفاع دیواره انتهایی بر روی کارکرد دستگاه در عمق کارگذاری ۲۵ درصد طول محفظه OWC

جدول ۲ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه بر مبنای اثرگذاری‌های اصلی

Table 2 Results of two-way ANOVA based on only the main effects

Source	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Backwall height (Z)	2	169747.39	19.63	.000	0.29
Position (d)	2	60347.89	6.98	.001	0.12
Frequency (Hz)	5	250600.63	28.99	.000	0.60

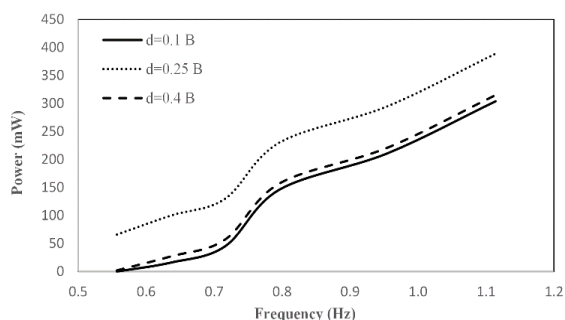


Fig. 8 Effect of OWC placement on output power without interaction effects

شکل ۸ تاثیر موقعیت قرارگیری دستگاه بر میزان توان خروجی بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل

در شکل ۹ تأثیر عمق قرارگیری در مقابل ارتفاع دیواره انتهایی بر روی میزان توان خروجی ارائه شده است. در این شکل تفاوت زیادی میان دیواره ۵ سانتی‌متری و حالت بدون دیواره مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع دیواره انتهایی به ۱۰ سانتی‌متر، میزان کارایی دستگاه در همه محل‌های قرارگیری آن افزایش یافته ولی میزان این افزایش در مقایسه با حالت پیش، قابل توجه نیست. در این شکل نیز محل قرارگیری 0.25B نسبت به دیگر محل‌های قرارگیری دارای کارایی بالاتری است، به گونه‌ای که توان تولید شده در این موقعیت قرارگیری نسبت به حالت 0.1B،

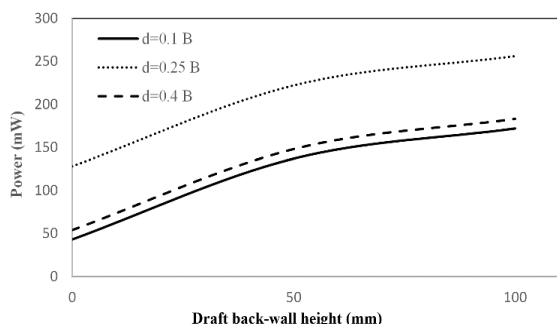


Fig. 9 Effect of OWC placement on output power at different back wall height without interaction effects

شکل ۹ تاثیر موقعیت قرارگیری دستگاه بر توان خروجی در دیواره‌های مختلف بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل

افزایش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که وجود دیواره به میزان بالایی بر کارایی دستگاه اضافه می‌کند. روند افزایش توان خروجی تا بسامد ۰/۷۲ هرتز به نسبت ملایم بوده ولی با افزایش بسامد نرخ افزایش توان بیشتر شده است. موج نوسانی ایجاد شده در OWC به ازای بسامدهای کمتر از ۰/۷۲ هرتز به نسبت ضعیف بوده و اصطکاک آب و بدنه نقش بسیار مهمی در کاهش توان خروجی دارد. به تدریج با افزایش ارتفاع موج، حرکت جریان در OWC راحت‌تر شده و اصطکاک موجود نیز کاهش می‌یابد. بر همین مبنای تغییرپذیری‌های توان از بسامد ۰/۷۲ هرتز به بسامد ۰/۸ هرتز نسبت به دیگر حالت‌ها شدیدتر است.

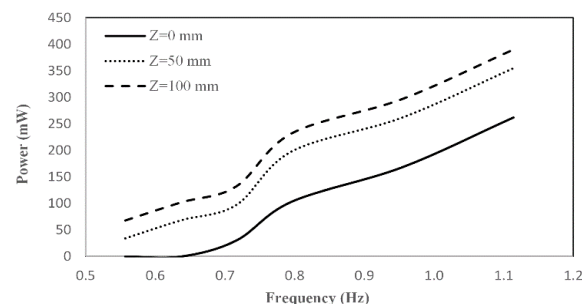


Fig. 7 Effect of back wall height on output power without interaction effects

شکل ۷ تاثیر دیواره انتهایی بر میزان توان خروجی بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل

در شکل ۸ تأثیر عمق قرارگیری دستگاه در مقابل بسامد امواج بر روی توان خروجی نشان داده شده است. بر مبنای این شکل $d=0.25B$ نسبت به دیگر عمق‌های قرارگیری دارای کارایی بهتری است که این مسئله برای همه بسامدها صادق است. در این موقعیت قرارگیری توان ایجاد شده به ازای بسامد ۱/۱۱ هرتز نسبت به موقعیت 0.1B به میزان ۲۸٪ و نسبت به موقعیت 0.4B، ۲۳٪ افزایش نشان می‌دهد. افزون بر این، توان تولیدی به ازای میزان‌های d برابر با 0.1B و 0.4B تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

با ۰/۹۱ محاسبه شده است که مقایسه آن با حالت پیش نشان می‌دهد که اثرهای متقابل تأثیر بالایی بر روی میزان توان خروجی دارند. در میان اثرهای متقابل، ($Z \times d$) و ($Z \times \text{Frequency}$) تأثیر بیشتری بر توان تولید شده داشته‌اند که این امر نشان‌دهنده تأثیر بالای دیواره انتهایی بر روی توان خروجی است.

بین ۴۸ تا ۲۰۰ درصد و نسبت به حالت $0.4B$ ، بین ۴۰ تا ۱۳۷٪ افزایش نشان می‌دهد.

برای بررسی اثرهای متقابل فراسنجه‌های مستقل بر توان خروجی از واریانس دو طرفه با لحاظ کردن اثرهای متقابل استفاده گردید. نتایج مربوط به اثرهای متقابل فراسنجه‌های مستقل بر روی میزان توان خروجی در جدول ۳ ارائه شده است. ضریب تبیین در این حالت برابر

جدول ۳ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه بر مبنای اثرگذاری‌های اصلی و متقابل

Table 3 Results of two-way ANOVA based on the main and interaction effects

Source	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Z	2	169747.39	39.56	.000	0.59
d	2	60347.89	14.06	.000	0.34
Frequency	5	250600.63	58.40	.000	0.84
Z × d	4	33392.91	7.78	.000	0.37
Z × Frequency	10	22050.80	5.14	.000	0.49
d × Frequency	10	10751.34	2.50	.015	0.32
Z × d × Frequency	20	7690.12	1.79	.046	0.40

۱۰ سانتی‌متری به ترتیب $97/30$ و $132/58$ میلی‌وات کمتر می‌باشد. این در حالی است که تفاوت توان خروجی بین دو دیواره ۵ و ۱۰ سانتی‌متری تنها $35/27$ میلی‌وات محاسبه شده است. نتایج آزمون بنفرونی در مورد موقعیت قرارگیری دستگاه نشان می‌دهد که حالت $0.25B$ نسبت به $0.1B$ و $0.45B$ به ترتیب $73/08$ و $68/52$ میلی‌وات باعث افزایش توان خروجی شده است.

برای بررسی اثرگذاری‌های بین گروهی از آزمون بنفرونی^۱ استفاده شد. در جدول‌های ۴ و ۵ نتایج این آزمون به ترتیب در مورد ارتفاع دیواره انتهایی و عمق قرارگیری سامانه ارائه شده است. بنا بر نتایج این جدول، وجود دیواره تأثیر زیادی بر روی خروجی داشته ولی ارتفاع آن چندان تأثیری نداشته است. مقایسه میانگین‌های حاشیه‌ای نشان می‌دهد که توان خروجی در حالت بدون دیواره نسبت به دو دیواره ۵ و

جدول ۴ اثرگذاری‌های بین گروهی مربوط به ارتفاع دیواره انتهایی با استفاده از آزمون بنفرونی

Table 4 Inter-group effects on back wall height using Bonferroni test

(I) Z	(J) Z	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	99% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	5	-97.30*	15.43	.000	-144.72	-49.88
	10	-132.58*	15.43	.000	-180.00	-85.16
5	0	97.30*	15.43	.000	49.88	144.72
	10	-35.27	15.43	.079	-82.69	12.14
10	0	132.58*	15.43	.000	85.16	180.00
	5	35.27	15.43	.079	-12.14	82.69

1 Bonferroni test

جدول ۵ اثرگذاری‌های بین گروهی مربوط به موقعیت قرارگیری OWC با استفاده از آزمون بنفرونی

Table 5 Inter-group effects on OWC placement using Bonferroni test

(I) d	(J) d	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	99% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0.10B	0.25B	-73.08	15.43	.000	-120.50	-25.66
	0.45B	-4.55	15.43	1.000	-51.97	42.86
0.25B	0.10B	73.08	15.43	.000	25.66	120.50
	0.45B	68.52	15.43	.000	21.10	115.94
0.45B	0.10B	4.55	15.43	1.000	-42.86	51.97
	0.25B	-68.52	15.43	.000	-115.94	-21.10

نتایج میانگین‌های حاشیه‌ای محاسبه‌شده نشان می‌دهد که در بیشینه بسامد مورد استفاده، دیواره‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب باعث افزایش ۹۸ و ۱۸۲ درصدی کارایی دستگاه نسبت به حالت بدون دیواره انتهایی شده‌اند.

تأثیر متقابل محل قرارگیری دستگاه و بسامد امواج بر روی میزان توان خروجی در شکل ۱۱ ارائه شده است. در این شکل مانند شکل ۸ با قرار دادن دستگاه در فاصله 0.25B می‌توان بیشترین توان خروجی را داشت. با در نظر گرفتن اثرهای متقابل میان بسامد امواج و موقعیت قرارگیری دستگاه به ازای بسامدهای کمتر از ۰/۹ هرتز، موقعیت 0.4B می‌تواند موقعیت بهتری نسبت به حالت 0.1B از لحاظ توان خروجی در نظر گرفته شود ولی به ازای بسامدهای بالای ۰/۹۵ هرتز، موقعیت 0.1B کارایی بهتری نسبت به موقعیت 0.4B داشته است.

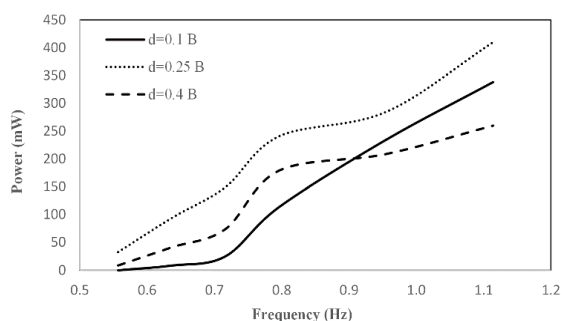


Fig. 11 The effect of OWC placement on output power with interaction effects

شکل ۱۱ تأثیر موقعیت قرارگیری OWC بر میزان توان خروجی با در نظر گرفتن اثرهای متقابل

نتایج آزمون بنفرونی بر روی بسامدهای مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان می‌دهد که توان خروجی دستگاه به ازای بسامدهای کمتر از ۰/۷۲ هرتز تغییرپذیری‌های چندانی نداشته، درحالی‌که با افزایش بسامد از ۰/۷۲ هرتز، شدت تغییرپذیری‌های توان خروجی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در بسامد ۱/۱۱ هرتز بیشترین توان خروجی ایجاد شده است. میزان توان خروجی در بسامد ۱/۱۱ هرتز نسبت به دو بسامد ۰/۸ و ۰/۹۵ هرتز به ترتیب ۹۰٪ و ۳۸٪ افزایش داشته است. برای بررسی دقیق‌تر اثرهای متقابل از نگاره‌های ۱۰ تا ۱۲ استفاده شده است. مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۷ نشان می‌دهد که وجود اثر متقابل میان بسامد امواج و ارتفاع دیواره انتهایی باعث شده است که در بسامدهای کمتر از ۰/۸ اختلاف چندانی میان دو دیواره ۵ و ۱۰ سانتی‌متری مشاهده نشود. در بسامدهای بالا، ارتفاع دیواره تأثیر بالایی بر کارکرد دستگاه در هر دو حالت (با و بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل) داشته است.

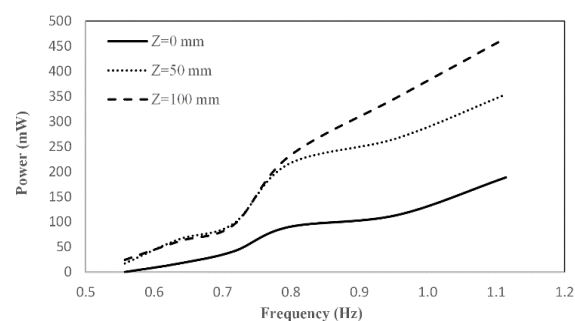


Fig. 10 The effect of back wall height on output power with interaction effects of F and Z

شکل ۱۰ تأثیر دیواره انتهایی بر میزان توان خروجی با در نظر گرفتن اثرهای متقابل بسامد امواج و ارتفاع دیواره انتهایی

در شکل ۱۳ میزان فشار پویایی بدون بعد در مقابل میزان محاسبه شده از طریق رابطه ۱۲ ارائه شده است. بر مبنای این شکل همخوانی به نسبت مناسبی میان میزان فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده مشاهده می‌شود. برای بررسی کارایی رابطه ارائه شده از شاخص کارایی ناش-ساتکلیف استفاده شد. چنانچه میزان این ضریب از ۰/۷- بیشتر باشد، دقت رابطه ارائه شده مناسب خواهد بود. بر مبنای محاسبه‌های صورت گرفته میزان این ضریب برابر با ۰/۷۵ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول رابطه ارائه شده می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از یک سامانه OWC شناور برای استحصال انرژی از امواج استفاده شد. با توجه به پیچیدگی بالای هیدرودینامیک جریان در سامانه OWC، استفاده از بررسی فیزیکی دارای اهمیت بالایی است. نتایج آزمایش‌های مربوط به محل قرارگیری سامانه نشان می‌دهد که فاصله ۰/۲۵ طول محفظه کارکرد بهتری نسبت به حالت‌های دیگر داشته است. افزون بر این وجود دیواره انتهایی تأثیر بالایی بر میزان توان خروجی داشته به گونه‌ای که در بهترین محل قرارگیری و بسامد ۱/۱ هرتز، وجود دیواره‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب باعث افزایش توان خروجی به میزان ۱/۱۸ و ۱/۸۳ برابر حالت بدون دیواره شده است. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر میزان توان خروجی از تجزیه و تحلیل واریانس دو طرفه استفاده شد. نتیجه آن نشان می‌دهد که بسامد امواج و دیواره انتهایی بیشترین تأثیر را بر روی توان خروجی داشته‌اند. از سویی اثر متقابل دیواره انتهایی با بسامد و محل قرارگیری سامانه نیز بیشترین نقش را در میزان توان خروجی داشته‌اند. در بین محل‌های قرارگیری سامانه، موقعیت ۰/۲۵ طول محفظه کارایی بالاتری نسبت به دو عمق دیگر داشته است. کارکرد دو دیواره مورد استفاده در بسامدهای پایین همانند بوده ولی به ازای بسامدهای بالاتر، دیواره ۱۰ سانتی‌متری کارکرد بهتری داشته است. بر همین مبنای می‌توان نتیجه گرفت که وجود دیواره بزرگ‌تر در همه حالت‌ها نمی‌تواند باعث تولید

در شکل ۱۲ تغییرپذیری‌های توان خروجی دستگاه تحت تأثیر دو فراسنجه ارتفاع دیواره و موقعیت قرارگیری دستگاه ارائه شده است. بر مبنای شکل ۱۲ موقعیت ۰.۲۵B در همه حالت‌ها کارایی بهتری داشته است. میان دو موقعیت 0.1B و 0.4B نیز، ارتفاع دیواره انتهایی مؤثر بوده به گونه‌ای که به ازای دیواره ۱۰ سانتی‌متر، موقعیت 0.1B باعث توان خروجی بیشتری شده ولی در دیگر حالت‌ها، موقعیت 0.4B دارای کارایی بهتری است.

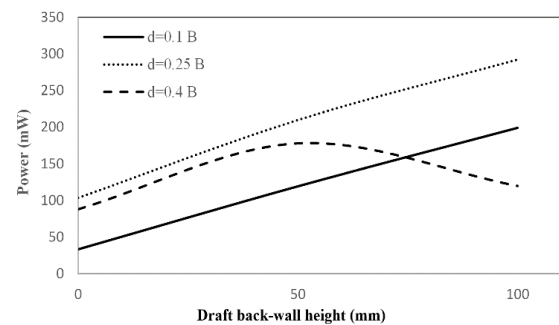


Fig. 12 The effect of OWC placement on output power at different back wall height with interaction effects

شکل ۱۲ تأثیر موقعیت قرارگیری بر میزان توان خروجی در دیواره‌های مختلف بدون در نظر گرفتن اثرهای متقابل

با توجه به تجزیه و تحلیل ابعادی و آزمایش‌های صورت گرفته معادله نهایی محاسبه فشار پویایی تولید شده در مجرای OWC به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{P_{dyn}}{\rho g y} = \left(\frac{H}{\lambda}\right)^{2.3} \left(\frac{c}{\sqrt{g y}}\right)^{6.2} d^{0.07} \left(\exp \frac{Z}{y}\right)^{1.1} \quad (12)$$

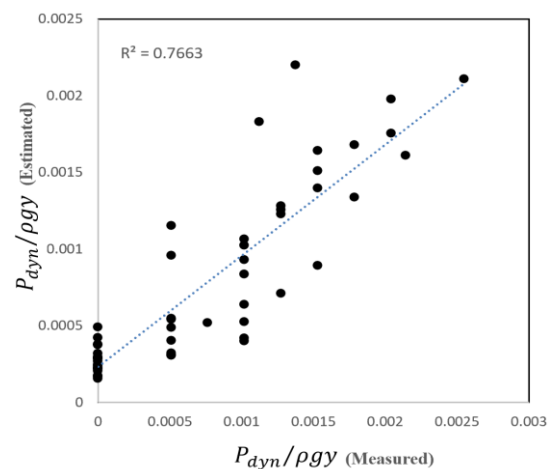


Fig. 13 Comparison between measured and estimated dimensionless dynamic pressure

شکل ۱۳ مقایسه میزان‌های بدون بعد فشار پویایی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

۶- سپاسگزاری

همه آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام پذیرفت. بدین وسیله از مسئولان و کارشناسان این سازمان قدردانی می‌شود.

۷- منابع

Alizadeh Kharkeshi, B., Shafaghat, R., Alamian, R. and Aghajani Afghan, A.H. (2020). Experimental & analytical hydrodynamic behavior investigation of an onshore OWC-WEC imposed to Caspian Sea wave conditions. *International Journal of Maritime Technology*. 14, 1-12.

Antonio, F.D.O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(3), 899-918.

Elhanafi, A., Macfarlane, G. and Leong, Z. (2017) Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter. *Applied Energy*. 189, 1-20.

Falcão, A.F. and Henriques, J.C. (2014). Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*. 6, 18-34.

Ferguson, T.M., Fleming, A., Penesis, I. and Macfarlane, G. (2015). Improving OWC performance prediction using polychromatic waves. *Energy*. 93, 1943-1952.

Hashemi, M. and Sadeghzadeh, S. (2017). Numerical investigation of the performance of oscillating water column (OWC) device under the waves character on the southern coast of Iran. *Journal of Mechanical Engineering*. 46(4), 281-290. (In Persian)

He, F. and Huang, Z. (2014). Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters: an experimental study. *Ocean Engineering*. 88, 618-626.

Ketabdari, M. and Ahmadi, M. (2012). Feasibility study of sea wave energy absorption in southern part of Iran using numerical modeling. *Iranian Journal of Marine Science and Technology*. 15(60), 20-29. (In Persian)

Liu, Z., Xu, C. and Kim, K. (2021). Overall performance of a model OWC system under the free-spinning mode: An experimental study. *Ocean Engineering*. 227, 108890.

توان بیشتری شود. در این تحقیق از میان ویژگی‌های OWC تنها ارتفاع دیواره انتهایی متغیر در نظر گرفته شد، این در حالی است که می‌توان آزمایش‌های دیگری بر روی تأثیر شکل سامانه، ابعاد محفظه و مجرای آن و نیز فراسنجه‌های موج بر روی میزان توان تولیدشده انجام داد تا درک بهتری نسبت به تأثیر فراسنجه‌های مختلف بر کارکرد سامانه به‌دست آید.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	طول مجرای OWC (L)
Z	ارتفاع دیواره انتهایی (L)
d	فاصله OWC نسبت به سطح آب (L)
\dot{m}_{in}	تغییرپذیری‌های زمانی جرم ورودی به درون حجم کنترل (MT^{-1})
\dot{m}_{out}	تغییرپذیری‌های زمانی جرم خروجی به درون حجم کنترل (MT^{-1})
$\dot{V}_a(t)$	تغییرپذیری‌های حجم هوای عبوری از سامانه OWC (L^3T^{-1})
P_t	توان تولیدشده توسط موج (ML^2T^{-3})
P_{dyn}	فشار پویایی اندازه‌گیری شده ($ML^{-1}T^{-2}$)
y	عمق جریان (L)
H	ارتفاع موج (L)
k	شماره موج
l	طول مجرای OWC (L)
w	عرض مجرای OWC (L)
ω	بسامد زاویه‌ای (T^{-1})
T	زمان تناوب موج (T)
λ	طول موج (L)
f	بسامد موج (T^{-1})
c	سرعت موج (LT^{-1})
g	شتاب گرانشی (LT^{-2})
ξ_0	تیزی موج
α	شیب ساحل
H_t	ارتفاع موج در ساحل (L)
K_r	ضریب انعکاس
Partial Eta Squared	مجذور اتای جزئی

- Shahsavarizadeh, A., Zahiri, J. and Jafari, A. (2019). Effect of the back wall draft on the performance of oscillating water column for wave energy extraction. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(8), 1937-1949. (In Persian)
- Sheng, W. (2019). Motion and performance of BBDB OWC wave energy converters: I, hydrodynamics. *Renewable Energy*. 138, 106-120.
- Sheng, W., Alcorn, R. and Lewis, T. (2014). Physical modelling of wave energy converters. *Ocean Engineering*. 84, 29-36.
- Viviano, A., Naty, S. and Foti, E., (2018). Scale effects in physical modelling of a generalized OWC. *Ocean Engineering*. 162, 248-258.
- Weber, J. (2007) Representation of non-linear aerothermodynamic effects during small scale physical modelling of OWC WECs. In *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal (Vol. 895).
- Zabihi, M., Mazaheri, S. and Montazeri Namin, M. (2018). Experimental study of wave spectrum type impact on inner chamber fluctuation, pressure and reflection of OWC device. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*. 2(3), 19-27.
- Zanuttigh, B. and van der Meer, J.W. (2008). Wave reflection from coastal structures in design conditions. *Coastal engineering*. 55(10), 771-779.
- Zheng, S., Antonini, A., Zhang, Y., Greaves, D., Miles, J. and Iglesias, G. (2019). Wave power extraction from multiple oscillating water columns along a straight coast. *Journal of Fluid Mechanics*. 878, 445-480.
- Zheng, S., Antonini, A., Zhang, Y., Miles, J., Greaves, D., Zhu, G. and Iglesias, G. (2020). Hydrodynamic performance of a multi-oscillating water column (OWC) platform. *Applied Ocean Research*. 99, 102168.
- Masoomi, M. and Yousefifard, M. (2020). Performance analysis and investigation of the forces acting on the sea wave energy converter based on an oscillating water column under regular wave by numerical method. *Marine Technology*. 7(1), 101-114. (In Persian)
- Mendonça, A., Dias J., Didier, E., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Reis, M.T., Conde, J.M.P., Poseiro, P. and Teixeira, P.R.F. (2018). An integrated tool for modelling oscillating water column (OWC) wave energy converters (WEC) in vertical breakwaters. *Hydro-environment Research*. 19, 198-213.
- Morrison, I.G. and Greated, C.A. (1992). Oscillating water column modelling. In *Coastal Engineering*. 23, 502-511.
- Pereiras, B., López, I., Castro, F. and Iglesias, G. (2015). Non-dimensional analysis for matching an impulse turbine to an OWC (oscillating water column) with an optimum energy transfer. *Energy*. 87, 481-489.
- Portillo, J.C.C., Collins, K.M., Gomes, R.P.F., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Howey, B.D., Hann, M.R., Greaves, D.M. and Falcão, A.F.O. (2020). Wave energy converter physical model design and testing: The case of floating oscillating-water-columns. *Applied Energy*. 278, 115638.
- Postma, G.M. (1989). Wave reflection from rock slopes under random wave attack. MS thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering.
- Ram, K.R., Ahmed, M.R., Zullah, M.A. and Lee, Y. H. (2016). Experimental studies on the flow characteristics in an inclined bend-free OWC device. *Ocean Engineering and Science*. 1(1), 77-83.
- Sameti, M. and Farahi, E. (2014). Output power for an oscillating water column wave energy conversion device. *Ocean and Environmental Fluid Research*. 1(2), 27-34.
- Seelig, W.N. and Ahrens, J.P. (1981). Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters. *Coastal Engineering Research Center Fort Belvoir VA*.