



# Experimental Evaluation of the Effect of Dimensionless Hydrodynamic Coefficients on the Performance of a Multi-Chamber Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Alizadeh Kharkeshi B.<sup>1</sup>,  
Shafaghat R.<sup>1\*</sup>,  
Jahanian O.<sup>1</sup>,  
Rezanejad K.<sup>2</sup>,  
Alamian R.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Alizadeh Kharkeshi B, Shafaghat R, Jahanian O, Rezanejad K, Alamian R. Experimental Evaluation of the Effect of Dimensionless Hydrodynamic Coefficients on the Performance of a Multi-Chamber Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(12):823-834.

<sup>1</sup>Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon, Portugal.

### \*Correspondence

Address: Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Phone: 01135501393

Fax: -  
rshafaghat@nit.ac.ir

### Article History

Received: June 02, 2021

Accepted: August 02, 2021

ePublished: October 15, 2021

## ABSTRACT

Sea wave conditions have a significant effect on the hydrodynamic behavior of oscillating water columns (OWC). The interactions of the converter and the input waves are crucial in determining and evaluating the non-dimensional hydrodynamic coefficients. Therefore, considering the importance of these coefficients in evaluating the performance of OWC, In this paper, experimental evaluation of non-dimensional hydrodynamic coefficients of a multi-chamber OWC has been discussed. To define the experimental tests, considering the installation location of the converter on the breakwater, the conditions of the Caspian Sea were applied. Calibration and uncertainty analysis has been performed, and experimental tests have been carried out in the wave tank of the BNUT. According to the obtained results, non-dimensional water draft depth is assumed to be constant, with increasing non-dimensional frequency of the incident wave, the non-dimensional coefficient of the transmitted wave, reflected wave, discharge coefficient, and pressure coefficient increase. On the other hand, the results showed that changing the non-dimensional number of the wave from 1.9 to 3.3, the discharge coefficients, the reflected wave, the pressure, and the transmitted wave increase by 1.6 times, 2.2 times, 2.8 times, and 3.5 times, respectively. The non-dimensional coefficient of the transmitted wave is highly sensitive to the wave conditions; the non-dimensional discharge coefficient will have fewer changes than other coefficients. On the other hand, the results showed that the laboratory converter in this study has an efficiency of 41.8% in the best state; this efficiency occurs at the non-dimensional natural frequency of 0.88 and the non-dimensional water draft depth of 0.032; under these conditions, the amplitude of water fluctuations inside the OWC reaches 9.6 cm.

**Keywords** Renewable Energy, Oscillating Water Column, Dimensionless Hydrodynamic Coefficient, Experimental Study

## CITATION LINKS

[1] Review of wave energy technologies ... [2] Air turbine choice and optimization for floating ... [3] Hydraulic model test of wave energy conversion. [4] An investigation into the hydrodynamic efficiency ... [5] Experimental studies on the flow characteristics in an oscillating water column device. [6] Modeling and optimization of the chamber of OWC system. [7] Effect of turbine section orientation on the performance characteristics of an oscillating ... [8] Modelling and design of an oscillating wave energy converter [9] Wave generator modelling using an oscillating water column ... [10] Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column ... [11] An experimental study of pile-supported OWC-type breakwaters. [12] Modelling of the multi-chamber oscillating water column ... [13] CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device. [14] Experimental investigations on the performance of a fixed-oscillating water column ... [15] Effects of Power Take-Off Damping and Model Scaling ... [16] Evaluation of the wind and wave energy ... [17] Feasibility study of wave energy potential ... [18] Wave energy and hot spots in Anzali port. [19] Evaluation of technologies for harvesting wave ... [20] Wave energy potential along the southern coast of the Caspian Sea. [21] <http://www.emec.org.uk/standards>. [22] Experimental assessment of a fixed on-shore oscillating water ... [23] Experimental & Analytical Hydrodynamic Behavior Investigation of an Onshore ... [24] Development of a free heaving OWC ... [25] A linearized model for estimating the performance of submerged ... [26] Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance ... [27] The investigation of a segment multi-chamber oscillating water column ... [28] Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed ... [29] Water wave mechanics for engineers and scientists. [30] A review of oscillating water columns.

## ارزیابی تجربی میزان اثرگذاری ضرایب بی‌بعد هیدرودینامیکی بر عملکرد یک مبدل ستون نوسانی آب چند محفظه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی

بهراد علی‌زاده خارکشی

گروه پژوهشی انرژی‌های دریایا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

روزبه شفت\*

گروه پژوهشی انرژی‌های دریایا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران،

امید جهانیان

گروه پژوهشی انرژی‌های دریایا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

کوروش رضا نژاد

موسسه فنی عالی لیسبون، دانشگاه لیسبون، لیسبون، پرتغال

رضوان عالمیان

گروه پژوهشی انرژی‌های دریایا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

### چکیده

شرایط امواج دریا تاثیر بسزایی بر رفتار هیدرودینامیکی ستون‌های نوسانی آب دارد؛ به‌گونه‌ای که اثرات متقابل مبدل و امواج ورودی، در تعیین و ارزیابی ضرایب هیدرودینامیکی بی‌بعد بسیار مهم هستند. لذا با توجه به اهمیت این ضرایب در ارزیابی عملکرد مبدل‌های ستون نوسانی آب، در این مقاله، به ارزیابی تجربی ضرایب هیدرودینامیکی بی‌بعد در شرایط عملکردی مبدل ستون نوسانی چندمحفظه‌ای پرداخته می‌شود. برای تعریف آزمون‌های تجربی، با در نظر گرفتن موقعیت نصب مبدل بر روی موج‌شکن، از شرایط دریای مازندران استفاده شده است. پس از کالیبراسیون تجهیزات و نیز آنالیز عدم قطعیت، آزمون‌های تجربی در استخر موج دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، با فرض یک عمق آب‌خور بی‌بعد و ثابت، با افزایش فرکانس بی‌بعد موج برخوردی، ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته، ضریب بی‌بعد موج انعکاس یافته، ضریب بی‌بعد تخلیه و ضریب بی‌بعد فشار افزایش می‌یابند. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهند، در اثر تغییر عدد بی‌بعد موج از  $1/9$  تا  $3/3$ ، ضرایب بی‌بعد تخلیه، موج انعکاس یافته، فشار و موج انتقال یافته به ترتیب  $1/6$  برابر،  $2/2$  برابر،  $2/8$  برابر و  $3/5$  برابر می‌شوند؛ یعنی ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته حساسیت بالایی نسبت به شرایط موج دارد؛ ضریب بی‌بعد تخلیه در مقایسه با دیگر ضرایب، تغییرات کمتری خواهد داشت. از طرفی نتایج نشان دادند که مبدل آزمایشگاهی در این تحقیق در بهترین حالت دارای راندمان  $41/8\%$  می‌باشد. این راندمان در فرکانس طبیعی بی‌بعد  $0/88$  و عمق آب‌خور بی‌بعد  $0/32$  رخ می‌دهد؛ در این شرایط دامنه نوسانات آب درون ستون نوسانی به  $9/6$  سانتی‌متر می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** انرژی‌های تجدید پذیر، ستون نوسانی آب، ضرایب بی‌بعد هیدرودینامیکی، مطالعه تجربی

تاریخ دریافت:  $1400/03/12$

تاریخ پذیرش:  $1400/05/11$

\* نویسنده مسئول: rshafaghat@nit.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه بشر با چالش‌هایی از جمله افزایش روزافزون جمعیت کره زمین، رشد تقاضای انرژی، محدودیت‌های سوخت‌های فسیلی،

آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و اثر گازهای گلخانه‌ای مواجه است؛ لذا به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان بهترین جایگزین برای منابع انرژی مرسوم امری گریزناپذیر است. در این راستا تا به امروز انواع مختلفی از منابع انرژی تجدیدپذیر شناسایی و معرفی شده‌اند؛ از جمله‌ی آنها می‌توان به انرژی امواج دریا، انرژی خورشیدی و انرژی بادی اشاره نمود. شایان توجه است که چگالی انرژی قابل استحصال از خورشید  $0/1$  الی  $0/2$  کیلووات بر مترمربع، انرژی باد  $0/4$  الی  $0/6$  کیلووات بر مترمربع و انرژی امواج دریا  $2$  الی  $3$  کیلووات بر مترمربع ارزیابی شده است<sup>[1]</sup>. با توجه به چگالی بالای انرژی امواج دریا، کل انرژی امواج دریا در حدود  $1$  الی  $10$  تراوات تخمین زده شده است که بخش قابل‌توجهی از انرژی مصرفی جهان را پوشش می‌دهد<sup>[2]</sup>.

مبدل‌های مختلفی برای بهره‌برداری از انرژی امواج دریا معرفی شده‌اند که ستون‌های نوسانی آب یکی از پرطرفدارترین مبدل‌های انرژی امواج هستند؛ به‌طور کلی مطالعات صورت گرفته بر روی مبدل‌های ستون نوسانی آب را می‌توان به دو دسته‌ی مطالعات تئوری و تجربی دسته‌بندی نمود؛ مطالعات تجربی به علت بررسی سامانه در شرایط نزدیک به واقعیت دارای اهمیت و جایگاه انکارناپذیری هستند. سورسو<sup>[3]</sup> در سال  $2005$  کارایی ستون نوسانی را برای دو هندسه متفاوت و نیز شرایط گوناگون امواج برخوردی مورد بررسی تجربی قرار داد. نتایج نشان داد، شرایط مختلف موج از جمله پریود و ارتفاع موج برخوردی بر فشار درون محفظه اثر گذار بوده، منجر به افزایش فشار درون محفظه می‌شود؛ همچنین تغییر هندسه می‌تواند با تغییر الگوی جریان منجر به افزایش بازدهی گردد. در بررسی پارامترهای هندسی مشخص شد که با افزایش شیب در کف سامانه، فشار در اوریفیس افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که بازده مبدل با سطح شیب‌دار تقریباً دو برابر بازده ستون نوسانی بدون شیب می‌باشد. توماس و همکاران<sup>[4]</sup> در سال  $2007$  در یک مطالعه تجربی، هندسه لبه‌ی جلویی سامانه را تغییر دادند و هندسه‌های مختلفی برای ورودی سامانه در نظر گرفتند. نتایج نشان داد، دیواره جلویی با لبه گرد شده نسبت به لبه‌های نوک‌تیز بازدهی بیشتری دارد؛ همچنین یکی از پارامترهای اثرگذار در عملکرد سیستم نحوه جانمایی آن با توجه به عمق آب می‌باشد؛ آن‌ها نشان دادند که افزایش مغروقیت دیواره جلویی باعث کاهش بازده در امواج با دامنه کوتاه می‌شود. رام و همکاران<sup>[5]</sup> در سال  $2010$  با هدف بهینه‌سازی انرژی جنبشی هوای گذرنده از اوریفیس، سطح مقطع اوریفیس را حداقلامکان کاهش دادند. نتایج نشان داد که همواره با تغییر پارامترهای موج از جمله فرکانس و عمق آب مقدار قدر مطلق سرعت هوای گذرنده از اوریفیس، در طول حرکت رو به پایین آب همواره کوچکتر از مقدار قدر مطلق فشار آن در طول حرکت رو به بالا می‌باشد. دیزاجی و سجادیان<sup>[6]</sup> در سال  $2011$  مشخصه‌های هندسی محفظه از جمله زاویه دیواره‌های جلویی و عقبی را بهینه‌سازی نمودند؛ نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع

چند محفظه‌ای با مقیاس کوچک پرداختند. آنها نشان دادند که ستون نوسانی چند محفظه‌ای به شرایط امواج برخوردی حساس می‌باشد؛ لذا با تغییر پیروید و ارتفاع موج، رفتار هیدرودینامیکی سامانه را بررسی نمودند. با توجه به نتایج به دست آمده، در ضرایب دمپینگ بالا، افزایش ارتفاع موج برخوردی منجر به کاهش بازدهی سامانه می‌گردد. در سال ۲۰۱۹ شلیک و آلتونکایناک<sup>[14]</sup> اثر پارامتر بی‌بعد بازشدگی نسبی را تحت شرایط امواج مختلف بر بازدهی ستون نوسانی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش بازشدگی نسبی بازدهی مبدل افزایش می‌یابد. همچنین در سال ۲۰۱۹ اشلین و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی اثر ضریب دمپینگ بر رفتار ستون نوسانی پرداختند، با افزایش نسبت مساحت اوریفیس به سطح مبدل، میزان میرایی PTO کاهش می‌یابد و در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش نسبت مساحت سطح میزان تغییرات سطح آزاد آب زیادت‌تر می‌شود ولی از طرف دیگر فشار در محفظه کاهش می‌یابد.

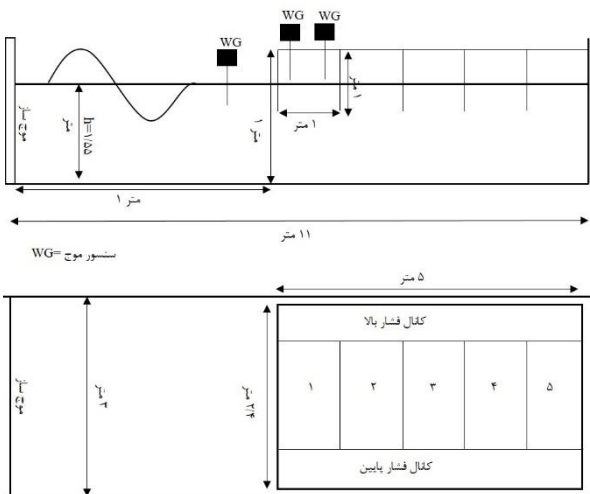
در طراحی مبدل‌های انرژی امواج، باید به مشخصه‌های امواج محل نصب توجه فراوانی داشت؛ زیرا شرایط دریا در رفتار و پاسخ هیدرودینامیکی مبدل بسیار اثرگذار است. در این مقاله، برای شبیه‌سازی امواج برخوردی از شرایط امواج دریای مازندران استفاده شده است. روسو و اونه‌آ<sup>[16]</sup> در سال ۲۰۱۳ با تحلیل و بررسی انرژی امواج دریای مازندران نشان دادند، این دریا در آینده می‌تواند به عنوان یک منبع استراتژیک انرژی شناخته شود. فدایی‌نژاد و همکاران<sup>[17]</sup> در سال ۲۰۱۳ پتانسیل انرژی امواج دریای مازندران را در ساحل تنکابن بررسی نمودند؛ در این مطالعه مشخص شد، در نواحی دور از ساحل، انرژی امواج تا ۹ کیلووات بر متر نیز می‌رسد. حدادپور و همکاران<sup>[18]</sup> در سال ۲۰۱۴ شرایط دریای مازندران را در بندر انزلی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، برای دستیابی به حداکثر بازدهی مبدل انرژی جاذب نقطه‌ای، ارتفاع موج باید به ۲ متر و پیروید آن به ۴ تا ۷ ثانیه برسد. عالمیان و همکاران<sup>[19]</sup> در سال ۲۰۱۴ به بررسی و تحلیل پتانسیل انرژی امواج کل دریای مازندران پرداختند. آن‌ها بر مبنای پتانسیل امواج دریای مازندران انواع مبدل‌های انرژی را برای گزینش مبدل بهینه ارزیابی کردند؛ همچنین عالمیان و همکاران<sup>[20]</sup> در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۷ پتانسیل انرژی امواج دریا را در سواحل جنوبی دریای مازندران بررسی و اطلاعات مهم امواج دریا در این مناطق را استخراج کردند.

در یک مبدل ستون نوسانی آب، برخورد موج به مبدل، سبب حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد آب درون سامانه ستون نوسانی می‌شود. دامنه این نوسانات می‌تواند نشان‌دهنده پاسخ هیدرودینامیکی سیستم به موج برخوردی باشد؛ به‌گونه‌ای که رفتار هیدرودینامیکی ستون نوسانی آب را می‌توان با استفاده از پارامترهایی نظیر ارتفاع موج برخوردی، دامنه نوسانات درون محفظه، فشار درون محفظه و دمپینگ محور توان دهی توصیف نمود. با توجه به مطالعات

و طول موج، نرخ جریان خروجی هوا افزایش می‌یابد؛ همچنین نشان دادند که رفتار هیدرودینامیکی سامانه حساسیت شدیدی به هندسه آن دارد. یکی از روش‌های افزایش بازدهی سامانه ستون نوسانی آب، تغییر هندسه کانال خروجی هوا از حالت عمودی به افقی می‌باشد؛ این موضوع توسط پاتل و همکاران<sup>[7]</sup> در سال ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، وقتی محور مقطع خروجی جریان افقی باشد، بازدهی محور توان دهی افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که برای موقعیت افقی، دور توربین ۲۰٪ الی ۳۰٪ بیشتر می‌شود. فایره‌ورست<sup>[8]</sup> در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تئوری و تجربی ستون نوسانی آب در مقیاس ۱:۲۵، در محدوده پیروید ۱/۵ تا ۳/۲۵ ثانیه پرداخت. آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌ها برای دو حالت کاملاً مغروق و سطحی انجام شدند. نتایج تجربی نشان دادند که حداکثر بازده دستگاه در حالت سطحی، ۲۶٪ و در حالت مغروق، ۲۲٪ می‌باشد؛ اما مدل‌سازی ریاضی در این مطالعه، بازده تبدیل را به ترتیب برای حالت سطحی و مغروق کمتر از ۱۰ و ۱۵ درصد پیش‌بینی کرد.

از بین انواع گوناگون سامانه‌های ستون نوسانی آب، ستون نوسانی چند محفظه‌ای یکی از انواع مدرن‌تر آن‌ها می‌باشد. این نوع از ستون‌های نوسانی از دو یا چند محفظه پشت سرهم تشکیل شده‌اند. تجربیات نشان داده است که ستون‌های نوسانی چند محفظه‌ای در مقایسه با انواع دیگر ستون‌های نوسانی، از بازدهی بهتری برخوردارند. مفهوم اولیه ستون نوسانی چند محفظه‌ای در دانشگاه گلاسگو در سال ۲۰۰۳ معرفی شده است؛ در گام‌های نخست دورل و همکاران<sup>[9]</sup> یک مفهوم اولیه شامل مدلی از مبدل انرژی امواج چندمحفظه‌ای را به‌عنوان یک ابزار آموزشی ارائه نمودند؛ البته با توجه به قابلیت‌های موجود، عملکرد هیدرودینامیکی این مدل نیز در قالب یک مطالعه‌ی پژوهشی مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۴ ایتوریوز و همکاران<sup>[10]</sup> با تغییر هندسه‌های مرسوم ستون نوسانی آب به یک ستون نوسانی چند محفظه‌ای، به بررسی تجربی آن پرداختند. نتایج نشان دادند که ستون نوسانی چندمحفظه‌ای دارای عملکرد موثرتر و بازدهی بالاتری نسبت به مبدل تک محفظه‌ای می‌باشد. در سال ۲۰۱۶ هه و همکاران<sup>[11]</sup> به بررسی ضرایب بی‌بعد هیدرودینامیکی موثر بر رفتار ستون نوسانی پرداختند و ضرایب بی‌بعد مرتبط با اضمحلال انرژی توسط ایشان مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند که تغییر عمق آب‌خور و قطر اوریفیس بر عملکرد ستون نوسانی بسیار تاثیر گذار است. در سال ۲۰۱۷ شلیبی و همکاران<sup>[12]</sup> رفتار هیدرودینامیکی ستون نوسانی چندمحفظه‌ای را با در نظر گرفتن پارامترهای مهم نوسانات سطح آزاد آب، فشار درون محفظه و سرعت هوای خروجی از اوریفیس مورد مطالعه تجربی و عددی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که مطالعه تجربی می‌تواند سنگ محک خوبی برای بررسی قابلیت اطمینان مطالعه عددی باشد. در سال ۲۰۱۹ نیز شلیبی و همکاران<sup>[13]</sup> به مدل‌سازی ستون نوسانی

دوم (مبدل انرژی موج در مقیاس کوچک) نشان داد، مبدل ستون نوسانی مورد نظر در شرایط امواج دریای مازندران از عملکرد قابل قبولی برخوردار است و این مطالعات نشان داد که شرایط موج برخوردی و عمق آبخور از پارامترهای تاثیر گذار بر رفتار هیدرودینامیکی ستون نوسانی آب می‌باشند [22,23]؛ در این مرحله از پژوهش، یک مدل با مقیاس ۱:۱۰ در قالب فاز سوم مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل دارای طول ۵ متر، عرض ۲/۴ متر و ارتفاع ۲ متر می‌باشد. این ستون نوسانی در فاصله ۶ متری از موج‌ساز قرار گرفته است؛ جا نمایی ستون نوسانی در استخر موج با فرض نصب مبدل بر روی موج‌شکن انجام شده است (شکل ۱ و شکل ۲). سنسورهای سطح سنج در سقف سامانه و استخر موج تعبیه شده‌اند. برای شبیه‌سازی عملکرد محور توان دهی، یک اوریفیس به مساحت ۰/۱۸ متر مربع در سامانه قرار داده شد. تست‌های تجربی ستون نوسانی برای عمق آبخورهای ۰/۰۵، ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۸۵ تا ۰/۱۱۰ هرتز صورت پذیرفته است. با توجه به اهداف تعریف شده، در این پژوهش رفتار هیدرودینامیکی یکی از پنج محفظه موجود مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱) نمای جانبی و بالا ستون نوسانی مورد بررسی



شکل ۲) نمونه مبدل انرژی موج ساخته شده در آزمایشگاه با مقیاس ۱:۱۰

گذشته، تا به حال ستون‌های نوسانی عمدتاً تحت شرایط امواج دریای مازندران مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و عمده مطالعات بر محور بررسی رفتار با کمک سرعت، فشار و نوسانات سطح آزاد بوده است ولی ضرایب بی‌بعد موج انتقال یافته، موج انعکاس یافته، فشار و دمپینگ برای تعیین عملکرد هیدرودینامیکی ستون نوسانی تحت شرایط امواج دریای مازندران مورد بررسی قرار نگرفته است. در این راستا به منظور دستیابی به نتایج جامع و مستقل از ابعاد، پارامترهای نام‌برده در قالب اعداد بی‌بعد ضریب موج انتقال یافته، ضریب موج بازتابیده، ضریب فشار و ضریب دمپینگ تعریف شده‌اند. ضریب موج انتقال یافته، نسبت دامنه موج برخوردی به دامنه نوسانات درون محفظه می‌باشد. با توجه به نوسانات ستون آب درون محفظه، امکان بازتابش امواج از طرف ستون نوسانی آب وجود دارد؛ برای درک بهتر این پدیده، ضریب موج بازتابیده تعریف شده است. ضریب موج بازتابیده معرف نسبت دامنه موج بازتابیده به دامنه‌ی نوسانات درون محفظه می‌باشد. از طرفی نوسانات سطح آزاد درون محفظه سبب تغییر فشار داخل محفظه و دبی عبوری از محور توان دهی می‌شود؛ برای ارزیابی دقیق‌تر این دو پارامتر، ضرایب بی‌بعد فشار و دمپینگ تعریف شده است. شایان ذکر است که ضرایب بی‌بعد از روش آنالیز ابعادی پی‌باکینگهام به دست آمده‌اند. از طرفی، دریای مازندران در مقایسه با دریاهای آزاد و اقیانوس‌ها از پیوند و طول موج کوتاه‌تری برخوردار است؛ به طوری که به کارگیری سامانه‌ی ستون نوسانی آب در این دریا می‌تواند پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند تشدید را در پی داشته، سبب عملکرد مناسب مبدل شود. این در حالی است که بررسی‌ها نشان می‌دهند، بیشتر تحقیقات گذشته در شرایط دریاهای آزاد و اقیانوس‌ها انجام شده‌اند که دارای امواجی با پیوند و طول موج بلند می‌باشند. بنابراین در این مطالعه ابتدا با بررسی شرایط امواج دریای مازندران، نقطه‌ای مناسب برای نصب مبدل ستون نوسانی آب تعیین شده، سپس با در نظر گرفتن شرایط امواج دریا در نقطه‌ی برگزیده، عملکرد یک مبدل ستون نوسانی چندمحفظه‌ای با مقیاس ۱:۱۰ مورد ارزیابی تجربی قرار خواهد گرفت.

## ۲- تعریف مسئله

### ۲-۱- فیزیک مسئله

در این مطالعه، یک ستون نوسانی مستطیلی چندمحفظه‌ای با پنج محفظه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مبدل مورد بررسی در گروه پژوهشی انرژی‌های دریای پایه در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل طراحی و ساخته شده است. این پژوهش بخشی از یک پژوهش جامع به منظور طراحی و ساخت یک مبدل ستون نوسانی آب مناسب برای دریای مازندران می‌باشد. فازهای اجرایی در این پژوهش جامع مطابق با دستورالعمل استاندارد مرکز انرژی دریایی اروپا تعریف شده است [21]. ارزیابی نتایج مطالعات فازهای اول و

Ca ضریب بی‌بعد تخلیه‌ی محور توان دهی نامیده می‌شود. در این شرایط دبی سیال خروجی از اوریفیس را می‌توان با رابطه زیر به‌دست آورد:

$$Q = C_d D^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (12)$$

از طرف دیگر عملکرد ستون نوسانی به پارامتر بی‌بعدی به نام بازدهی بستگی دارد که برابر با نسبت انرژی خروجی از سامانه به انرژی موج ورودی می‌باشد. توان متوسط تولیدی توسط ستون نوسانی آب را می‌توان با کمک رابطه (۱۳) به‌دست آورد [25].

$$W_{owc} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Delta P Q dt \quad (13)$$

انرژی موج برخوردی به ستون نوسانی آب نیز بر اساس روابط ۱۴ الی ۱۶ تعریف می‌گردد [26].

$$W_w = E c_g \quad (14)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g L A^2 \quad (15)$$

$$c_g = \frac{\omega}{2k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (16)$$

که Q نشان‌دهنده دبی حجمی، P<sub>2</sub> فشار در خروجی ستون نوسانی و P<sub>0</sub> فشار اتمسفر است. لذا برای بازدهی ستون نوسانی (ε) می‌توان رابطه (۱۷) را ارائه نمود.

$$\epsilon = \frac{W_{owc}}{W_w} \quad (17)$$

### ۲-۳- مقیاس‌بندی فرود و شرایط امواج

عالمیان و همکاران [20] پتانسیل انرژی امواج را در نقاط گوناگون دریای مازندران مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج آنها نشان می‌دهد که علاوه بر نقاط عمیق، نقاط ساحلی این دریا نیز برای احداث نیروگاه ستون نوسانی آب از پتانسیل انرژی قابل قبولی برخوردار است؛ لذا با توجه به ضرورت وجود زیرساخت‌های ضروری، موج‌شکن موجود در ساحل بابلسر در شمال ایران برای نصب نیروگاه در نظر گرفته شده است. بر این اساس، پریود موج بین ۴ تا ۶ ثانیه و ارتفاع موثر موج بین ۰/۵ تا ۱ متر با امکان وقوع ۲۰۱۶ ساعت در سال به عنوان موج با بیشترین امکان وقوع و چگالی انرژی انتخاب شده است. برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی امواج از مقیاس‌بندی فرود استفاده شده است. با بهره‌گیری از رابطه (۱۸)، طبق مقیاس‌بندی فرود می‌توان شرایط امواج را به شرایط آزمایشگاهی تبدیل نمود.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (18)$$

در جدول ۱ مقادیر عمق آب‌خور، ارتفاع موج برخوردی و فرکانس موج‌های شبیه‌سازی شده توسط موج‌ساز در استخر موج نشان داده شده است. در این پژوهش ۳ عمق آب‌خور، ۴ ارتفاع موج و ۶ فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱) مقادیر پارامترهای تست

عمق‌های آب‌خور (سانتی‌متر)	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)
۱۵ - ۱۰ - ۵	۱۱ - ۱۰ - ۹ - ۸	۰/۱۱۰ - ۰/۱۰۵ - ۰/۱۰۰ - ۰/۰۹۵ - ۰/۰۹۰ - ۰/۰۸۵

### ۲-۲- آنالیز ابعادی مسئله

با توجه به نتایج فازهای اول و دوم و نیز بررسی‌های انجام شده، ارتفاع موج منعکس شده (H<sub>r</sub>)، ارتفاع موج منتقل شده (H<sub>t</sub>) و دامنه نوسانات فشار هوا (ΔP) به عنوان پارامترهای کلیدی اثرگذار بر عملکرد ستون نوسانی آب مشخص شده‌اند (رابطه‌ی (۱)).

$$H_r, H_t, \Delta P = f(H_i, h, d, D, L, \omega, \omega_n, k, \rho, g) \quad (1)$$

که H<sub>i</sub> ارتفاع موج برخوردی، h عمق آب، d عمق آب‌خور، D قطر اوریفیس، L طول موج، ω<sub>n</sub> فرکانس طبیعی ستون نوسانی آب، ω فرکانس موج برخوردی، k عدد موج، ρ چگالی آب و g شتاب گرانش زمین می‌باشد. پس از بی‌بعدسازی متغیرها با استفاده از تئوری پی-باکینگهام، گروه‌های بی‌بعد زیر استخراج شده است.

$$C_r, C_t, C_p = f\left(\frac{H_i}{h}, \frac{\omega}{\omega_n}, \frac{d}{h}, kh, \frac{\omega}{kg^{0.5}}\right) \quad (2)$$

که C<sub>r</sub>، ضریب انعکاس، C<sub>t</sub>، ضریب انتقال و C<sub>p</sub> ضریب فشار می‌باشند. این پارامترهای بی‌بعد در روابط ۳ الی ۵ نشان داده شده‌اند.

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (3)$$

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho g H_i} \quad (5)$$

رفتار هیدرودینامیکی سامانه در فرکانس‌های مختلف بسیار حائز اهمیت است؛ لذا اعداد بی‌بعدی مرتبط با ماهیت نوسانی امواج به‌صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$\omega_{dN} = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (6)$$

$$K_d = kh \quad (7)$$

$$\omega_d = \frac{\omega}{(kg)^{0.5}} \quad (8)$$

که ω<sub>dN</sub>، فرکانس بی‌بعد تشدید، K<sub>d</sub>، عدد بی‌بعد موج و ω<sub>d</sub> فرکانس بی‌بعد موج برخوردی می‌باشند.

یکی از اجزای مهم دیگر در ستون نوسانی آب، محور توان دهی می‌باشد. وقتی سیستم از PTO غیرخطی بهره‌برد می‌توان طبق رابطه زیر اختلاف فشار را به دبی جریان با کمک ضریب دمپینگ ارتباط داد [24].

$$\Delta P = C_{PTO} \dot{m}^2 \quad (9)$$

در رابطه‌ی بالا (۹) C<sub>PTO</sub> ضریب دمپینگ محور توان دهی نامیده می‌شود، از طرف دیگر دبی جریان هوای خروجی (Q) از اوریفیس، چگالی هوا (ρ)، اختلاف فشار (ΔP) و قطر اوریفیس (D) بستگی دارد (رابطه‌ی (۱۰)).

$$Q = f(\rho, D, \Delta P) \quad (10)$$

پس از آنالیز ابعادی با استفاده از تئوری پی-باکینگهام، رابطه زیر به‌دست می‌آید [24]:

$$C_d = \rho^{\frac{1}{2}} D^{-2} \Delta P^{-\frac{1}{2}} Q \quad (11)$$



### ۳- مطالعه تجربی

#### ۳-۱- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی و داده برداری

برای انجام آزمون‌های تجربی از استخر موج گروه پژوهشی انرژی‌های دریا پایه در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استفاده شده است (شکل ۳). طول، عرض و ارتفاع این استخر به ترتیب ۱۱ متر، ۳ متر و ۳ متر می‌باشد. این استخر قابلیت تولید امواج منظم را در بازه وسیعی از مشخصات ارتفاع و پریود دارد. به منظور اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی از اوربیس، از سرعت سنج جی‌ام‌۱۶ (GM816A) و برای اندازه‌گیری میزان نوسانات سطح آزاد آب در داخل استخر موج و ستون نوسانی، از برد آردواینو و سنسور اولتراسونیک ایچ‌سی‌آر‌صفر چهار (HC-SR04) استفاده شده است (جدول ۲).

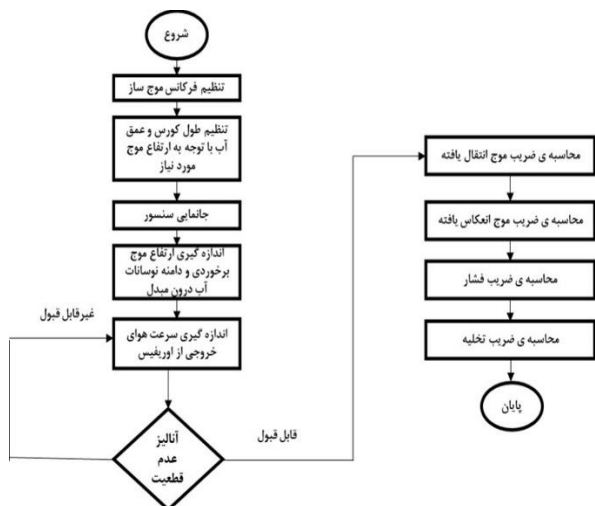
فلوچارت انجام مطالعات تجربی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در ابتدا با توجه به پریود امواج دریای مازندران و مقیاس ۱:۱۰، فرکانس موج برخوردی محاسبه شدند؛ با توجه به فرکانس تنظیم شده و ارتفاع موج مورد نیاز، عمق آب برای انجام آزمون‌ها تنظیم شده، سپس سنسورها جانمایی شدند.



شکل ۳) نمای چپ و راست استخر موج و موج‌ساز موجود در گروه پژوهشی انرژی‌های دریا پایه

#### جدول ۲) مقدار خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری

تصویر	دقت	تجهیز اندازه‌گیری
	۰/۱ متر بر ثانیه	سرعت سنج
	۳ میلی‌متر	سنسور فوق صوتی



شکل ۴) فلوچارت پروسه داده برداری و بررسی داده‌ها

هر آزمون ۵ بار تکرار شده، داده‌های به‌دست آمده از آزمون‌ها مورد آنالیز عدم قطعیت قرار گرفته‌اند؛ در صورت قابل اعتماد نبودن داده‌ها، آزمون‌ها دوباره انجام شده‌اند.

#### ۳-۱- کالیبراسیون و آنالیز عدم قطعیت

به منظور دستیابی به داده‌های قابل اطمینان و صحت‌سنجی مقادیر استخراج شده، ضمن کالیبراسیون کلیه ابزارهای اندازه‌گیری، آنالیز عدم قطعیت نیز انجام شده است. در این مطالعه از سه سنسور سطح‌سنج و یک دستگاه سرعت‌سنج استفاده شده است. شکل ۵ سامانه‌ی کالیبراسیون سنسورهای سطح‌سنج را نشان می‌دهد.



شکل ۵) استفاده از مخزن، دوربین و خط کش به منظور کالیبراسیون سنسور سطح‌سنج و تونل باد برای کالیبراسیون سرعت سنج

استفاده از روابط (۲۷) الی (۲۹) به دست آورد که برای محاسبه فشار در نقاط مختلف می‌توان از معادله برنولی بهره جست [27].

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) + \rho \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (27)$$

$$\varphi_1 \cong V_1 \eta_1 = \frac{\omega H_1^2}{4} \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (28)$$

$$\varphi_2 = \frac{A_1}{A_2} \varphi_1 \quad (29)$$

در روابط (۲۷) الی (۲۹)  $\varphi_1$  و  $\varphi_2$  پتانسیل سرعت و  $p_1$  و  $p_2$  به ترتیب فشار در نقاط ۱ و ۲ می‌باشد [12].

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{\omega^2 H_1^2}{4} (2 \cos(\omega t)^2 - 1) \quad (30)$$

$$p_2 - p_0 = \rho \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \rho \frac{Q}{A_2 (V_2 - V_1)} \quad (31)$$

$$P_t = \left[ \rho \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \rho \frac{Q}{A_2} (V_2 - V_1) \right] Q \quad (32)$$

$$P_t = \left[ -\rho \frac{A_1 \omega^2 H_1^2}{A_2} (2 \cos(\omega t)^2 - 1) - \rho \frac{Q}{A_2} (V_2 - V_1) \right] Q \quad (33)$$

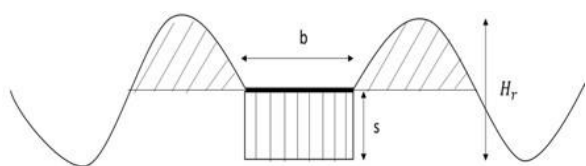
در رابطه (۳۳)،  $P_t$  توان قابل استحصال از جریان خروجی اوریفیس می‌باشد که در محاسبه توان خروجی از ضریب بتز برابر با ۰/۳۵ استفاده می‌شود [28]. در این پژوهش سرعت خروجی از اوریفیس با کمک آزمایش تجربی اندازه‌گیری شده است و با داشتن سرعت بقیه مجهولات مسئله محاسبه خواهد شد.

در اثر نوسانات سطح آزاد آب درون ستون نوسانی آب، موج انعکاسی تولید می‌شود. طبق قانون بقای جرم، همان مقدار آبی که توسط نوسانات سطح آزاد آب در اثر فشار محفظه جابجا می‌شود، می‌تواند منجر به تولید موج انعکاسی شود. شکل ۶ نشان می‌دهد که در اثر حرکت سطح آزاد آب درون ستون نوسانی می‌تواند موجی تولید شود [29].

اگر دامنه نوسانات در یک رفت و برگشت به میزان  $s$  باشد؛ عرض ستون نوسانی  $b$  باشد، آنگاه موجی انعکاسی به ارتفاع  $H_r$  تولید می‌شود که اگر حجم آب جابجا شده برابر با سطح زیر منحنی قله موج در نظر گرفته شود، می‌توان به معادله (۳۴) رسید. در این معادله  $s$  و  $b$  قابل اندازه‌گیری می‌باشد و جز معلومات مسئله می‌باشد. اما  $H_r$  و  $k_r$  مجهول مسئله می‌باشد. برای حل این دو مجهول از رابطه کمکی پراکنش (رابطه (۳۵)) می‌توان استفاده نمود [29].

$$sb = \int_0^{L/2} \left( \frac{H_r}{2} \right) \sin k_r x dx = \frac{H_r}{k_r} \quad (34)$$

$$\omega^2 = kg \tanh kh \quad (35)$$



شکل ۶ مدل ایجاد موج انعکاسی در ستون نوسانی و پارامترهای آن

با توجه به شکل، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسور سطح‌سنج با تغییر ارتفاع به‌دست آمده توسط شاخص (خط‌کش) مقایسه شده است و ضریب کالیبراسیون ۱/۱۱ برای سنسور سطح‌سنج به‌دست آمد. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات سطح در مجاورت شاخص، از یک دوربین فیلم‌برداری نیز استفاده شده است. کالیبراسیون سرعت‌سنج نیز توسط یک تونل باد انجام شده است که بر اساس کالیبراسیون صورت گرفته ضریب ۱/۱۲۵ کالیبراسیون نیز برای سرعت‌سنج به‌دست آمده است، به‌منظور اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی از اوریفیس نیز سرعت سنج در مرکز اوریفیس قرار داده شده است و با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و با کمک روابط کلاسیک مکانیک سیالات دبی هوای عبوری از اوریفیس را می‌توان با ضرب سرعت در مساحت سطح اوریفیس به‌دست آورد.

با توجه به حجم بالای داده‌های مربوط به آنالیز عدم قطعیت، در این قسمت تنها به ارائه داده‌های مربوط به آزمایش میزان نوسانات سطح آزاد و سرعت برای یک عمق آب‌خور و یک فرکانس اکتفا می‌شود. برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها می‌توان از روابط ۱۹ الی ۲۲ استفاده نمود.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (19)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (20)$$

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

$$U = ku \quad (22)$$

#### ۴- مطالعه تحلیلی

##### ۴-۱- تحلیل سیستم از دیدگاه هیدرودینامیکی

با داشتن مشخصه‌های موج ورودی می‌توان انرژی موج را محاسبه نمود و در ادامه برای تحلیل ستون نوسانی آب از معادلات لاپلاس بر مبنای تابع پتانسیل استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی در ابتدا معادله سطح آزاد آب درون ستون نوسانی، با فرض تراکم‌ناپذیری هوا و تئوری پیستون صلب، به‌صورت معادله زیر نوشته می‌شود [27]:

$$\eta_1 = \frac{H_1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (23)$$

$$V_1 = \frac{d\eta_1}{dt} = \frac{\omega H_1}{2} \cos(\omega t) \quad (24)$$

$\eta_1$  معادله سطح آزاد آب درون محفظه و  $V_1$  سرعت سطح آزاد درون محفظه می‌باشد، از طرف دیگر با کمک معادله پیوستگی می‌توان سرعت در ورودی اوریفیس را محاسبه نمود [27]:

$$Q = A_2 V_2 = A_1 V_1 \quad (25)$$

$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = \frac{A_1 \omega H_1}{A_2} \cos(\omega t) \quad (26)$$

در رابطه‌های مذکور،  $Q$  معرف دبی سیال می‌باشد. همچنین به‌منظور محاسبه‌ی توان خروجی از سیستم، باید فشار در خروجی سامانه به‌دست آید، فشار خروجی از ستون نوسانی را می‌توان با

## ۴- نتایج و بحث

در جدول ۳ نمونه‌ای از نتایج آنالیز عدم قطعیت با در نظر گرفتن ضریب کالیبراسیون نشان داده شده است؛ همان‌طور که مشخص است، میزان عدم قطعیت سنسورها دارای مقادیر قابل قبولی می‌باشد.

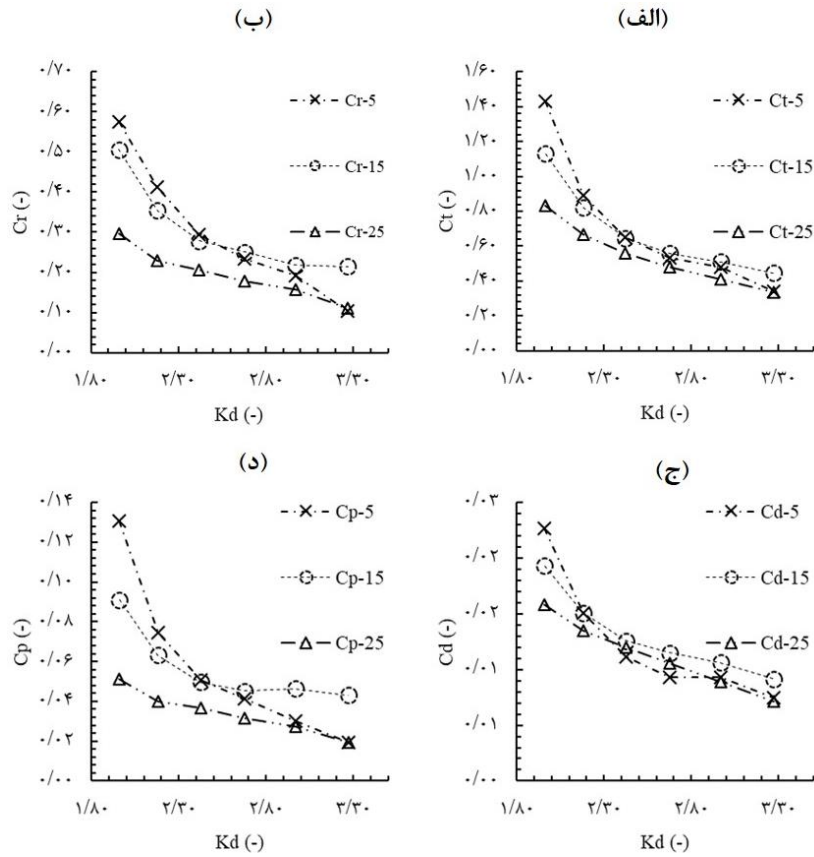
در شکل ۷ نمودار تغییرات ضرایب بی‌بعد انتقال موج، انعکاس موج، تخلیه و فشار با عدد موج بی‌بعد نشان داده شده است. همان‌طور که نمودار (الف) شکل ۷ مشخص است افزایش عدد موج بی‌بعد منجر به کاهش ضریب بی‌بعد انتقال موج می‌گردد. افزایش عدد موج بی‌بعد یعنی موجی با طول موج کوتاه‌تر و در نتیجه موج دارای انرژی کمتری می‌باشد، که این موضوع باعث می‌شود تا میزان دامنه نوسانات در داخل سامانه کمتر گردد و در نتیجه ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته با افزایش عدد بی‌بعد موج کاهش یابد. در نمودار (ب) شکل ۷ اثر عدد موج بی‌بعد بر عدد بی‌بعد موج انعکاس یافته نشان داده شده است؛ همان‌طور که از این نمودار مشخص است افزایش عدد بی‌بعد موج منجر به کاهش موج انعکاس یافته می‌گردد، زیرا با افزایش عدد بی‌بعد موج،  $\Delta P$  درون ستون نوسانی کاهش می‌یابد و کاهش دامنه اختلاف فشار باعث می‌شود تا موج انعکاسی ضعیف‌تری تولید گردد. یکی از نکات حائز اهمیت این است که در عمق آبخور ۵ سانتی‌متر افزایش عدد بی‌بعد موج منجر به کاهش ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته، موج انعکاس یافته، ضریب تخلیه و ضریب فشار با شیب بیشتری می‌شود، در عمق آبخور ۵ سانتی‌متر هوای بیشتری در محفظه ستون نوسانی آب به دام افتاده است و این بالاتر بودن میزان هوا می‌تواند منجر به حساسیت بیشتر سیستم به عدد بی‌بعد موج برخوردی می‌شود. تغییرات ضریب تخلیه محور توان دهی با عدد بی‌بعد موج نیز در نمودار (ج) شکل ۷ نشان داده شده است؛ همان‌طور که از نمودار مشخص است افزایش عدد بی‌بعد موج منجر به کاهش ضریب تخلیه سامانه می‌گردد چرا که با افزایش عدد بی‌بعد موج انرژی منتقل شده به ستون نوسانی کاهش می‌یابد و در نتیجه از دبی هوای عبوری از اوریفیس کاسته می‌شد و ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. همچنین در نمودار (د) شکل ۷ نشان داده شده است که افزایش عدد بی‌بعد موج منجر به کاهش ضریب بی‌بعد فشار نیز می‌گردد؛ افزایش عدد بی‌بعد موج دامنه

نوسانات فشار درون سامانه را کاهش می‌دهد و این کاهش دامنه نوسانات منجر به کاهش ضریب بی‌بعد فشار در سامانه می‌گردد. در شکل ۸ در یک نسبت عمق آبخور به عمق آب ثابت، فرکانس بی‌بعد موج برخوردی تغییر داده شده است و اثر این تغییرات بر ضرایب بی‌بعد حاکم بر رفتار هیدرودینامیکی سامانه مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است در یک عمق آبخور بی‌بعد ثابت، افزایش فرکانس بی‌بعد موج برخوردی منجر به افزایش ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته می‌شود (نمودار (الف) شکل ۸). افزایش فرکانس بی‌بعد موج برخوردی منجر به این می‌شود که موج برخوردی بهتر به داخل ستون نوسانی منتقل شود و این موضوع باعث افزایش ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته می‌شود. در ادامه نیز اثر فرکانس بی‌بعد موج برخوردی بر ضریب بی‌بعد موج انعکاس یافته نشان داده شده است (نمودار (ب) شکل ۸)؛ همان‌طور که از نمودار مشخص است در فرکانس‌های بی‌بعد، افزایش عمق آبخور منجر به کاهش موج انعکاس یافته توسط سامانه می‌گردد، اما در فرکانس بی‌بعد  $0.108$  و عمق آبخور بی‌بعد ضریب موج انعکاس یافته به جای کاهش، افزایش می‌یابد، زیرا در آن عمق آبخور، فرکانس بی‌بعد با فرکانس طبیعی ستون نوسانی برابر خواهد شد و به همین دلیل دامنه نوسانات آب در درون ستون نوسانی افزایش می‌یابد، افزایش دامنه نوسانات نیز منجر به افزایش دامنه نوسانات فشار بر سطح آزاد آب درون سامانه می‌گردد که این موضوع باعث ایجاد یک موج انعکاسی با ارتفاع بیشتر می‌شود، فلذا می‌توان گفت که در این شرایط ضرایب موج انتقال یافته، موج انعکاس یافته، تخلیه و فشار افزایش می‌یابند. از طرف دیگر اثر افزایش فرکانس بی‌بعد موج برخوردی در عمق آبخور بی‌بعد ثابت بر ضریب تخلیه نشان داده شده است (نمودار (ج) شکل ۸). افزایش فرکانس بی‌بعد در یک عمق آبخور بی‌بعد منجر به افزایش ضریب تخلیه می‌شود چرا که افزایش فرکانس بی‌بعد منجر به افزایش دبی خروجی از ستون نوسانی می‌شود و در نتیجه ضریب تخلیه نیز افزایش می‌یابد. ضریب فشار بی‌بعد با فرکانس موج برخوردی بی‌بعد و عمق آبخور نیز در نمودار (د) شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است افزایش فرکانس بی‌بعد باعث افزایش ضریب فشار بی‌بعد می‌شود.

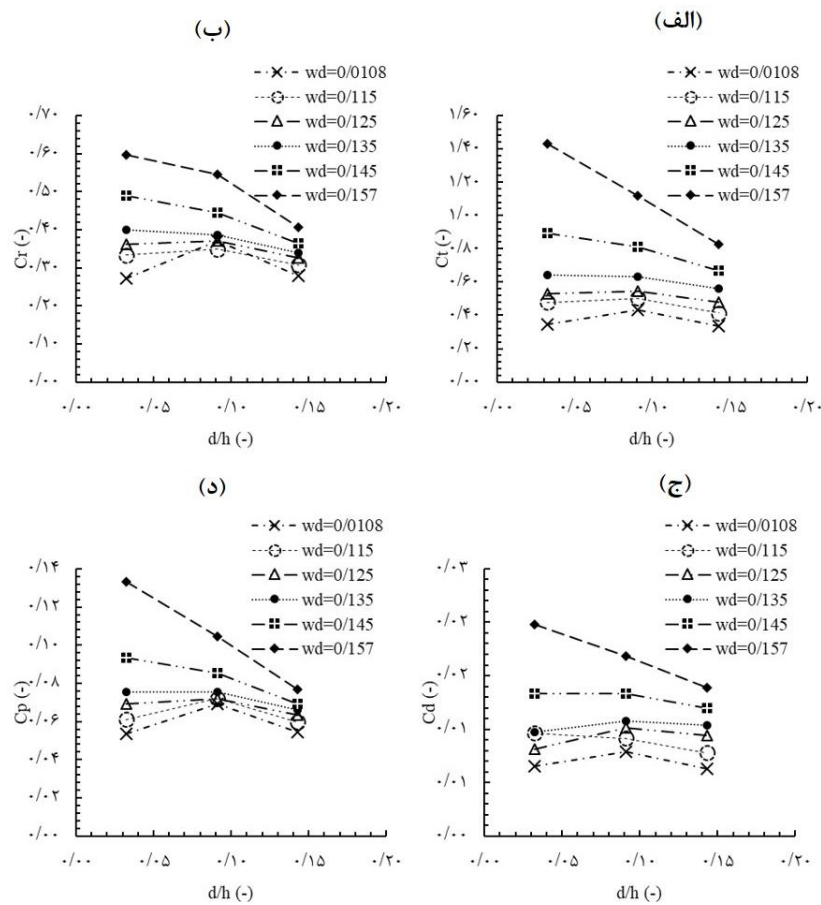
جدول ۳) آنالیز عدم قطعیت

مقدار	۱	۲	۳	۴	۵	انحراف استاندارد	عدم قطعیت میانگین	عدم قطعیت با فاکتور همپوشانی
نوسانات سطح آزاد در داخل ستون نوسانی برای عمق آبخور ۵ سانتی‌متر دور ۳۲ دور بر دقیقه [m]	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۵۴۷۷	۰/۰۹۴	۰/۰۰۴۸۹۹
نوسانات سطح آزاد در استخر موج برای عمق آبخور ۵ سانتی‌متر دور ۳۲ دور بر دقیقه [m]	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸۹۴۴	۰/۰۶۶	۰/۰۰۷۵۷۸
سرعت خروجی از اوریفیس [m/s]	۲/۱۶	۲/۱۳	۲/۱۰	۲/۱۶	۲/۱۶	۰/۰۲۶۸۳	۲/۱۴	۰/۰۲۳۹۹

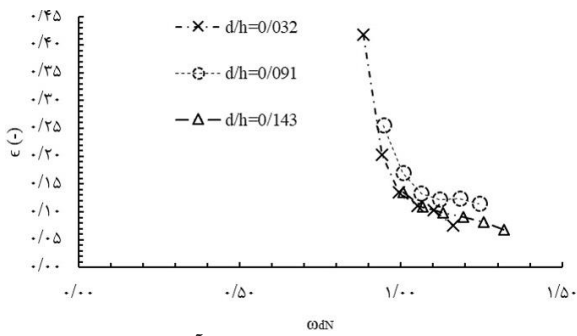




شکل ۷) نمودار تغییرات ضرایب بی‌بعد انتقال موج، انعکاس موج، تخلیه و فشار با  $Kd$



شکل ۸) نمودار تغییرات ضرایب بی‌بعد انتقال موج، انعکاس موج، تخلیه و فشار با فرکانس بی‌بعد



شکل ۹) نمودار تغییرات بازدهی ستون نوسانی آب با  $\omega_{dN}$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی میزان اثرگذاری ضرایب بی‌بعد حاکم بر عملکرد هیدرودینامیکی یک مبدل ستون نوسانی آب چندمخفظه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی ۱:۱۰ با توجه به شرایط امواج آب دریای مازندران مورد بررسی تجربی و آنالیز ابعادی قرار گرفت. به‌منظور انجام آنالیز ابعادی در ابتدا پارامترهای اثر گذار بر رفتار هیدرودینامیکی ستون نوسانی آب استخراج شده است. سپس با استفاده از تئوری پی-باکینگهام ضرایب بی‌بعد و پارامترهای بی‌بعد استخراج شده است، ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته، ضریب بی‌بعد موج انعکاس یافته، ضریب بی‌بعد تخلیه، ضریب بی‌بعد فشار ضرایب بی‌بعد اثر گذار بر رفتار هیدرودینامیکی سامانه می‌باشند. اما یکی از اعداد مهم در بررسی میزان کارایی ستون نوسانی آب بازدهی آن می‌باشد، در ادامه اثر پارامتر بی‌بعد فرکانس موج برخوردی به فرکانس طبیعی ستون نوسانی بر بازدهی سامانه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع می‌توان گفت که نتایج عمده زیر به دست آمدند:

- در این تحقیق مشخص شد که افزایش عدد موج بی‌بعد منجر به کاهش ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته، ضریب بی‌بعد موج انعکاس یافته، ضریب بی‌بعد تخلیه و ضریب بی‌بعد فشار می‌شود. ولی هرچقدر عمق آب‌خور کمتر باشد میزان شدت تغییرات بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر می‌توان گفت که سیستم در اعداد بی‌بعد موج بالا حساسیت کمتری نسبت به عمق آب‌خور دارد و رفتار سامانه در هر سه عمق آب‌خور به یکدیگر نزدیک است.

- اگر سیستم در یک عمق آب‌خور بی‌بعد ثابت در نظر گرفته شود، آنگاه با افزایش فرکانس بی‌بعد موج برخوردی ضرایب بی‌بعد انتقال یافته، ضریب بی‌بعد موج انعکاس یافته، ضریب بی‌بعد تخلیه و ضریب بی‌بعد فشار افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داده است که در فرکانس بی‌بعد موج برخوردی پایین و در عمق آب‌خور ۰/۰۹۱ سیستم دارای ضریب فشار بالاتری در مقایسه با دیگر اعماق آب‌خور هست.

- رفتار هیدرودینامیکی ستون نوسانی نشان می‌دهد که اگر فرکانس طبیعی بی‌بعد موج برخوردی از اعداد کمتر از یک به عدد یک میل کند، در محدوده فرکانس طبیعی سامانه بازدهی حداکثر خواهد شد. البته هرچقدر عمق آب‌خور بیشتر شود، نقطه‌ی حداکثر

اما نکته مهم دیگری که در کل نمودار ۸ نشان داده شده است این است که افزایش عمق آب‌خور بی‌بعد باعث می‌شود تا ضرایب هیدرودینامیکی بی‌بعد سامانه برای هر چهار عدد بی‌بعد بسیار بهم نزدیک می‌شود، زیرا در عمق آب‌خور بی‌بعد بالا هوای کمتری در داخل سامانه قرار می‌گیرد و چون میزان هوای به دام افتاده کمتر است، لذا می‌توان گفت سیستم در حالت پایدارتری قرار می‌گیرد و نسبت به عوامل خارجی حساسیت کمتری دارد.

در شکل ۹ اثرات فرکانس بی‌بعد طبیعی بر بازدهی ستون نوسانی آب نشان داده شده است، اگر فرکانس موج برخوردی با فرکانس طبیعی سامانه برابر باشد، سامانه در حالتی قرار می‌گیرد که تمایل دارد تا تمام انرژی موج برخوردی را دریافت کند و در نتیجه بازدهی آن افزایش می‌یابد، البته ذکر این نکته نیز خالی از لطف نیست که در فرکانس طبیعی بی‌بعد، ممکن است پدیده‌ای به نام اسلاشینگ رخ دهد که این پدیده باعث کاهش بازدهی ستون نوسانی می‌شود. لذا همان‌طور که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است، حداکثر بازدهی لزوماً در همان فرکانس طبیعی رخ نمی‌دهد و در فرکانسی پایین‌تر ولی نزدیک به فرکانس طبیعی اتفاق می‌افتد، بیشینه بازدهی در این شرایط ۴۱/۸٪ می‌باشد و می‌توان در مرجع [30] مشاهده نمود که بازدهی معمول ستون‌های نوسانی در دریا‌های آزاد ۶۰ درصد می‌باشد، این کمتر بودن بازدهی می‌تواند هم ناشی از انرژی کمتر دریای مازندران در مقایسه با دریا‌های آزاد نشئت بگیرد. از طرف دیگر می‌توان مشاهده کرد که در عمق آب‌خور بی‌بعد ۰/۰۳۲ حداکثر بازدهی در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی رخ می‌دهد، اما مقدار آن به از دو عمق آب‌خور بی‌بعد دیگر بیشتر است، زیرا در هنگامی که عمق آب‌خور کمتر هست میزان اینرسی آب موجود در سامانه کمتر است و در فرکانس طبیعی راحت‌تر می‌تواند داخل ستون نوسانی حرکت کند و در نتیجه توان بیشتری تولید نماید، اما با افزایش عمق آب‌خور میزان آب موجود در سیستم بیشتر می‌شود و در نتیجه انرژی بیشتری برای به حرکت در آوردن آب در سامانه نیاز هست، که این موضوع باعث می‌شود تا در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم در عمق آب‌خور کمتر دارای بازدهی بیشتر باشد. در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس طبیعی بازدهی ستون نوسانی آب در هر سه عمق آب‌خور به همدیگر نزدیک می‌شود و می‌توان گفت که بازدهی سامانه در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی می‌تواند بسیار افزایش یابد اما در فرکانس‌های دیگر عمق آب‌خور و فرکانس موج برخوردی تأثیر کمتری بر بازدهی سامانه دارد. همچنین با برازش منحنی شکل ۹ می‌توان به رابطه‌ی تجربی زیر دست یافت.

$$\begin{aligned} \epsilon \left( \frac{d}{h}, \omega_{dN} \right) = & 2.91 + 2.345 \frac{d}{h} - 4.857 \omega_{dN} \\ & - 11.88 \left( \frac{d}{h} \right)^2 \\ & - 0.2054 \left( \frac{d}{h} \right) (\omega_{dN}) + 2.039 \omega_{dN}^2 \end{aligned} \quad (36)$$

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.  
**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.  
**تعارض منافع:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.  
**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.  
**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

### منابع

- López I, Andreu J, Ceballos S, De Alegría IM, Kortabarria I. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renewable and sustainable energy reviews. 2013;27:413-34.
- Falcão AF, Henriques JC, Gato LM, Gomes RP. Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter. Ocean engineering. 2014;75:148-56.
- Suroso A. Hydraulic model test of wave energy conversion. Jurnal Mekanikal. 2005;19:84-94.
- Morris-Thomas MT, Irvin RJ, Thiagarajan KP. An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. 2007; 273-278.
- Ram K, Faizal M, Ahmed MR, Lee YH. Experimental studies on the flow characteristics in an oscillating water column device. Journal of Mechanical Science and Technology. 2010;24(10):2043-50.
- Dizadji N, Sajadian SE. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. Energy. 2011;36(5):2360-6.
- Patel SK, Ram K, Ahmed MR. Effect of turbine section orientation on the performance characteristics of an oscillating water column device. Experimental thermal and fluid science. 2013;44:642
- Fairhurst J. Modelling and design of an oscillating wave energy converter (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University). 2015.
- Dorrell DG, Kazi S, Papadopoulos M. Wave generator modelling using an oscillating water column and a wells turbine. In third IASTED international conference on power and energy systems 2003;3-5.
- Iturrioz A, Guancho R, Armesto JA, Alves MA, Vidal C, Losada IJ. Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device. Ocean Engineering. 2014;76:65-74.
- He F, Li M, Huang Z. An experimental study of pile-supported OWC-type breakwaters: energy extraction and vortex-induced energy loss. Energies. 2016;9(7):540.
- Shalby M, Walker P, Dorrell DG. Modelling of the multi-chamber oscillating water column in regular waves at model scale. Energy Procedia. 2017;136:316-22.
- Shalby M, Elhanafi A, Walker P, Dorrell DG. CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device. Applied Ocean Research. 2019;88:37-47.
- Çelik A, Altunkaynak A. Experimental investigations on the performance of a fixed-oscillating water column type wave energy converter. Energy. 2019;188:116071.
- Ashlin SJ, Sannasiraj SA, Sundar V, Kamath A, Bihs H. Effects of Power Take-Off Damping and Model Scaling on the Hydrodynamic Performance of Oscillating Water

بازدهی به فرکانس طبیعی متمایل می‌گردد. اما در عمل ممکن است طی آزمایشات تجربی حداکثر بازدهی لزوماً در فرکانس طبیعی رخ نمی‌دهد، زیرا در فرکانس طبیعی ممکن است سیستم دچار پدیده‌ای به نام اسلاشینگ شود.

• سیستم ساخته شده در این تحقیق در بهترین حالت دارای بازدهی ۴۱/۸٪ می‌باشد. این بازدهی در فرکانس بی‌بعد طبیعی ۸۸/۵ و عمق آب‌خور بی‌بعد ۰/۰۳۲ رخ می‌دهد. در این شرایط دامنه نوسانات آب در درون ستون نوسانی به ۹/۶ سانتی‌متر هم می‌رسد. در آینده نیز می‌توان به بررسی پارامترهای هندسی برای بهبود عملکرد سیستم پرداخت. همچنین بررسی رفتار هیدرودینامیکی سامانه و پروفیل سطح آزاد آن در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی می‌تواند به شناخت بهتر رفتار سامانه کمک نماید.

### فهرست علائم

$C_d$	ضریب بی‌بعد تخلیه (-)
$C_g$	سرعت گروهی موج (متر بر ثانیه)
$C_{PTO}$	ضریب دمپینگ محور توان‌دهی (پاسکال مجذور ثانیه بر مجذور کیلوگرم)
$C_t$	ضریب بی‌بعد موج انتقال یافته (-)
$C_p$	ضریب بی‌بعد موج فشار (-)
$C_r$	ضریب بی‌بعد موج بازتاب شده (-)
$D$	قطر اوریفیس (متر)
$d$	عمق آب‌خور (متر)
$g$	شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه)
$H_i$	ارتفاع موج برخوردی (متر)
$H_r$	ارتفاع موج بازتاب شده (متر)
$H_t$	ارتفاع موج انتقال یافته (متر)
$h$	عمق آب (متر)
$k$	عدد موج (رادیان بر متر)
$K_d$	عدد بی‌بعد موج (-)
$p$	فشار (پاسکال)
$P_t$	توان خروجی (وات)
$Q$	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
$u$	عدم قطعیت (متر)
$V$	سرعت (متر بر ثانیه)
$W_{OWC}$	توان قابل استحصال از میدل (وات)
$W_w$	توان موج برخوردی (وات)
$\eta$	نوسانات سطح آزاد آب (متر)
$\phi$	پتانسیل (متر مربع بر ثانیه)
$\rho$	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
$\omega_{dn}$	فرکانس بی‌بعد تشدید (-)
$\omega_N$	فرکانس طبیعی (هرتز)
$\omega$	فرکانس موج برخوردی (هرتز)

- International Journal of Maritime Technology. 2020;14:1-2.
- 24-Connell KO, Thiebaut F, Kelly G, Cashman A. Development of a free heaving OWC model with non-linear PTO interaction. *Renewable Energy*. 2018;117:108-15.
- 25-Filianoti P, Camporeale SM. A linearized model for estimating the performance of submerged resonant wave energy converters. *Renewable Energy*. 2008;33(4):631-41.
- 26-Rezanejad K, Soares CG, López I, Carballo R. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter. *Renewable Energy*. 2017;106:1-6.
- 27-Shalby M, Walker P, Dorrell DG. The investigation of a segment multi-chamber oscillating water column in physical scale model. In 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2016 (pp. 183-188). IEEE.
- 28-Roy S, Saha UK. Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*. 2015;137:117-25.
- 29-Dean RG, Dalrymple RA. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Company; 1991.
- 30-Heath TV. A review of oscillating water columns. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012;370(1959):235-45.
- Column Device. In Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018) 2019 (pp. 807-821). Springer, Singapore.
- 16-Rusu E, Onea F. Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea. *Energy*. 2013;50:1-4.
- 17-Nejad MF, Shariati O, Zin AA. Feasibility study of wave energy potential in southern coasts of Caspian Sea in Iran. In 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) 2013 (pp. 57-60). IEEE.
- 18-Hadadpour S, Etemad-Shahidi A, Jabbari E, Kamranzad B. Wave energy and hot spots in Anzali port. *Energy*. 2014;74:529-36.
- 19-Alamian R, Shafaghat R, Miri SJ, Yazdanshenas N, Shakeri M. Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014;32:468-76.
- 20-Alamian R, Shafaghat R, Hosseini SS, Zainali A. Wave energy potential along the southern coast of the Caspian Sea. *International journal of marine energy*. 2017;19:221-34.
- 21-EMEC [Internet]. Available from: <http://www.emec.org.uk/standards/>.
- 22-Yazdi H, Shafaghat R, Alamian R. Experimental assessment of a fixed on-shore oscillating water column device: Case study on oman sea. *International Journal of Engineering*. 2020;33(3):494-504.
- 23-Alizadeh Kharkeshi B, Shafaghat R, Alamian R, Aghajani Afghan AH. Experimental & Analytical Hydrodynamic Behavior Investigation of an Onshore OWC-WEC Imposed to Caspian Sea Wave Conditions.