



Experimental Study on The Effect of Water Depth and Incident Wave Frequency on The Performance of a OWSC Imposed to Caspian Sea Wave Conditions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sadripour Gh.¹,
Shafaghat R.^{1*},
Alizadeh Kharkeshi B.¹,
Sadeghi Chemazketi S.¹

How to cite this article

Sadripour Gh, Shafaghat R, Alizadeh Kharkeshi B, Sadeghi Chemazketi S. Experimental Study on The Effect of Water Depth and Incident Wave Frequency on The Performance of a OWSC Imposed to Caspian Sea Wave Conditions. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(09):603-613.

¹ Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

*Correspondence

Address: Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

rshafaghat@nit.ac.ir

Article History

Received: April 19, 2022
Accepted: May 26, 2022
ePublished: August 21, 2022

ABSTRACT

Flap-type wave energy converters (OWSCs) are used near the coast to generate electricity and pump water. The draft depth and incident wave frequency are parameters affecting the performance of this type of converter. In this paper, the effect of water draft depth and incident wave frequency on the performance of a converter at a scale of 1: 8 has been investigated experimentally. The power take-off system (PTO) is hydraulic. The Caspian Sea was also selected as the target sea. After calibration of equipment and uncertainty analysis, experimental tests were performed in the wave flume of Babol Noshirvani University of Technology by considering regular waves. Considering the predominant period of the waves of the Caspian Sea [4-8] seconds, after Froud scaling, the tests were performed in the period interval of [1.6-2.5] seconds, which is equivalent to the frequency interval [0.4-0.63] Hz. Also, due to the importance of the converter's draft depth, the converter's performance was evaluated from the draft depth of -0.1 (submerged flap) to 0.6 m. According to the results, the best converter performance was at the lowest frequency; the converter performance decreased with increasing frequency. The best converter performance was obtained at the dimensionless draft depth of 0.43 (equivalent to 0.4 m draft depth), and the converter power was reduced at larger and smaller draft depths. It is worth noting that at a negative draft depth (submerged flap), the converter has the lowest performance. The maximum values of flow, power, and pressure on a laboratory scale were 0.14 liters per second, 21.3 watts, and 156.8 kPa, respectively, which were measured at 18 liters per second, 22.66 kW, respectively, using Froud scaling method and will be 1249/61 kPa.

Keywords Wave Energy, Flap Type Converter, PTO, Experimental Study, Performance

CITATION LINKS

[1] The hydrodynamics of small seabed mounted bottom hinged wave energy converters in shallow water. [2] Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster. [3] The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter. [4] The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves. [5] Experimental Study on the Dynamics of A Bottom-hinged Oscillating Wave Surge Converter. [6] Hydrodynamic performance of an oscillating wave surge converter in regular and irregular waves: an experimental study. [7] Experimental investigations on wave energy capture of two bottom-hinged-flap WECs operating in tandem. [8] A conceptual model of the hydrodynamics of an oscillating wave surge converter. [9] Experimental investigation on the power capture of an oscillating wave surge converter in unidirectional waves. [10] A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints. [11] Annual performance of the second-generation variable-geometry oscillating surge wave energy converter. [12] Performance Modeling of a Variable-Geometry Oscillating Surge Wave Energy Converter on a Raised Foundation. [13] Comparative study of oscillating surge wave energy converter performance: A case study for southern coasts of the Caspian Sea. [14] A self-floating oscillating surge wave energy converter. [15] Wave energy potential along the southern coast of the Caspian Sea. [16] Experimental evaluation of the effect of dimensionless hydrodynamic coefficients on the performance of a multi-chamber oscillating water column converter in laboratory scale. [17] Experimental study on the performance of an oscillating water column by considering the interaction effects of... [18] Experimental & Analytical Hydrodynamic Behavior Investigation of an Onshore OWC-WEC Imposed... [19] Experimental Evaluation of the Effect of Incident Wave Frequency on the Performance of...

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر عمق آب و فرکانس موج برخوردی بر عملکرد یک مبدل صفحه‌ای (OWSC) تحت شرایط امواج دریای مازندران

غزاله صدیقی پور^۱، روزبه شفق^{۱*}، بهراد علی‌زاده خارکشی^۱، سینا صادقی چمازکنی^۱

^۱ گروه پژوهشی انرژی‌های دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

مبدل‌های انرژی موج صفحه‌ای در مناطق نزدیک ساحل برای تولید برق و پمپاژ آب استفاده می‌شوند. عمق آب‌خور و فرکانس موج برخوردی، پارامترهایی تاثیرگذار بر عملکرد این دسته از مبدل‌ها می‌باشند. در این مقاله، اثر عمق آب‌خور و فرکانس موج برخوردی بر عملکرد یک مبدل در مقیاس ۱:۸ به صورت تجربی بررسی شده است. سامانه‌ی انتقال توان مبدل (PTO) هیدرولیکی می‌باشد. همچنین دریای مازندران به عنوان دریای هدف انتخاب شد. پس از کالیبراسیون تجهیزات و آنالیز عدم قطعیت، آزمون‌های تجربی در استخر موج دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و تحت اثر امواج منظم انجام شدند. با توجه به پیروید غالب امواج دریای مازندران (۸-۱۴ ثانیه)، پس از مقیاس‌بندی فرود، آزمون‌ها در بازه‌ی پیروید [۲/۵-۱/۶] ثانیه انجام شدند که معادل بازه‌ی فرکانسی [۰/۶۳-۰/۴] هرتز می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت عمق آب‌خور مبدل، عملکرد مبدل از عمق آب‌خور ۰/۱- (فلپ مغروق) تا ۰/۶ متر بررسی شد. با توجه به نتایج، در همه‌ی عمق آب‌خورها، بهترین عملکرد مبدل در پایین‌ترین فرکانس بوده، با افزایش فرکانس عملکرد مبدل کاهش یافته است. بهترین عملکرد مبدل در عمق آب‌خور بی‌بعد ۰/۴۳ (معادل با عمق آب‌خور ۰/۴ متر) به دست آمد و در عمق آب‌خورهای بزرگ‌تر و کوچک‌تر توان مبدل کاهش یافت. شایان ذکر است که در عمق آب‌خور منفی (فلپ مغروق)، مبدل پایین‌ترین عملکرد را دارد. مقادیر پیشینه‌ی دبی، توان و فشار در مقیاس آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه، ۲۱/۳ وات و ۱۵۶/۸ کیلوپاسکال به دست آمد که با استفاده از مقیاس‌بندی فرود در مقیاس واقعی، به ترتیب ۲۴/۶ لیتر بر ثانیه، ۳۰/۹ کیلووات و ۱۲۵۴/۵ کیلوپاسکال خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: انرژی امواج، مبدل صفحه‌ای، سامانه‌ی انتقال توان مبدل، مطالعه تجربی، عملکرد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵

* نویسنده مسئول: rshafaghat@nit.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با توجه به نرخ بالای افزایش جمعیت و پیشرفت صنعت، استفاده از منابع سوخت‌های فسیلی افزایش پیدا کرده است؛ افزایش به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی ضمن ایجاد نگرانی در رابطه با کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، معضلاتی را نیز در پی دارد که از آن جمله می‌توان به افزایش کربن دی‌اکسید در جو، گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی اشاره کرد. لذا توسعه فناوری‌هایی که قادر به تولید انرژی اقتصادی و پاک از منابع انرژی

تجدیدپذیر هستند، جزء اهداف اصلی جوامع صنعتی مدرن درآمده‌اند. از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان به انرژی امواج، انرژی خورشید، انرژی باد، انرژی برق-آبی و انرژی زمین‌گرمایی اشاره نمود که در این میان انرژی امواج دریا در مقایسه با منابع انرژی دیگر، از چگالی انرژی بالاتری برخوردار است. منابع انرژی موج جهانی بیش از ۱ تراوات تخمین زده شده است^[1].

مبدل‌های انرژی موج در طراحی‌ها و اندازه‌های متنوعی ارائه شده‌اند که از طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های تبدیل انرژی استفاده می‌کنند. مبدل انرژی موج صفحه‌ای از انواع مبدل‌های انرژی موج می‌باشد که به دلیل نوسان در راستای سرج دارای راندمان تئوری بیشتری نسبت به مبدل‌هایی است که در راستای هیو نوسان می‌کنند که این خود دلیلی بر مورد توجه قرار گرفتن این دسته از مبدل‌های انرژی موج است^[1]. مبدل‌های انرژی موج صفحه‌ای برای مناطق نزدیک ساحل یعنی عمق آب بین ۱۰ تا ۲۰ متر طراحی می‌شوند^[2]. زنجیره‌ی تبدیل انرژی در این مبدل‌ها دارای سه مرحله است؛ در مرحله نخست، فلپ تحت تاثیر نیروی موج قرار گرفته، در اثر حرکت نوسانی فلپ، انرژی موج به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود؛ در مرحله دوم، انرژی مکانیکی توسط سامانه‌ی انتقال توان به انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در سیال تبدیل می‌شود و در مرحله سوم، به‌منظور تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی، سیال با فشار بالا سبب به حرکت درآوردن توربین و یا هیدروموتور می‌گردد^[2]. البته در برخی کاربردها، از این مبدل‌ها تنها برای پمپاژ آب دریا استفاده می‌گردد.

عملکرد مبدل‌های صفحه‌ای را می‌توان با روش‌های گوناگون تئوری (تحلیلی و عددی) و تجربی مورد بررسی قرار داد که با توجه پیچیدگی‌های موجود، در بسیاری از موارد انجام آزمایشات بر روی مدل فیزیکی برای بررسی عملکرد مبدل‌های صفحه‌ای حائز اهمیت می‌باشد. فولی و همکاران^[3] در سال ۲۰۰۷ به بررسی تجربی تاثیر عمق آب بر عملکرد یک مدل ۱:۴۰ از مبدل انرژی موج صفحه‌ای پرداختند؛ آن‌ها با توجه به شرایط امواج دریا، پیروید موج را از ۷ تا ۱۶ ثانیه در نظر گرفتند و نتایج را برای عمق آب‌های مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش پیروید موج سبب کاهش عملکرد مبدل و کاهش عمق آب از ۲۲ متر تا ۱۰ متر سبب افزایش عملکرد آن می‌گردد. هنری^[4] در سال ۲۰۰۹ به مطالعه تجربی عملکرد یک مدل ۱:۴۰ از مبدل انرژی موج صفحه‌ای، به‌ازای مشخصات مختلف موج برخوردی پرداخت؛ نتایج نشان داد که بیشترین توان تولیدشده توسط مبدل به میزان ۱۶۷ کیلووات است که در پیروید موج ۱۰ ثانیه و توان موج برخوردی ۴۰ کیلووات بر متر رخ می‌دهد. گومز و همکاران^[4] در سال ۲۰۱۵ به بررسی هیدرودینامیک مبدل‌های انرژی موج صفحه‌ای پرداختند؛ آن‌ها با استفاده از یک مدل خطی، دینامیک و عملکرد مبدل را در شرایط موج منظم توصیف کردند. تجزیه و تحلیل پارامتری آن‌ها برای چندین پیکربندی نشان داد که فلپ‌های مغروق دارای دامنه

میانگین تولید برق را افزایش دهد و اوج بارهای سازه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. کال بورگ و همکاران^[12] در سال ۲۰۲۱ به بررسی عددی جذب توان، بارگذاری‌های ساختاری و هزینه‌های مرتبط با یک مبدل انرژی موج صفحه‌ای از بالا لولا پرداختند؛ این مبدل‌ها دارای هزینه‌های نصب کمتر، بهبود تولید انرژی و انعطاف‌پذیری بیشتر در مقایسه با مبدل‌های از پایین لولا هستند. عرفان امینی و همکاران^[13] در سال ۲۰۲۱ به بررسی عددی عملکرد یک مبدل انرژی موج صفحه‌ای تحت شرایط امواج ساحل جنوبی دریای مازندران پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی ۸ مدل از مبدل انرژی موج صفحه‌ای در ماژول شبیه‌ساز نرم‌افزار متلب، به بررسی توان خروجی مبدل با در نظر گرفتن اثرات تغییر ارتفاع فلپ بر توان خروجی مبدل پرداختند؛ آن‌ها شرایط امواج را مطابق با شرایط امواج در بندر نوشهر، انزلی و امیرآباد در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان خروجی مبدل در سایت نوشهر ۱۶/۷ کیلووات ثبت شده است. لی و همکاران^[14] در سال ۲۰۲۱ یک پیکربندی مفهومی جدیدی برای مبدل‌های انرژی موج صفحه‌ای پیشنهاد کردند. این پیکربندی بصورت خودشناور و شامل دو فلپ عمودی با لولای مشترک و دارای چگالی متوسط برابر با چگالی آب است؛ با عبور موج دو فلپ در جهت مخالف هم نوسان کرده و انرژی توسط سیستم PTO از سرعت نسبی بین دو فلپ استخراج می‌گردد. مطالعات عددی آن‌ها نشان داده است که دستگاه‌های خود شناور دارای پیوند تشدید کوچک‌تر و میرایی بهینه‌تری نسبت به دستگاه‌های از پایین لولا با همان ابعاد می‌باشند. آن‌ها همچنین تاثیر پارامترهای مختلف طراحی مانند ابعاد فلپ، جهت موج برخوردی و عمق آب را برای ارزیابی جامع مفهوم پیشنهادی تحلیل کردند.

بررسی مطالعات انجام شده بر روی مبدل‌های صفحه‌ای نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات با در نظر گرفتن شرایط امواج دریاهای آزاد (پیروید و طول موج بلند) انجام شده‌اند و قابل‌تعمیم و به‌کارگیری برای شرایط امواج با پیروید و طول موج کوتاه نیستند. از طرف دیگر با توجه به تاثیر عمق نصب (عمق آب‌خور) بر عملکرد هیدرودینامیکی مبدل، یکی از نتایج مهم ارائه شده در ادبیات فن، اهمیت فرکانس امواج در تعیین عمق نصب مناسب می‌باشد. لذا در این مقاله یک مبدل انرژی موج صفحه‌ای با مقیاس ۱:۸ تحت اثر بازه وسیعی از شرایط امواج دریای مازندران (با پیروید و طول موج کوتاه‌تر از دریاهای آزاد) در استخر موج مورد بررسی تجربی قرار گرفت. به منظور دستیابی به عمق نصب مناسب، تاثیر عمق آب‌خور بر عملکرد مبدل برای تمامی شرایط امواج دریا بررسی شد. برای ارزیابی بهتر، عمق آب استخر و ارتفاع موج در هر آزمون ثابت در نظر گرفته شد و تاثیر فرکانس‌های مختلف موج (۸ فرکانس غالب دریای مازندران) بر عملکرد سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌ها برای ۸ عمق آب‌خور تکرار شدند. در نهایت برای دستیابی به یک ارزیابی واقع‌بینانه، توان و دبی مبدل در مقیاس

گشتاور تحریک کوچک‌تری نسبت به فلپ‌های نیمه مغروق می‌باشند. لذا فلپ‌های مغروق برای استحصال توانی برابر با فلپ‌های نیمه‌مغروق به دامنه حرکتی بزرگ‌تری نیاز دارند. سو و همکاران^[5] در سال ۲۰۱۶ به مطالعه تجربی دینامیک (دامنه‌ی نوسانات) یک مبدل موج صفحه‌ای و بررسی اثر شرایط موج برخوردی، عمق آب در دو حالت فلپ مغروق و نیمه مغروق پرداختند. نتایج نشان داد که فلپ مغروق برای ایجاد توان یکسان با حالت نیمه مغروق، نیاز به دامنه نوسانات بزرگ‌تری دارد.

نینگ و همکاران^[6] در سال ۲۰۱۷ به بررسی تجربی عملکرد یک مدل ۱:۵ مبدل انرژی موج صفحه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که راندمان مبدل، تحت تاثیر دامنه موج برخوردی است و افزایش دامنه موج برخوردی سبب کاهش عملکرد مبدل می‌گردد. چاو و همکاران^[7] در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که استفاده از دوربین‌های سریع می‌تواند ابزار خوبی برای اندازه‌گیری پاسخ‌های هیدرودینامیکی مبدل صفحه‌ای در مطالعات تجربی باشد. هنری و همکاران^[8] در سال ۲۰۱۸ به ارائه یک مدل مفهومی از هیدرودینامیک مبدل موج صفحه‌ای پرداختند. این مدل مفهومی با نتایج تجربی اعتبارسنجی شد. آن‌ها نشان دادند که در مقایسه با حالتی که مبدل با هدف تنظیم با شرایط موج برخوردی جهت دستیابی به رزونانس و افزایش دامنه حرکتی فلپ طراحی می‌شود، اگر طراحی مبدل با هدف افزایش نیروی موج برخوردی انجام شود، تاثیر بیشتری بر عملکرد مبدل دارد. آن‌ها همچنین تاثیر عمق آب را بررسی نمودند و نشان دادند که عمق آب‌خور منفی (فلپ مغروق) سبب کاهش راندمان مبدل تا ۳۰٪ می‌گردد. بریتو و همکاران^[9] در سال ۲۰۲۰ به بررسی تجربی عملکرد و پاسخ هیدرودینامیکی یک مدل ۱:۱۰ از یک مبدل صفحه‌ای تحت امواج منظم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سامانه‌ی انتقال توان، فرکانس و ارتفاع موج برخوردی تاثیر مهمی بر عملکرد و پاسخ هیدرودینامیکی مبدل دارد. از جمله نتایج آن‌ها می‌توان به کاهش دامنه حرکتی مبدل در اثر افزایش ارتفاع موج برخوردی اشاره کرد. بریتو و همکاران^[10] در سال ۲۰۲۰ یک ابزار شبیه‌سازی عددی برای مبدل‌های انرژی موج صفحه‌ای پیشنهاد دادند که محدودیت‌های مکانیکی سیستم PTO، اتصالات چرخشی و تماس‌های اصطکاکی بین اجزا را در نظر می‌گیرد، سپس نتایج را با داده‌های تجربی اعتبارسنجی کردند؛ مقایسه بین نتایج عددی و تجربی نشان داده است که ابزار شبیه‌سازی عددی پیشنهاد شده، به‌درستی دینامیک مبدل را پیش‌بینی می‌کند. میشل کلی و همکاران^[11] در سال ۲۰۲۱ اولین تجزیه‌وتحلیل بر روی عملکرد سالانه یک مبدل انرژی موج صفحه‌ای جدید همراه با کنترل هندسه را انجام دادند، هدف آن‌ها بررسی چگونگی اثرگذاری کنترل هندسه بر تولید برق سالانه و بارهای ساختاری مانند گشتاور PTO بود. آن‌ها ضرایب هیدرودینامیکی دستگاه را برای شش پیکربندی هندسی محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کنترل هندسه می‌تواند

آزمایشگاهی با استفاده از مقیاس بندی فرود به مقیاس اصلی تعمیم داده شد.

۲- تعریف مسئله

۱-۲- فیزیک مسئله

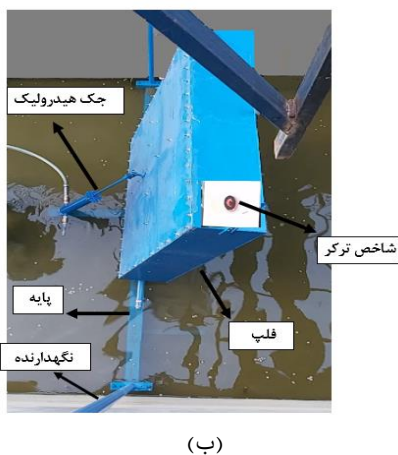
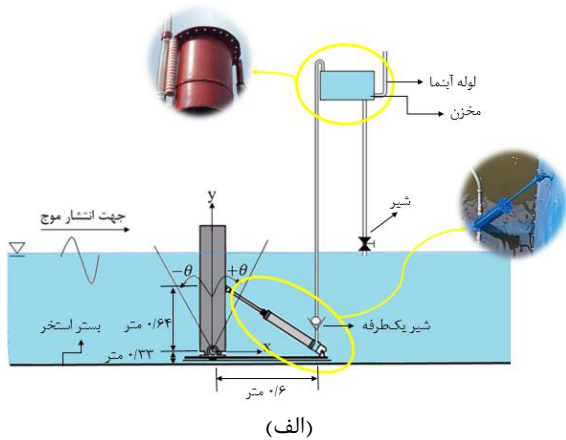
در این مطالعه، یک مبدل انرژی موج از نوع مبدل صفحه ای با سطح مقطع مستطیلی و لولا از پایین مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقیاس مدل مورد بررسی ۱:۸ می باشد و در گروه پژوهشی انرژی های دریای پایه در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل طراحی و ساخته شده است. این مدل شامل یک فلپ شناور به صورت مکعب مستطیل و دارای ابعاد طول ۱/۱ متر، عرض ۱/۲ متر و ضخامت ۰/۲۵ متر می باشد. مبدل بر روی خط مرکزی استخر موج و در فاصله ۱۳ متری از موج ساز قرار داده شد. به منظور اندازه گیری نوسانات سطح آزاد آب، سنسورهای سطح سنج در فواصل ۱/۲ متر و ۲/۴ متر از مبدل تعبیه شدند (شکل های ۱ و ۲).

آزمایش های تجربی برای عمق های مختلف از ۰/۸ الی ۱/۵ متر، فرکانس های موج ۰/۴ الی ۰/۶۳ هرتز و ارتفاع موج ۰/۰۴ الی ۰/۱ متر صورت پذیرفت. مبدل توسط دو یاتاقان بر روی پایه ای در بستر استخر قرار گرفت و برای جلوگیری از جدا شدن پایه از بستر استخر، از دو لوله به عنوان تکیه گاه استفاده شد. فاصله عمودی فلپ تا بستر استخر، ۰/۳۳ سانتی متر است.

سامانه ای انتقال توان از یک مدار هیدرولیکی شامل یک جک هیدرولیکی، چک ولوها، شیلنگ پلاستیکی و یک مخزن آب به قطر ۰/۱۶ متر و ارتفاع ۰/۲۵ متر است. مخزن آب در فاصله ۵/۵ متری از بستر استخر نصب شده است. به منظور مشاهده و بررسی سطح آب درون مخزن آب، یک آب نما در مجاورت مخزن تعبیه شده است (شکل ۳).



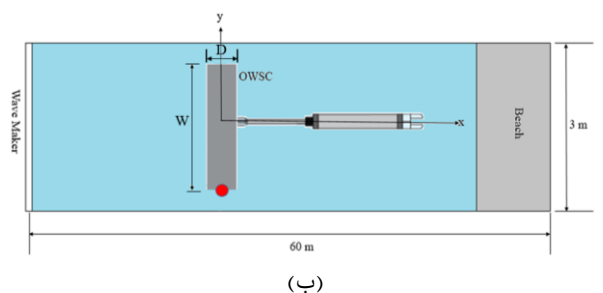
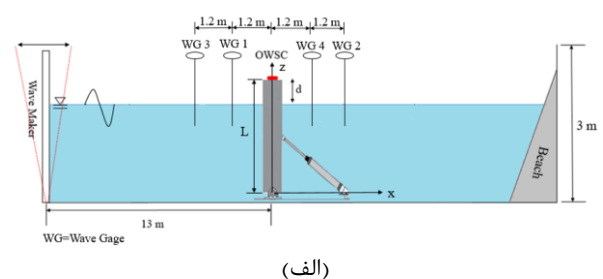
شکل ۲) نماهایی از مبدل انرژی موج صفحه ای ساخته شده در آزمایشگاه با مقیاس ۱:۸



شکل ۳) الف- شماتیک سامانه ای انتقال توان، ب- نمایی از مدل آزمایشگاهی شامل سامانه ای انتقال توان

۲-۲- مقیاس بندی فرود و شرایط امواج

عالمیان و همکاران [15] پتانسیل انرژی امواج را در نقاط گوناگون دریای مازندران مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد که نقاط ساحلی این دریا برای احداث نیروگاه مبدل صفحه ای از پتانسیل انرژی قابل قبولی برخوردار است؛ لذا با توجه به امکان ایجاد زیرساخت ها، ساحل بابلسر در شمال ایران برای نصب نیروگاه در نظر گرفته شد. بر این اساس، پرپود موج بین ۴ تا ۶ ثانیه و



شکل ۴) شماتیک مبدل صفحه ای در استخر موج، الف- نمای جانبی، ب- نمای بالا

مخزن قابل اندازه‌گیری می‌باشد. A_1 سطح مقطع مخزن و A_2 سطح مخزن لوله آبنما است.

به‌منظور محاسبه فشار درون محفظه سیلندر از معادله‌ی تراز انرژی استفاده شده است؛ اختلاف فشار بین محفظه سیلندر و مخزن آب از رابطه ۷ محاسبه شد.

$$\Delta P = \rho g(\Delta z + f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + k \frac{v^2}{2g}) \quad (7)$$

برای افت فشار طولی $f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$ و افت فشار موضعی می‌باشد؛ برای محاسبه افت فشارها در ابتدا باید ضریب اصطکاک محاسبه گردد. برای این منظور نیاز به مشخص شدن رژیم جریان است؛ لذا با استفاده از روابط ۸ و ۹ سرعت آب درون مخزن (v) و سرعت آب درون لوله ورودی به مخزن (v') محاسبه می‌گردد؛ سپس با استفاده از رابطه ۱۰ رژیم جریان تعیین می‌گردد؛ پس از تعیین رژیم جریان، برای جریان آرام از رابطه ۱۱، برای جریان آشفتته از رابطه ۱۲ و برای جریان گذرا از نمودار مودی استفاده می‌گردد. در نهایت افت فشار طولی و افت فشار موضعی (شامل دو عدد زانویی ۹۰ درجه و یک عدد شیر یک‌طرفه) محاسبه شد. با جاگذاری افت فشارها در رابطه ۷ فشار در محفظه سیلندر به‌دست می‌آید.

$$v = \frac{Q}{(A_1 + A_2)} \quad (8)$$

$$v' = \frac{(A_1 + A_2)}{A_3} v \quad (9)$$

$$Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (10)$$

$$f = \frac{64}{Re_d} \quad (11)$$

$$f = 0.316(Re_d^{-1/4}) \quad (12)$$

۳-۳- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی و داده‌برداری

برای انجام آزمون‌های تجربی از استخر موج گروه پژوهشی انرژی‌های دریای پایه در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استفاده شد (شکل ۴). طول، عرض و ارتفاع این استخر به ترتیب ۳۳ متر، ۳ متر و ۳ متر می‌باشد. این استخر قابلیت تولید امواج منظم را در بازه وسیعی از مشخصات ارتفاع و پریود موج دارد. به‌منظور



شکل ۴) نمای استخر موج، موج‌ساز و دمپر موجود در گروه پژوهشی انرژی‌های دریای پایه

ارتفاع موثر موج بین ۰/۵ تا ۱ متر با امکان وقوع ۲۰۱۶ ساعت در سال به‌عنوان موج با بیشترین امکان وقوع و چگالی انرژی انتخاب شد. برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی امواج از مقیاس‌بندی فرود استفاده شد. با بهره‌گیری از رابطه (۱)، طبق مقیاس بندی فرود می‌توان شرایط امواج را به شرایط آزمایشگاهی تبدیل نمود.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

در جدول ۱ مقادیر عمق آبخور، ارتفاع موج برخوردی و فرکانس موج‌های شبیه‌سازی شده توسط موج‌ساز نشان داده شده است. در این پژوهش ۸ عمق آبخور، ۴ ارتفاع موج و ۸ فرکانس مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱) مقادیر پارامترهای آزمون

عمق‌های آبخور (متر)	ارتفاع موج (متر)	فرکانس (هرتز)
-۰/۹ -۰/۸ -۰/۷ -۰/۶ -۰/۵ -۰/۴ -۰/۳ -۰/۲	۰/۱ -۰/۰۸ -۰/۰۶ -۰/۰۴	-۰/۵۳ -۰/۵ -۰/۴۷ -۰/۴۳ -۰/۴ -۰/۳۶
۱/۵ -۱/۴ -۱/۳ -۱/۲		۰/۶۳ -۰/۶ -۰/۵۷

۳- مطالعه تجربی

۳-۱- آنالیز ابعادی مسئله

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، شرایط موج برخوردی شامل ارتفاع موج، عمق آب، فرکانس موج و عمق آبخور به‌عنوان پارامترهای کلیدی اثرگذار بر عملکرد مبدل صفحه‌ای مشخص شدند (رابطه‌ی (۲)).

$$P_{owsc} = f(\rho, g, \omega, H, h, d) \quad (2)$$

H ارتفاع موج برخوردی، h عمق آب، d عمق آبخور، ω فرکانس موج برخوردی، ρ چگالی آب و g شتاب گرانش می‌باشد. پس از بی‌بعد سازی متغیرها با استفاده از تئوری پی-باکینگهام، گروه‌های بی‌بعد استخراج شدند [16].

$$C_p = \frac{P_{owsc}}{\rho \omega^3 H^5} = f\left(\frac{\omega^2 H}{g}, \frac{d}{h}\right) \quad (3)$$

C_p ضریب توان، $\frac{\omega^2 H}{g}$ فرکانس بی‌بعد موج و $\frac{d}{h}$ عمق آبخور بی‌بعد می‌باشد.

۳-۲- معادلات حاکم

برای محاسبه توان مبدل صفحه‌ای از رابطه ۴ استفاده شد [17]

$$P_{owsc} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (P \cdot Q) dt \quad (4)$$

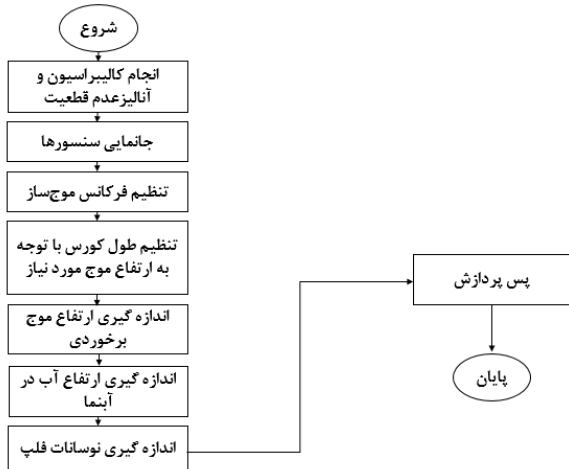
Q دبی جریان در مدار هیدرولیکی و P فشار در محفظه سیلندر است. به‌منظور محاسبه دبی در مدار هیدرولیکی از روابط ۵ و ۶ استفاده شد.

$$\dot{L} = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

$$Q = \dot{L} \times (A_1 + A_2) \quad (6)$$

L تغییر ارتفاع سطح آب درون مخزن و Δt زمان این تغییر است. تغییر ارتفاع با استفاده از لوله آبنمای مدرج تعبیه‌شده در کنار

موج برخوردی صورت می‌پذیرد؛ با توجه به فرکانس موج برخوردی و عمق آب در هر آزمون، ارتفاع موج برای انجام آزمون‌ها تنظیم خواهد شد. برای اطمینان از اعتبار داده‌ها هر آزمون ۲ بار تکرار می‌شود و در نهایت داده‌های به‌دست‌آمده پس‌پردازش می‌شوند.



شکل ۶) مراحل انجام مطالعات تجربی

۳-۴- کالیبراسیون و آنالیز عدم قطعیت

به‌منظور دستیابی به داده‌های قابل‌اطمینان، ضمن کالیبراسیون کلیه ابزارهای اندازه‌گیری، آنالیز عدم قطعیت نیز انجام شد. در این مطالعه از چهار سنسور سطح‌سنج استفاده شد. شکل ۷ سامانه‌ی کالیبراسیون سنسورهای سطح‌سنج را نشان می‌دهد؛ با توجه به شکل ۷، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسور سطح‌سنج با تغییر ارتفاع به‌دست‌آمده توسط شاخص (خطکش) مقایسه و ضریب کالیبراسیون ۱/۱۱ برای سنسور سطح‌سنج به‌دست آمد. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات سطح در مجاورت شاخص، از یک دوربین فیلم‌برداری نیز استفاده شد.

دو نوع عدم قطعیت وجود دارد، نوع A که عدم قطعیت تصادفی نامیده می‌شود و نوع B که عدم قطعیت سیستماتیک نامیده می‌شود (عدم قطعیت اندازه‌گیری نوع B با استفاده از تمام اطلاعات موجود مربوط به آزمون ارزیابی می‌شود)، بنابراین هر دو نوع عدم قطعیت باید با اعمال معادلات زیر در نظر گرفته شوند [19].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (13)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (14)$$

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

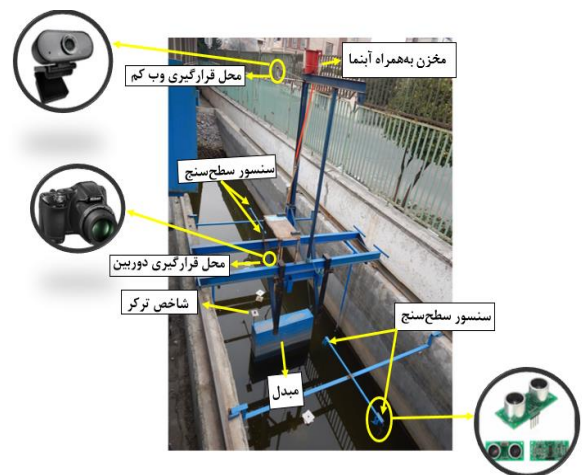
$$u_B = \sqrt{\frac{(y_j - \hat{y}_j)^2}{M-2}} \quad (16)$$

$$u_s = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (17)$$

$$U = k u_s \quad (18)$$

اندازه‌گیری نوسانات سطح آزاد آب داخل استخر موج، از سنسور اولتراسونیک US-100 و برای پردازش آن از برد آردوینو استفاده شد، نتایج مربوط به آنالیز عدم قطعیت سنسورها در مراجع [17,18] قابل مشاهده است.

همچنین به‌منظور محاسبه دامنه نوسانات، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای فلپ، ابتدا نوسانات فلپ توسط یک دوربین فیلم‌برداری ثبت و سپس در یک نرم‌افزار ترکر مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین از یک وب‌کم به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع آب در لوله آبنا می‌مخزن با هدف محاسبه دبی آب در مدار هیدرولیکی استفاده شد (شکل ۵ و جدول ۲).

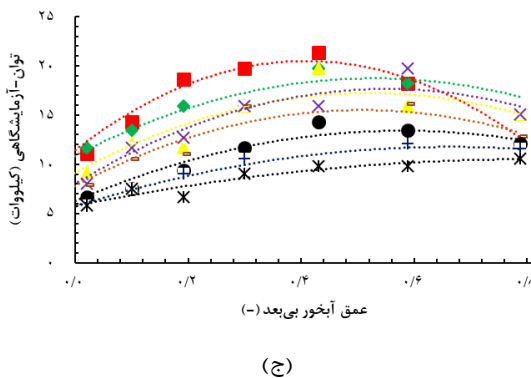
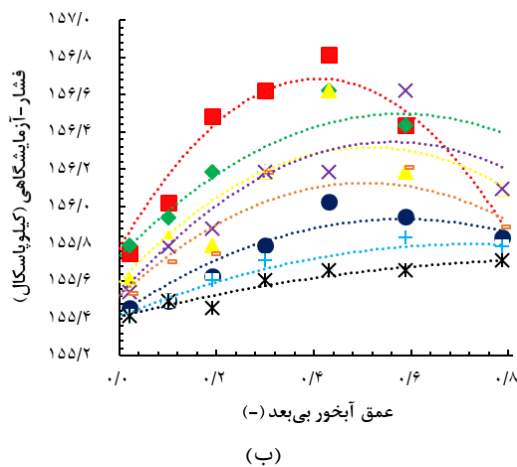
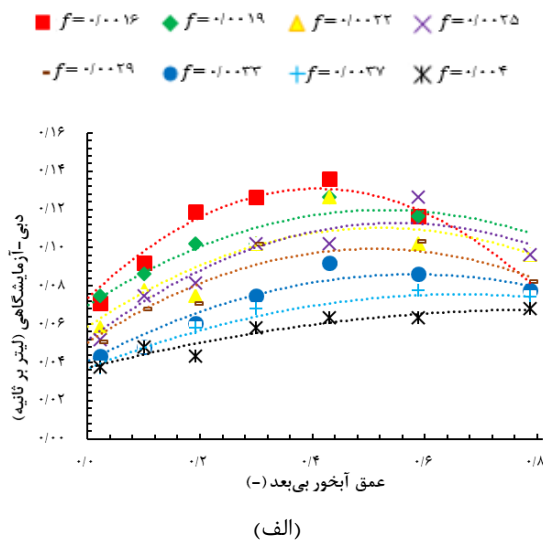


شکل ۵) محل قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری

جدول ۲) مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری

تصویر	دقت	تجهیز اندازه‌گیری
	بزرگ‌نمایی: ۳۴x دقت: ۹۲۱۰۰۰ پیکسل	دوربین فیلم‌برداری Nikon coolpix L830
	دامنه تشخیص: ۲ تا ۴۵۰ سانتی‌متر دقت اندازه‌گیری: ۱ میلی‌متر	سنسور US-100
	سرعت فیلم‌برداری: ۳۰ فریم بر ثانیه	وب کم ROTEL-RW120

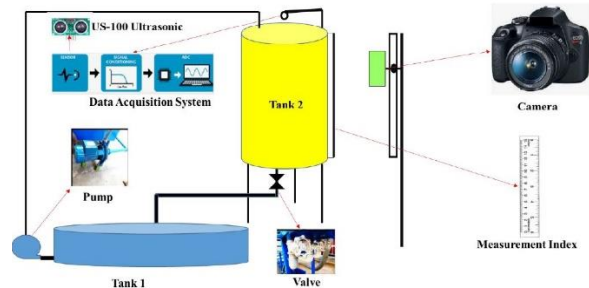
مراحل انجام مطالعات تجربی در شکل ۶ نشان داده شده است. در ابتدا تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره شده، سپس آنالیز عدم قطعیت انجام می‌شود؛ در گام بعدی با مشخص شدن نوع، تعداد و محل مناسب قرارگیری سنسورهای اندازه‌گیری، جانمایی این سنسورها انجام می‌شود؛ سپس با توجه به پریود امواج دریای مازندران و مقیاس مدل (۱:۸)، محاسبات لازم با هدف استخراج فرکانس‌های



شکل ۸) تغییرات الف- دبی، ب- فشار، ج- توان مقیاس آزمایشگاهی در اثر تغییر عمق آب‌خور بی‌بعد

شکل ۸- الف تغییرات دبی پمپاژ را با تغییر عمق آب‌خور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فرکانس بی‌بعد ثابت با کاهش عمق آب‌خور بی‌بعد تا یک میزان مشخص، دبی پمپاژ افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل افزایش گشتاور تحریک موج می‌باشد؛ ولی با کاهش بیشتر عمق آب‌خور بی‌بعد، دبی نیز کاهش یافته است که این کاهش تا مقادیر عمق آب‌خور منفی نیز ادامه داشته است؛ به‌گونه‌ای که کمترین میزان پمپاژ دبی در حالت عمق آب‌خور منفی (فلپ مغروق) رخ می‌دهد. برای توجیه این

در معادلات بالا، مقدار متوسط، پارامتر در نظر گرفته شده در هر آزمون، n تعداد آزمایشات، s انحراف از معیار است، u_A عدم قطعیت تصادفی و u_B عدم قطعیت سیستماتیک نامیده می‌شود که در آن M تعداد نقاط کالیبراسیون و $y_j - \bar{y}_j$ تفاوت بین نقطه داده کالیبره شده و مقدار برازش است؛ عدم قطعیت موقعیت اندازه‌گیری ۰/۱ درصد در نظر گرفته شده است. U عدم قطعیت بسط یافته است که به صورت ضرب عدم قطعیت ترکیبی، u_s ، در ضریب K محاسبه می‌شود؛ فاکتور همپوشانی در این مطالعه به منظور دستیابی به ۹۵ درصد اطمینان نسبت به داده‌ها عدد ۲ در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به آنالیز عدم قطعیت توسط سنسورهای سطح‌سنج به تفصیل در مراجع [16,17] آورده شده است، نتایج نشان داد که سنسور سطح‌سنج دارای حداکثر عدم قطعیت ۳٪/۵ می‌باشد.



شکل ۷) استفاده از مخزن، دوربین و خط کش به منظور کالیبراسیون سنسور سطح‌سنج

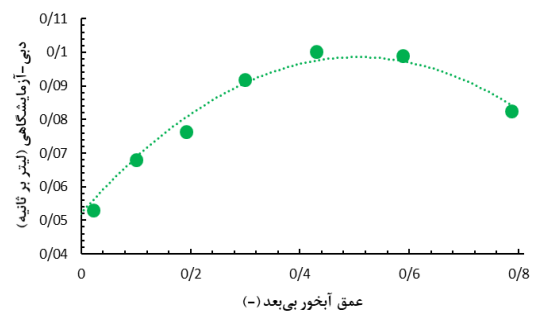
۴- نتایج و بحث

در این بخش تاثیر عمق آب‌خور بی‌بعد و فرکانس بی‌بعد موج بر عملکرد مبدل صفحه‌ای در قالب دبی پمپاژ، فشار سامانه‌ی انتقال توان و توان مبدل بررسی شده است. در این راستا ابتدا با بررسی نتایج آزمون‌ها، عمق آب‌خور بهینه به دست می‌آید. سپس در ادامه با بررسی نتایج برای فرکانس‌های گوناگون، فرکانس بهینه نیز تعیین خواهد شد. برای ارائه‌ی یک ارزیابی جامع، تاثیر فرکانس بی‌بعد و عمق آب‌خور بی‌بعد نیز بر پارامتر مهم ضریب مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت برای ارزیابی عملکرد مبدل در مقیاس اصلی، دبی پمپاژ، فشار سامانه‌ی انتقال توان و توان مبدل برای مقیاس اصلی و با استفاده از مقیاس‌بندی فرود محاسبه می‌شود.

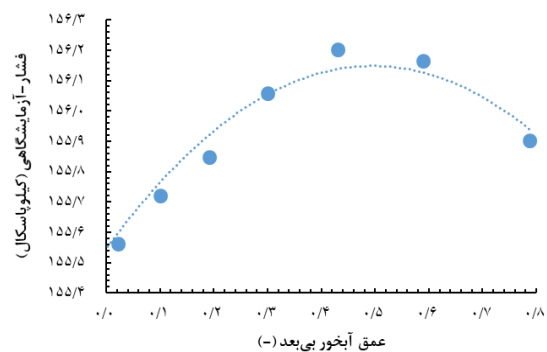
۴-۱- تغییر عمق آب‌خور

به منظور بررسی اثر عمق آب‌خور بر عملکرد مبدل، از پارامترهای عمق آب‌خور بی‌بعد و فرکانس بی‌بعد (رابطه‌ی ۳) استفاده شده است. مشخصه‌های عملکردی مبدل (دبی پمپاژ، فشار سامانه‌ی انتقال توان و توان مبدل) در عمق آب‌خورهای بی‌بعد گوناگون در شکل ۸ ارائه شده است.

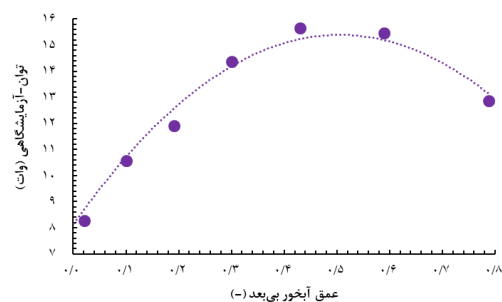
نتیجه می‌توان گفت: «در شرایطی که فلپ مغروق می‌شود، با عبور موج از بالای فلپ، بخشی از نیروی موج از دست می‌رود.» شکل ۸-ب و ج روند تغییرات فشار و توان مبدل را با تغییر عمق آب‌خور نشان می‌دهند. با توجه به شکل، روند تغییرات مشابه تغییرات دبی پمپاژ می‌باشد. البته نتایج نشان می‌دهند وابستگی فشار به عمق آب‌خور اندک است. همان‌طور که از بررسی نمودارهای شکل ۸ می‌توان دریافت، عمق آب‌خور بهینه با تغییر فرکانس‌های بی‌بعد موج تغییر خواهد کرد. لذا به منظور تعیین عمق آب‌خور بهینه، از مشخصه‌های عملکردی مبدل در فرکانس‌های بی‌بعد مختلف میانگین‌گیری شده است؛ برای این منظور، در هر عمق آب‌خورهای ثابت، به ازای فرکانس‌های مختلف، دبی استخراج و از آن میانگین‌گیری شده است (شکل ۹).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹) تغییرات میانگین الف-دبی، ب-فشار، ج-توان مقیاس آزمایشگاهی در اثر تغییر عمق آب‌خور بی‌بعد

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مبدل در عمق آب‌خور بی‌بعد ۰/۴۳، در مقایسه با سایر عمق آب‌خورها عملکرد بهتری دارد و در عمق

آب‌خورهای بی‌بعد پایین‌تر و بالاتر از ۰/۴۳ عملکرد سامانه کاهش می‌یابد. بررسی مشخصه‌های عملکردی در عمق آب‌خور بهینه نشان می‌دهد که بیشترین توان در این عمق آب‌خور بی‌بعد معادل با ۱۵/۶ وات می‌باشد. همچنین توان میانگین نسبت به بدترین حالت نیمه‌مغروق تا ۱۷/۷ درصد و در حالت به میزان ۵۲/۸ درصد افزایش یافته است. با توجه به افزایش قابل‌ملاحظه‌ی کارایی در عمق آب‌خور بهینه، افزایش توان به‌دست‌آمده می‌تواند در تولید انرژی سالیانه بسیار تاثیرگذار باشد.

۲-۴- تغییر فرکانس موج برخوردی

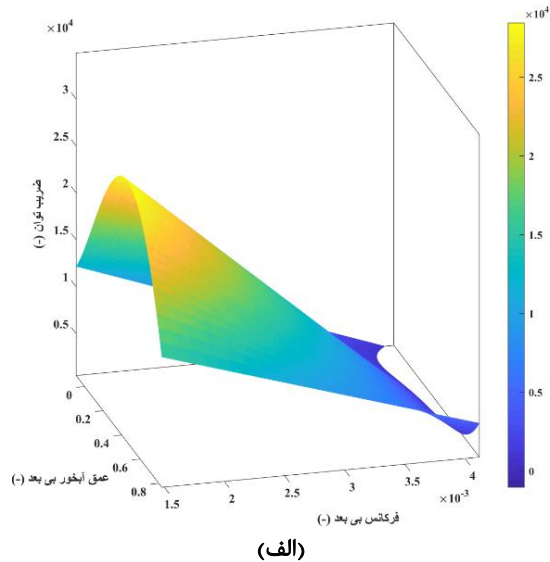
به‌منظور بررسی اثر فرکانس موج برخوردی بر عملکرد مبدل، به‌ازای هر عمق آب‌خور بی‌بعد ثابت، مشخصه‌های عملکردی مبدل در فرکانس‌های بی‌بعد مختلف استخراج شده است (شکل ۱۰).

با توجه به شکل ۱۰-الف، در یک عمق آب‌خور بی‌بعد ثابت با افزایش فرکانس بی‌بعد موج، دبی کاهش یافته است؛ زیرا با افزایش فرکانس (کاهش پریود) موج، توان موج برخوردی و نیز دامنه حرکتی فلپ کاهش می‌یابد؛ در نتیجه دبی کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل ۱۰-ب و ج، در یک عمق آب‌خور بی‌بعد ثابت، با افزایش فرکانس بی‌بعد موج، فشار و توان مبدل کاهش می‌یابد؛ زیرا در این شرایط سرعت پمپاژ آب کاهش یافته، افت فشار در مدار هیدرولیکی افزایش و توان موج برخوردی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که فشار وابستگی اندکی به فرکانس موج برخوردی دارد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی عمق آب‌خورها مبدل در پایین‌ترین فرکانس عملکرد بهتری دارد.

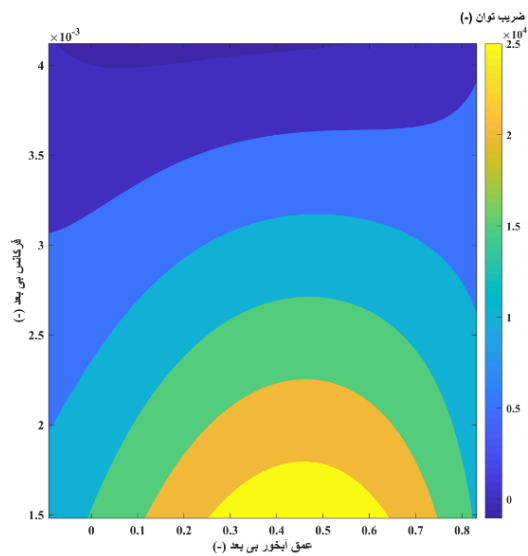
۴-۴- ضریب توان

با هدف بررسی بهتر عملکرد مبدل و با توجه به آنالیز ابعادی به روش پی-باکینگهام تاثیر عمق آب‌خور بی‌بعد و فرکانس بی‌بعد بر ضریب توان مبدل در کانتور شکل ۱۱ نشان داده شده است؛ این کانتور در نرم‌افزار متلب ترسیم شده است، به این صورت که داده‌ها با استفاده از جعبه‌ابزار cftool متلب، در ابتدا مورد برازش قرار گرفت و یک رویه از داده‌های تجربی گذرانده شد و سپس ضریب توان بر اساس عمق آب‌خور بی‌بعد و فرکانس بی‌بعد ترسیم شده است.

برای محاسبه‌ی ضریب توان از رابطه ۳ استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تاثیر عمق آب‌خور بی‌بعد بر ضریب توان دارای روندی غیرخطی است؛ به‌گونه‌ای که در یک عمق آب‌خور بی‌بعد مشخص، ضریب توان بیشینه شده است؛ این روند برای توان نیز دیده شده بود. تاثیر فرکانس بی‌بعد بر ضریب توان روندی تقریباً خطی دارد؛ به این معنا که افزایش فرکانس بی‌بعد منجر به کاهش ضریب توان می‌گردد؛ زیرا افزایش فرکانس بی‌بعد سبب کاهش زمان لازم برای پاسخگویی مبدل به موج برخوردی و نیز توان موج برخوردی شده، در نتیجه ضریب توان کاهش می‌یابد. نتایج نشان داده است که ضریب توان مبدل در عمق آب‌خور بی‌بعد ۰/۴۳ در مقایسه با سایر عمق آب‌خورهای بی‌بعد بهتر است.



(الف)



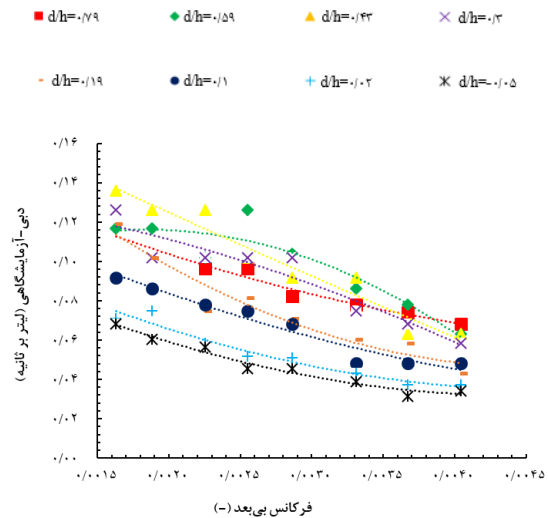
(ب)

شکل ۱۱ تغییرات ضریب توان الف- در اثر تغییر فرکانس بی بعد، ب- در اثر تغییر عمق آبخورد بی بعد

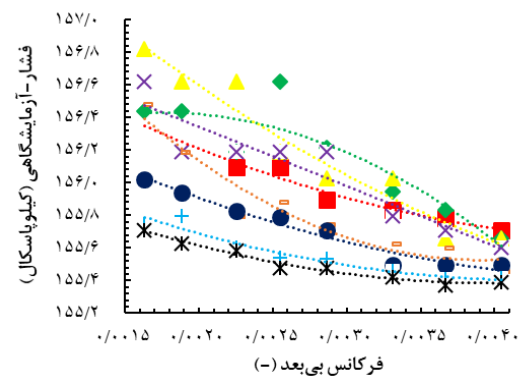
میانگین مشخصه‌های عملکردی در فرکانس‌های مختلف محاسبه و به مقیاس اصلی تبدیل شده است (شکل ۱۲). مقادیر بیشینه‌ی میانگین دبی، فشار و توان مبدل در مقیاس اصلی به ترتیب ۱۸ لیتر بر ثانیه، ۲۲/۶۶ کیلووات و ۱۲۴۹/۶۱ کیلوپاسکال برآورد شده است. به منظور یک جمع‌بندی کلی، مقادیر بیشینه پارامترهای مشخصه‌های عملکردی مبدل (دبی، فشار و توان مبدل) در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ مقادیر بیشینه مشخصه‌های عملکردی مبدل

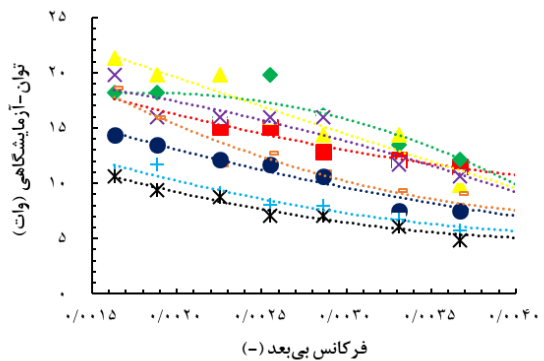
پارامتر/ مقیاس‌بندی	مقیاس آزمایشگاهی	مقیاس واقعی
بیشینه دبی پمپ‌آزده	۰/۱۴ لیتر بر ثانیه	۲۴/۶ لیتر بر ثانیه
بیشینه توان خروجی مبدل	۲۱/۳ وات	۳۰/۹ کیلووات



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ تغییرات الف- دبی، ب- فشار، ج- توان مقیاس آزمایشگاهی در اثر تغییر فرکانس بی بعد موج برخوردی

۴-۵- عملکرد مبدل در مقیاس اصلی

برای ارزیابی تخمین عملکرد مبدل در مقیاس اصلی از مقیاس بندی فرود استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، مقیاس مدل ۱:۸ ($\lambda = 8$) در نظر گرفته شده است؛ لذا در مقیاس اصلی، دبی متناسب با $\lambda^{2.5}$ ، فشار متناسب با λ و توان مبدل متناسب با $\lambda^{3.5}$ می‌باشد. λ نسبت فرود است. در این راستا در هر عمق آب ثابت،

یافت. با این حال فشار در سامانه‌ی انتقال توان وابستگی اندکی به فرکانس موج برخوردی دارد.

• مبدل در عمق آب‌خوری بعد ۰/۴۳ بهترین عملکرد را دارد و در عمق آب‌خورهای بی‌بعد کمتر و بیشتر از ۰/۴۳، عملکرد مبدل کاهش می‌یابد. شایان‌ذکر است که مبدل در عمق آب‌خور منفی (فلپ مغروق) پایین‌ترین عملکرد را دارد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین کاهش دبی و توان با تغییر عمق آب‌خور از ۰/۴۳ به ۰/۰۵- متر (از عمق آب ۱ به ۱/۵ متر) به ترتیب ۷۵ درصد و ۷۵/۲ درصد است.

• مبدل در تمامی عمق آب‌خورها در پایین‌ترین فرکانس و در تمامی فرکانس‌ها در عمق آب‌خور ۰/۴۳ عملکرد بهتری دارد.

• مقادیر بیشینه‌ی دبی، توان و فشار در مقیاس آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۱۴ لیتر بر ثانیه، ۲۱/۳ وات و ۱۵۶/۸ کیلوپاسکال به‌دست آمد که با استفاده از مقیاس‌بندی فرود، در مقیاس واقعی به ترتیب ۲۴/۶ لیتر بر ثانیه، ۳۰/۹ کیلووات و ۱۲۵۴/۵ کیلوپاسکال خواهد شد.

۶- فهرست علائم

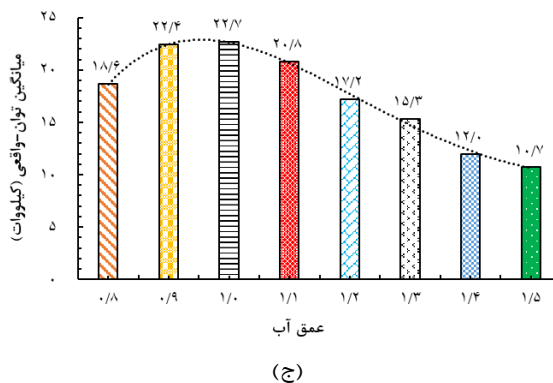
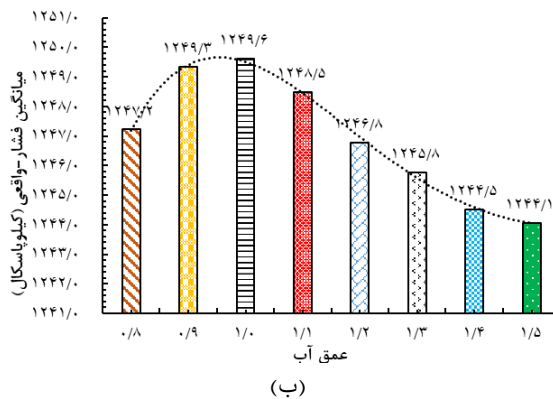
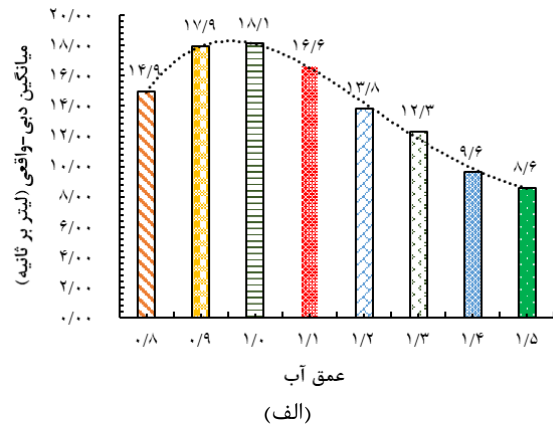
Symbols	علائم
d	عمق آب‌خور (متر)
g	شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه)
H	ارتفاع موج برخوردی (متر)
h	عمق آب (متر)
k	عدد موج (رادیان بر متر)
p	فشار (کیلو پاسکال)
W	توان خروجی (وات)
Q	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
u	عدم قطعیت (متر)
V	سرعت (متر بر ثانیه)
Greek symbols	علائم یونانی
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
ω	فرکانس موج برخوردی (هرتز)

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.
منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است

منابع

- 1- A. J. Henry, "The hydrodynamics of small seabed mounted bottom hinged wave energy converters in shallow water," Queen's University Belfast, 2009.
- 2- Whittaker T, Folley M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012; 370(1959):345-64.



شکل ۱۲) میانگین مشخصه‌های عملکردی مبدل الف- دبی، ب- فشار، ج- توان مبدل در مقیاس واقعی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر عمق آب‌خور و فرکانس موج برخوردی بر عملکرد یک مبدل صفحه‌ای با در نظر گرفتن سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی، به‌صورت تجربی بررسی شده است. آزمون‌های تجربی بر روی یک مدل با مقیاس ۱:۸ با در نظر گرفتن امواج منظم با شرایط امواج دریای مازندران انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که عمق آب‌خور و فرکانس موج برخوردی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مبدل دارند. در مجموع نتایج عمده‌ی پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

• عملکرد مبدل صفحه‌ای با افزایش فرکانس موج برخوردی کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش فرکانس (کاهش پریود) موج، توان موج برخوردی، دامنه حرکتی مبدل و پریود نوسانات فلپ کاهش خواهد

- 17- Kharkeshi BA, Shafaghat R, Jahanian O, Alamian R, Rezanejad K. Experimental study on the performance of an oscillating water column by considering the interaction effects of optimal installation depth and dimensionless hydrodynamic coefficients for the Caspian Sea waves characteristics. *Ocean Engineering*. 2022; 256:111513.
- 18- 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. *International Journal of Maritime Technology*. 2020; 14:1-2.
- 19- Shafaghat R, Fallahi M, Alizadeh Kharkeshi B, Yousefifard M. Experimental Evaluation of the Effect of Incident Wave Frequency on the Performance of a Dual-chamber Oscillating Water Columns Considering Resonance Phenomenon Occurrence. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*. 2022; 13(2):98-110.
- 3- Folley M, Whittaker TJ, Henry A. The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter. *Ocean Engineering*. 2007; 34(8-9):1265-74.
- 4- Gomes RP, Lopes MF, Henriques JC, Gato LM, Falcão AF. The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves. *Ocean Engineering*. 2015; 96:86-99.
- 5- Xu C, Wang X, Wang Z. Experimental Study on the Dynamics of A Bottom-hinged Oscillating Wave Surge Converter. In 2016 5th International Conference on Sustainable Energy and Environment Engineering (ICSEEE 2016) 2016(pp. 210-214).
- 6- Ning D, Liu C, Zhang C, Götteman M, Zhao H, Teng B. Hydrodynamic performance of an oscillating wave surge converter in regular and irregular waves: an experimental study. *Journal of Marine Science and Technology*. 2017;25(5):4.
- 7- Chow YC, Chang YC, Lin CC, Chen JH, Tzang SY. Experimental investigations on wave energy capture of two bottom-hinged-flap WECs operating in tandem. *Ocean Engineering*. 2018; 164:322-31.
- 8- Henry A, Folley M, Whittaker T. A conceptual model of the hydrodynamics of an oscillating wave surge converter. *Renewable Energy*. 2018; 118:965-72.
- 9- Brito M, Ferreira RM, Teixeira L, Neves MG, Canelas RB. Experimental investigation on the power capture of an oscillating wave surge converter in unidirectional waves. *Renewable Energy*. 2020; 151:975-92.
- 10- Brito M, Canelas RB, García-Feal O, Domínguez JM, Crespo AJ, Ferreira RM, Neves MG, Teixeira L. A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints. *Renewable Energy*. 2020; 146:2024-43.
- 11- Kelly M, Tom N, Yu YH, Wright A, Lawson M. Annual performance of the second-generation variable-geometry oscillating surge wave energy converter. *Renewable Energy*. 2021; 177:242-58.
- 12- Burge C, Tom N, Thiagarajan K, Davis J, Nguyen N. Performance Modeling of a Variable-Geometry Oscillating Surge Wave Energy Converter on a Raised Foundation. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2021 (Vol. 85192, p. V009T09A010).
- 13- Amini E, Asadi R, Golbaz D, Nasiri M, Naeeni ST, Majidi Nezhad M, Piras G, Neshat M. Comparative study of oscillating surge wave energy converter performance: A case study for southern coasts of the Caspian sea. *Sustainability*. 2021; 13(19):10932.
- 14- Li Q, Mi J, Li X, Chen S, Jiang B, Zuo L. A self-floating oscillating surge wave energy converter. *Energy*. 2021; 230:120668.
- 15- 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.
- 16- Alizadeh Kharkeshi B, Shafaghat R, Jahanian O, 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):823-34.