مدل‌سازی و تست سیستم جاذب نقطه‌ای مبدل انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی

محمدرضا نگهداری[۱*]، حسین دلایلی[۲]، محمدحسن مقدس[۳]، حسن قاسمی[۴]، تقی علی اکبری[۵]

[۱] دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، negahdari@cmu.ac.ir
[۲] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، dalayeli@yahoo.com
[۳] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mhmogh@mut.ac.ir
[۴] دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، gasemi@aut.ac.ir
[۵] آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس، aliakbari_taghi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:
مبدل انرژی امواج دریا
مبدل جاذب نقطه‌ای
حرکت هیو
سیستم PTO
نمودار RAO

چکیده

امواج دریاها یکی از منابع مهم انرژی می‌باشد که با تبدیل آن به انرژی مورد نیاز می‌توان جهت مصارف مختلف استفاده نمود. در این تحقیق به شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی یک مبدل جاذب نقطه‌ای (FPA)[۱] در امواج پرداخته شده است. این مبدل از نوع دو درجه آزادی متشکل از دو جسم شناور و مغروق می‌باشد و از حرکات هیو[۲] تولید انرژی می‌نماید. مدل‌سازی هیدرودینامیکی سیستم توسط بسته نرم‌افزاری انسیس آکوا[۳] انجام گرفته و پارامترها و ضرایب هیدرودینامیکی سیستم استخراج شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در صورت وقوع تشدید در سیستم می‌توان به حداکثر جابجایی و توان خروجی دست یافت. برای این منظور ضرایب میرایی و سختی بهینه سیستم PTO برای دستیابی به حداکثر توان سیستم تعیین شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد سیستم و نیز اعتبارسنجی نتایج عددی به ساخت و تست مدل آزمایشگاهی پرداخته شده است.

Modeling and testing of the point absorber system to convert Sea Wave Energy into electrical energy

Mohammadreza Negahdari[1*], Hossein Dalayeli [2], Mohammad Hassan Moghadas [3], Hassan Ghasemi[4], Taghi Aliakbari[5]

[1] Faculty of Marine Engineering, Chabahar maritime university; negahdari@cmu.ac.ir
[2] Faculty of Mechanical Engineering, Malek ashtar University of Technology; dalayeli@yahoo.com
[3] Malek ashtar University of Technology; mhmogh@mut.ac.ir
[4] Faculty of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; gasemi@aut.ac.ir
[5]National Iranian Marine Laboratory; aliakbari_taghi@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 31 Oct. 2019
Accepted: 28 May. 2020

Keywords:
Wave Energy Converter (WEC)
Floating-Point Absorber (FPA)
Heave motion
Power Take Off system (PTO)
Response Amplitude Operator (RAO)

ABSTRACT

Sea waves are an important source of environmental energy which can be converted into energy needed for different purposes. In current study, a floating-point absorber (FPA) wave energy converter is simulated, built, and tested. The system is modeled through a two-body system with two degrees of freedom in the heave direction. Modeling hydrodynamic system has been done in ANSYS-AQWA software. In order to obtain the resonance condition and the maximum power of the system, the values of the hydraulic parameters were determined based on optimal PTO coefficients. The experimental data was used to validate the results presented in this paper.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

۱ - مقدمه

در خصوص روش‌های عددی بررسی عملکرد مبدل‌های انرژی امواج دریا نیز تاکنون فعالیت‌های متعددی انجام شده است. مدل‌سازی عددی به روش پانل[۴] روی یک مبدل پاندولی توسط آلویز[۵] و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۱] انجام گرفت. این فعالیت با بررسی تأثیر موقعیت پاندول در یک محفظه و تحلیل حرکات پاندول همراه بود. در ادامه فعالیت‌ها، شبیه‌سازی عکس‌العمل مبدل و سیال توسط آگاملو[۶] و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۲] با استفاده از یک برنامه عددی به روش CFD[۷] و با در نظر گرفتن اثر سطح آزاد انجام گرفت. مبدل فوق دارای یک بویه به شکل استوانه بود و جابجایی و نیروهای وارد از طرف سیال بر آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

تحقیق حاضر به مطالعه و بررسی یک مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج دریا[۸] می‌پردازد. پژوهش‌های مختلفی تاکنون در زمینه مبدل‌های جاذب نقطه‌ای انجام شده است. در سال ۲۰۰۹ مدل‌سازی و بهینه‌سازی هیدرودینامیکی روی یک مبدل جاذب نقطه‌ای مجهز به بویه شناور، توسط بیکر[۹] ([۳،۴،۵]) انجام شد. در این مطالعات ضمن مدل‌سازی عددی، یک روش کنترلی متناسب با سرعت و نیروی تنظیم متناسب با شتاب بویه بکار گرفته شد. همچنین مدل‌سازی و بهینه‌سازی هیدرودینامیکی یک بویه استوانه‌ای شکل با استفاده از حرکات هیو و مقایسه نتایج برای حالت‌های مختلف توسط شبیه‌ساز عددی ویمیت[۱۰] و آکوا[۱۱] توسط گونزالز[۱۲] و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۶] همراه با استخراج نمودارهای RAO[۱۳] از دیگر فعالیت‌های انجام گرفته در این زمینه بوده است. در تحقیق مذکور علاوه بر حرکت هیو، تأثیر دیگر حرکات سرج و پیچ نیز در توان خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۳ سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای متشکل از دو جسم توسط بزی[۱۴] و همکاران [۷] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ل ین تحقیق نشان داد که در شرایط یکسان، سیستم در حالت دو درجه آزادی دارای توان خروجی بیشتری در مقایسه با حالت یک درجه آزادی خواهد بود. در سال ۲۰۱۴ بهینه‌سازی هندسی مدل توسط گوگینز و همکاران [۸] با استفاده از چند فرم و هندسه مدل‌سازی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. پژوهش پاستور[۱۵] و همکارانش (۲۰۱۴) [۹] بر تأثیرات اشکال بویه بر میزان جذب انرژی موج بر روی مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج بر اساس مدل مبدل OPT[۱۶] نمونه‌هایی از تحقیقات انجام گرفته در سال‌های گذشته است. پژوهش دیگر مربوط به جان کو[۱۷] و همکارانش (۲۰۱۵) [۱۰] در برآورد تأثیرات پدیده تشدید بر بویه‌های جاذب انرژی بوده است. از دیگر فعالیت‌ها می‌توان به فعالیت ببارید[۱۸] و همکاران ([۱۱و۱۲]) اشاره نمود که به محاسبه توان قابل جذب امواج با استفاده از سیستم PTO و نیز با ارائه یک مدل هیدرولیکی به بررسی حالت بهینه سیستم هیدرولیکی PTO [19] پرداخته شده است. همچنین مطالعه پارامتری امیری[۲۰] و همکارانش (۲۰۱۶) [۱۳] در برآورد تأثیرات ارتفاع موج، آبخور، ضریب میرایی، قطر و شکل هندسی بویه بر میزان جذب انرژی در خصوص یک مبدل جاذب نقطه‌ای متشکل از دو جسم از فعالیت‌های سال‌های اخیر می‌باشد.

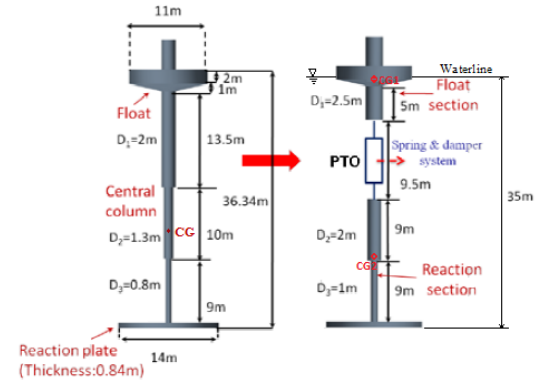
در سال ۲۰۱۷ مدل‌سازی دینامیکی سیستم جاذب نقطه‌ای استوانه‌ای متشکل از دو جسم توسط لیلند گ[۲۱] و همکاران [۱۴] مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و به ارائه روابط تحلیلی برای دستیابی به حالت بهینه هیدرودینامیکی سیستم پرداخته شد. حداکثر مقدار توان قابل جذب توسط سیستم مبدل‌های جاذب نقطه‌ای در شرایط وقوع تشدید در سیستم بدست می‌آید [۱۵]. بعبارت دیگر در صورتی که فرکانس موج برخوردی به سیستم و فرکانس طبیعی سیستم با هم برابر باشند، تشدید رخ می‌دهد [۱۶]. معمولاً فرکانس امواج دریاها بسیار پایین و در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ هرتز می‌باشد. در سیستم‌های یک درجه آزادی که دارای یک جسم شناور می‌باشند، سیستم فقط دارای یک فرکانس طبیعی می‌باشد که معمولاً مقادیر فرکانس طبیعی سیستم بیش از محدوده مقادیر فرکانس امواج دریاها بوده و در نتیجه ابعاد جسم شناور بایستی آنقدر بزرگ باشد تا بتوان به حالت تشدید و حداکثر توان و راندمان در سیستم دست یافت[۱۴]. بر اساس پژوهش فالکائو[۲۲] [۱۷] برای یک کره بایستی قطر آن تقریباً برابر با ۵۲ متر باشد تا بتوان به فرکانسی نزدیک به فرکانس موج در حدود ۰/۱ هرتز دست یافت. به همین دلیل با استفاده از سیستم‌های دو درجه آزادی با اضافه نمودن یک جسم مغروق در سیستم می توان فرکانس سیستم را به محدوده فرکانس امواج نزدیک نمود [۱۸]. در سیستم‌های دو درجه آزادی بدلیل برخورداری سیستم از دو فرکانس طبیعی می‌توان فرکانس سیستم را طوری طراحی نمود که از شرایط وقوع تشدید در سیستم بهره جست [۱۹]. همچنین از مزایای سیستم دو درجه آزادی متشکل از جسم شناور[۲۳] و مغروق[۲۴] این است که جسم مغروق مانند یک مهار[۲۵] عمل نمود و نیازی به وجود کابل برای مهار جسم شناور و اتصال آن با بستر دریا نمی‌باشد.

۲- سیستم مبدل انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی

با توجه به شرایط جغرافیایی و مشخصات امواج در آبها و دریاهای ایران، سیستم ارائه شده در این تحقیق از نوع سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای می‌باشد. بدلیل مزایای اشاره شده در خصوص سیستم‌های دو درجه آزادی در مقایسه با سیستم‌های یک درجه آزادی، سیستم مورد نظر نیز از نوع دو درجه آزادی می‌باشد. مدل مورد استفاده در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

این تحقیق، مدل بررسی توسط یو و لی[۲۶] در سال ۲۰۱۱ [۲۰] می‌باشد. این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مدل مذکور به دلیل دارا بودن داده‌های حاصل از تست تجربی از تحقیقات پیشین، فرآیند اعتبارسنجی نتایج عددی بدست آمده در تحقیق حاضر را ممکن می‌سازد. مدل فوق مجهز به دو بخش شناور[۲۷] و مغروق[۲۸] است و از حرکات نسبی بوجود آمده برای جذب انرژی در سیستم استفاده می‌نماید. در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای معمولاً از یک بویه استوانه ای به عنوان قسمت شناور استفاده می‌شود، زیرا که حرکات یک بویه دارای بازده مناسبی برای جذب انرژی می‌باشد.

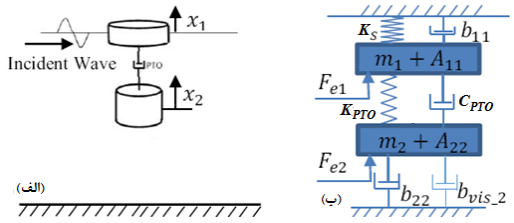


شکل ۱- سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای مبدل انرژی امواج دریا (مدل لی و همکاران [۲۰])، سمت چپ: سیستم متشکل از یک جسم، راست: سیستم متشکل از دو جسم

۳- شرایط حالت بهینه سیستم مبدل انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی

در این بخش با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار سیستم مبدل انرژی امواج دریا به بررسی شرایط دستیابی به حالت بهینه سیستم می‌پردازیم. با بررسی‌های بعمل آمده در خصوص شرایط سیستم مبدل انرژی امواج دریا، می‌توان نتیجه گرفت که دستیابی به حالت بهینه سیستم در ازای مقادیر مناسب برای ضرایب سختی و میرایی سیستم PTO شامل K_{pto} و C_{pto} امکان پذیر می‌باشد. پارامترهای مذکور به عنوان پارامترهای اساسی و تأثیرگذار در سیستم معرفی می‌شوند. لذا با تعیین مقادیر بهینه برای پارامترهای فوق می‌توان به حداکثر توان خروجی سیستم دست یافت ([۱۴]). در شکل ۲ نمودار نیرویی یا دیاگرام آزاد برای سیستم دو درجه آزادی نشان داده شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیستم مبدل انرژی امواج دریا در حالت دو درجه آزادی را به صورت رابطه زیر بیان می شود [۱۴]:

$$\begin{aligned} &m_1\ddot{x}_1 + m_{11}\ddot{x}_1 + m_{12}\ddot{x}_2 + b_{11}\dot{x}_1 + b_{12}\dot{x}_2 + b_{vis,1}\dot{x}_1 + C_{PTO}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_{PTO}(x_1 - x_2) + K_s x_1 = F_{e1} \\ &m_2\ddot{x}_2 + m_{21}\ddot{x}_1 + m_{22}\ddot{x}_2 + b_{21}\dot{x}_1 + b_{22}\dot{x}_2 + b_{vis,2}\dot{x}_2 + C_{PTO}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_{PTO}(x_2 - x_1) = F_{e2} \end{aligned} \quad (۱)$$



شکل ۲- نمودار نیرویی یا دیاگرام آزاد سیستم دو درجه آزادی [۱۴] الف) شکل شماتیک سیستم دو درجه آزادی، ب) مدل ارتعاشی سیستم دو درجه آزادی

همچنین توان خروجی سیستم در حالت دو درجه آزادی را می‌توان به فرم رابطه زیر نوشت [۱۴]:

$$P_{ave} = \frac{1}{2}\omega^2 C_{PTO}\left|\frac{p+iq}{(a+ib)C_{PTO}+(c+id)K_{PTO}+e+if}\right|^2 \quad (۲)$$

که ضرایب موجود در رابطه فوق بصورت زیر خواهد بود:

(۳)

$$\begin{cases} p = K_s F_2 - \omega^2(m_2 + m_{22} + m_{21})F_1 - \omega^2(m_1 + m_{11} + m_{12})F_2 \\ q = \omega(b_{22} + b_{vis,2} + b_{21})F_1 + \omega(b_{11} + b_{vis,1} + b_{12})F_2 \\ a = -\omega^2(b_{11} + b_{vis,1} + b_{22} + b_{vis,2} + b_{12} + b_{21}) \\ b = \omega K_s - \omega^3[(m_1 + m_{11}) + (m_2 + m_{22}) + m_{12} + m_{12})] \\ c = b/\omega \\ d = -a/\omega \\ e = \omega^4[(m_1 + m_{11})(m_2 + m_{22}) - m_{12}m_{21})] - \omega^2(m_2 + m_{22})K_s + (b_{11} + b_{vis,1})(b_{22} + b_{vis,2}) - b_{12}b_{21} \\ f = -\omega^3[(m_1 + m_{11})(b_{22} + b_{vis,2}) + (m_2 + m_{22})(b_{11} + b_{vis,1}) - m_{12}b_{12} - m_{21}b_{21}] + \omega K_s(b_{22} + b_{vis,2}) \end{cases}$$

طبق رابطه ۲ در سیستم حالت دو درجه آزادی توان خروجی سیستم وابسته به مقادیر ضرایب سیستم PTO می‌باشد. با توجه به اینکه توان متوسط خروجی سیستم وابسته به مقادیر پارامترهای K_{pto} و C_{pto} می باشد، می‌توان با تعیین مقادیر مناسب و بهینه برای این ضرایب به بیشترین توان خروجی دست یافت. به منظور فرآیند بهینه‌سازی سیستم، ضرایب سختی و میرایی سیستم PTO به عنوان پارامترهای غیر وابسته در رابطه توان متوسط خروجی معرفی می‌شوند. بنابراین بصورت تحلیلی با مشتق‌گیری از رابطه ۲ نسبت به ضرایب C_{pto} و K_{pto} می‌توان بطور جداگانه مقادیر بهینه برای ضرایب میرایی و سختی سیستم PTO را تعیین نمود. بعد از مشتق‌گیری و ساده‌سازی این نتایج مطابق با روابط ۴ و ۵ بدست آمده است [۱۴]:

$$(K_{PTO})_{opt} = -\frac{ce+df}{c^2+d^2} \quad (۴)$$

$$(C_{PTO})_{opt} = \sqrt{\frac{e^2+f^2+(c^2+d^2)K_{PTO}^2+(2ac+adf)K_{PTO}}{\omega^2(c^2+d^2)}} = \frac{1}{\omega}\frac{|cf-de|}{c^2+d^2} \quad (۵)$$

با جایگذاری ضرایب بهینه از روابط ۴ و ۵ در رابطه ۲ می‌توان توان متوسط بهینه را به فرم رابطه زیر بیان نمود [۱۴]:

$$(P_{ave})_{opt} = \frac{1}{2}\omega^2\frac{p^2+q^2}{2|ae+bf|+2(ae+bf)} \quad (۶)$$

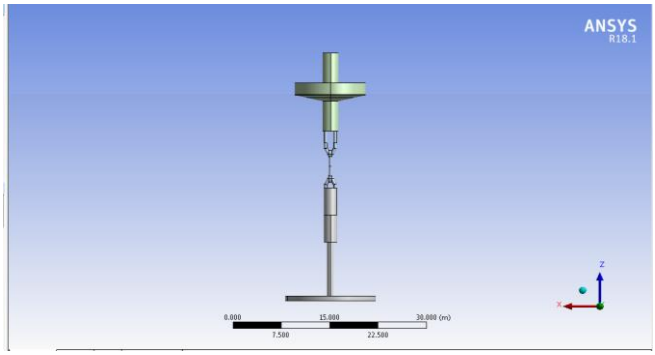
با استفاده از رابطه فوق می‌توان حداکثر توان متوسط قابل جذب توسط سیستم را در شرایط بهینه تعیین نمود. معادلات ۴ تا ۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

شرایط لازم برای دستیابی به شرایط بهینه سیستم در حالت دو درجه آزادی می‌باشند.

۴- مدل‌سازی سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی

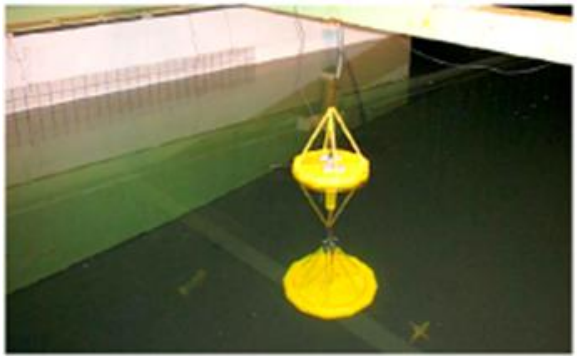
همانطور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، مدل ارائه شده بر مبنای مدل ارائه شده توسط لی و همکاران[۲۹] [۲۰] مطابق با شکل ۱ می‌باشد. جهت عملی شدن اصول عملکردی سیستم، دستگاه در دو بخش اصلی شامل بویه شناور و جسم مغروق مدل‌سازی می‌گردد. هدف اصلی تحقیق حاضر مدل‌سازی و تحلیل سیستم جاذب نقطه‌ای بصورت دو درجه آزادی می‌باشد. لذا در این مرحله مدل‌سازی هیدرودینامیکی سیستم متشکل از دو جسم شناور و مغروق انجام گرفته است. در شکل ۳ مدل‌سازی سیستم در حالت دو درجه آزادی در نرم‌افزار انسیس آکوا نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی و تحلیل هیدرودینامیکی سیستم شامل مقادیر ضرایب و پارامترهای هیدرودینامیکی، به منظور بهینه‌سازی سیستم در معادلات حرکت سیستم مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بهینه‌سازی شامل مقادیر عددی ضرایب میرایی و سختی سیستم PTO و توان متوسط خروجی در شرایط بهینه بدست خواهد آمد.



شکل ۳- مدل‌سازی سیستم حالت دو درجه آزادی مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج دریا

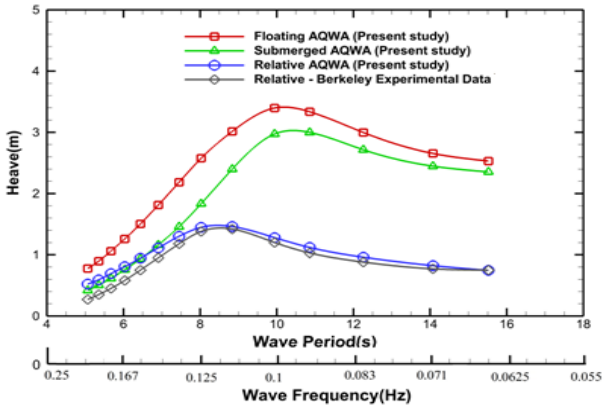
۴-۱- اعتبارسنجی نتایج

همچنین به جهت بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل عددی در تحقیق حاضر، مقایسه لازم با داده‌های حاصل از تست تجربی (UC Berkeley, December 2010) [۱۳] انجام گرفته است. در شکل ۴ مدل مورد آزمایش در آزمایشگاه برکلی نشان داده شده است. با توجه به نتایج تست تجربی و مقادیر عددی بدست آمده از مدل‌سازی و تحلیل سیستم، اعتبارسنجی لازم برای مدل مذکور صورت گرفته است.



شکل ۴- تست مدل مبدل انرژی امواج دریا در آزمایشگاه برکلی [۱۳] (December 2010)

به منظور اطمینان از فرآیند مدل‌سازی و تحلیل سیستم در این حالت نیز مقایسه ای بین نتایج مدل‌سازی عددی و تست تجربی انجام گرفته است. برای این منظور نمودار منحنی مقادیر حرکت هیو سیستم در حالت دو درجه آزادی در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج تست تجربی نشان داده شده در این شکل می‌توان دریافت که نتایج عددی بدست آمده دارای دقت قابل قبول می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در دوره تناوب ۸ ثانیه به دلیل وقوع پدیده تشدید در سیستم مقدار جابجایی نسبی حرکت هیو سیستم که ناشی از اختلاف مقادیر جابجایی هیو مربوط به جسم شناور و مغروق می‌باشد، حداکثر خواهد بود.



شکل ۵- نتایج تحلیل سیستم مربوط به جابجایی هیو در حالت دو درجه آزادی (H=2/5 m)

۵- ساخت نمونه آزمایشگاهی

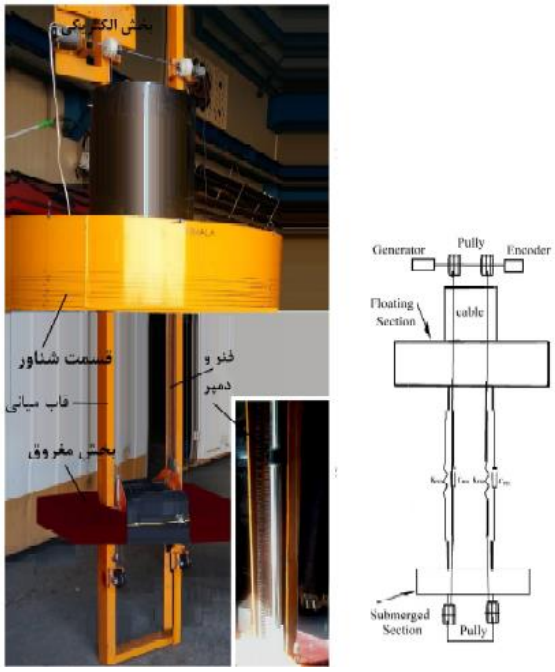
در این بخش به ساخت مدل آزمایشگاهی سیستم جاذب نقطه‌ای مبدل انرژی امواج خواهیم پرداخت. فرآیند ساخت و تست مدل مورد نظر، در آزمایشگاه شهدای خلیج فارس دانشگاه امام حسین (ع) انجام گرفته است. این مدل پس از نصب در حوضچه کشش در آب ساکن قرار گرفته است و فرکانس طبیعی حرکات آن تعیین شده است. در نهایت این مدل در آزمایشگاه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

شهدای خلیج فارس بـه آب‌اندازی شده است و در برابر امواج با دو ارتفاع موج ۸ و ۱۰سانتی‌متر قرار گرفته اســت. همچنــین نتــایج مربوط به آزمایش‌های مدل برای هر یک از حالت‌های مدل بـه ازای دوره‌های تناوب موج مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر اسـت کـه آزمایش مدل در هر دوره تناوب موج چندین بار تکرار شـده اسـت و نتایج حاصل از تست ثبت و گزارش شده است. بـرای بررسـی دقـت کارکرد دسـتگاه و سیسـتم‌های انـدازه‌گیری، تکرارپـذیری آزمـایش ارزیابی شده است.

۱-۵- اجزا و مشخصات سیستم

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد سیستم مبدل انرژی امواج دریا دارای دو بخش اصلی شناور و مغروق بوده که این دو بخـش توسـط یک سیستم فنر و دمپر به یکدیگر متصل شده است. بـه دلیـل ایـن که در این تحقیق فقط از حرکت قائم یا هیو برای جذب انرژی بهـره گرفته شده است، لذا به جهت محدود کردن درجات آزادی سیستم، قسمت فنر و دمپر در یک قاب بصورت قائم تعبیه شـده اسـت. ایـن قاب که قسـمت مغـروق سیسـتم را بـه قسـمت شـناور آن متصـل می‌نماید، دارای دو ستون بصورت موازی بوده و به همـین دلیـل در ساخت آن از یک جفت فنر و دمپر مشابه بطور موازی استفاده شـده است. مقادیر سختی فنر و میرایی دمپر مورد نیاز در ساخت مـدل از مقادیر بهینه بدست آمده از نتایج مدل‌سازی و تحلیـل عـددی و بـا استفاده از روابط ۴ و ۵ بدست آمده است. مقادیر سختی هر یـک از فنرها برابر با 90N/m بوده و در نتیجه سختی کل سیستم برابـر بـا ۱۸۰ نیوتن بر متر است. همچنین ضریب میرایی انتخابی بـرای هـر یک از دمپرها در حدود 250N.s/m بـوده اسـت، لـذا میرایـی کـل سیستم برابر با 500N.s/m می باشـد. در جـدول ۱ مقـادیر بهینـه ضرایب سختی و میرایی مورد استفاده مربوط به مـدل آزمایشـگاهی آورده شده است. در شکل ۶ شـکل شـماتیک از اجـزا و مشخصـات مدل و نیز نمای کلی مـدل سـاخته شـده از سیسـتم در آزمایشـگاه نشان داده شده است.



شکل ۶- اجزا و مشخصات و نمای کلی مدل ساخته شده از سیستم در آزمایشگاه

جدول ۱- مقادیر ضرایب بهینه سیستم K_{PTO} و C_{pto} برای مدل آزمایشگاهی سیستم مبدل انرژی امواج دریا

پارامترهای مقادیر بهینه سیستم	نماد پارامتر	نتایج تست مدل
ضریب میرایی بهینه سیستم PTO	$C_{PTO)opt}$	۵۰۰(Ns/m)
ضریب سختی بهینه سیستم PTO	$K_{PTO)opt}$	۱۸۰(N/m)

۶- انجام آزمایش‌ها و ثبت نتایج

نحوه استقرار سیستم نیـز بـرای عملیـات تسـت در حوضـچه در شکل ۷ سمت چپ نشان داده شده است. در ایـن شـکل تجهیـزات مورد نیاز برای انجام تست نیز نشان داده شده است. در شکل سمت راست بالا وسـیله لازم بـرای ثبـت مشخصـات مـوج برخـوردی بـه سیستم و در شکل سمت راست پـایین امکلا ات لازم بـرای انتقـال نتایج حاصل از تست به یک رایانه نشـان داده شـده اسـت. قبـل از ورود به مراحل انجام آزمایش سیسـتم موج‌سـاز و کلیـه تجهیـزات موجود از نظر کالیبره بودن مورد بررسی قرار گرفته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

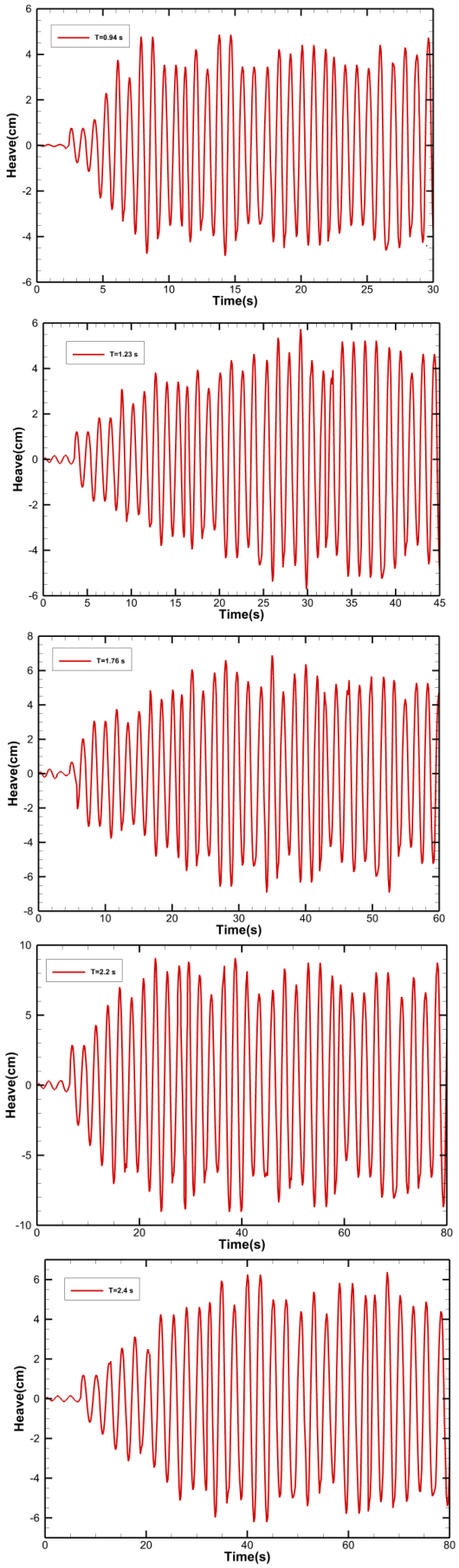


شکل ۷- نحوه استقرار سیستم و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام تست

نتایج حاصل از تست مدل شامل حرکات سیستم، ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور توسط حسگرهای متصل به سیستم ثبت و گزارش شده است. این موضوع توسط پورت خروجی هر حسگر به رایانه‌های موجود در محل تست منتقل شده و مورد استفاده گرفته است. حسگرهای موجود در شرایط آزمایش شامل حسگرهای ثبت مشخصات امواج برخوردی از قبیل ارتفاع، دوره تناوب و طیف موج برخوردی، حسگرهای ثبت‌کننده شتاب حرکات سیستم و حسگرهای ثبت‌کننده دور و ولتاژ الکتریکی خروجی ژنراتور می‌باشد. حسگرهای ثبت مشخصات موج برخوردی که از نوع خازنی می‌باشد و مطابق با شکل ۷ روی کانال به فاصله کمی در مجاورت سیستم قبل از آنکه موج تولیدی به سیستم برخورد کند، مشخصات موج برخوردی را ثبت و گزارش می‌نماید. حسگرهای ثبت کننده شتاب سیستم که توسط دستگاهی روی بدنه سیستم متصل شده است و در اثر حرکات سیستم مقادیر شتاب سیستم در جهات مختلف حرکتی را ثبت و گزارش می‌نماید.

۱-۶- نتایج حاصل از آزمایش

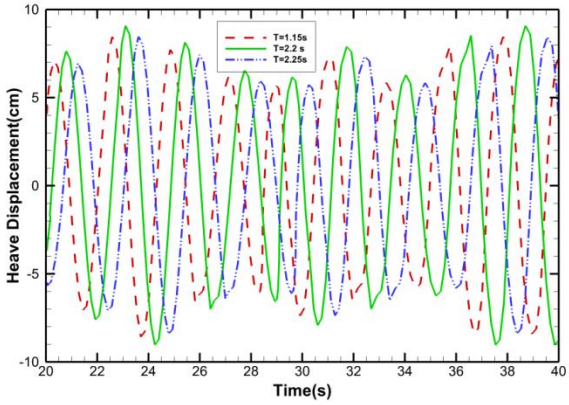
به جهت بررسی حرکات سیستم و استخراج منحنی RAO و مقایسه آن با نتایج عددی، نمودارهای مقادیر جابجایی هیو بر حسب زمان حاصل از نتایج تست مدل به ازای دوره‌های تناوب مختلف موج (T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s) در شکل ۸ ثبت و نشان داده شده است. مطالعه نتایج در این محدوده از دوره تناوب به جهت بررسی وقوع تشدید در سیستم دارای اهمیت می‌باشد. مقدار ارتفاع موج در این آزمایش برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- نمودارهای حرکات هیو برحسب زمان، حاصل از تست مدل (T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s, H=10cm)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

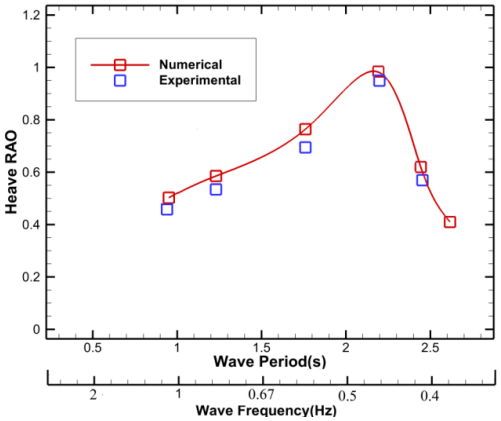
با توجه به نتایج عددی و تعیین دوره تناوب ۲/۲ ثانیه به عنوان دوره تناوب تشدید سیستم، در نزدیکی این دوره تناوب مقادیر جابجایی سیستم از آزمایش مدل بدست آمده و نمودار مقادیر جابجایی مربوط به این محدوده در شکل ۹ نشان داده شده است. این مقایسه در سه دوره تناوب ۲/۱۵ و ۲/۲ و ۲/۲۵ ثانیه به منظور تعیین دوره تناوب مربوط به حالت وقوع تشدید در سیستم انجام گرفته است. مطابق با این شکل با مقایسه مقادیر جابجایی هیو در دوره تناوب T=2/15,2/2,2/25s در می‌یابیم که بیشترین مقادیر جابجایی مربوط به دوره تناوب ۲/۲ ثانیه بدلیل وقوع تشدید در سیستم می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه مقادیر جابجایی هیو بر حسب زمان، حاصل از تست مدل در دوره‌های موج T=2/15,2/2,2/25s

۲-۶- نمودار RAO سیستم و اعتبارسنجی نتایج

با استفاده از نتایج بدست آمده از ثبت حرکات مدل در دوره‌های تناوب مختلف موج و استخراج نمودار شکل ۱۰ که مربوط به رفتار RAO سیستم می‌باشد، می‌توان دریافت که نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در مقایسه با نتایج تحلیل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. همانطور که از این نمودار نیز برمی‌آید در دوره تناوب ۲/۲ ثانیه (فرکانس ۰/۴۵۴ هرتز) بدلیل وقوع پدیده تشدید بیشترین مقدار جابجایی برای سیستم بدست آمده است. مشابه نتایج عددی در تست تجربی نیز پدیده تشدید در نزدیکی دوره تناوب موج ۲/۲ ثانیه اتفاق می‌افتد. تفاوت اندک بین این اعداد ناشی از اختلاف اندک در ابعاد مدل اصلی و مدل ساخته شده و نیز برخی افت‌ها و خطاهای موجود در سیستم می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار RAO، حاصل از نتایج عددی و نتایج حاصل از تست مدل

۳-۶- بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها

در این بخش به بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها و تحلیل عدم قطعیت برای اطمینان از صحت آزمایش‌های پرداخته شده است. همانطور که اشاره شد شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی و با استفاده از روش المان مرزی به کمک نرم افزار انسیس آکوا انجام شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه در شرایط عملکردی با استفاده از این نتایج می‌توان محدوده وسیع‌تری از شرایط عملکردی تجهیزات را پیش‌بینی کرد. محاسبه عدم قطعیت و یا انحراف معیار داده‌ها برای تعیین محدوده خطا با بیشترین احتمال وقوع انجام می‌شود. پس از انجام آزمایش‌ها و تکرارپذیری آن و حذف داده‌های غیر قابل قبول نتایج گزارش شده است.

نتایج مربوط به جابجایی سیستم با توجه به پاسخ‌های زمانی ثابت توسط وسایل اندازه‌گیری ثبت می‌شود، همچنین محدوده دوره تناوب با توجه به موقعیت وقوع تشدید در سیستم تعیین می‌شود. در انجام این آزمایش‌ها، جابجایی سیستم برای دوره‌های تناوب ۹۴/.، ۱/۲۳، ۱/۷۶، ۲/۲ و ۲/۴ ثانیه مطابق با آزمون‌های استاندارد یادشده در دستگاه اندازه‌گیری می‌شود تا به وسیله آن بتوان روند تغییرات حرکتی سیستم را به ازای اختلاف دوره‌های تناوب مختلف بررسی کرد. انجام آزمایش‌ها با تکرارپذیری و محاسبه عدم قطعیت صورت گرفته است. نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌ها به ازای دوره‌های تناوب مذکور در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده به محاسبه انحراف معیار استاندارد برای هر آزمایش و تعیین عدم قطعیت استاندارد به منظور پیش‌بینی محدوده خطا با بیشترین احتمال وقوع پرداخته شده است. انحراف استاندارد میانگین مطابق با رابطه ۷ تعریف می‌شود که در آن N بیانگر تعداد تکرار آزمایش، δ بیانگر انحراف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

معیار استاندارد است و به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود. در این رابطه ، ζ_i نشان‌دهنده جابجایی اندازه‌گیری شده و ζ_m نشان‌دهنده متوسط جابجایی اندازه‌گیری شده است [۲۱].

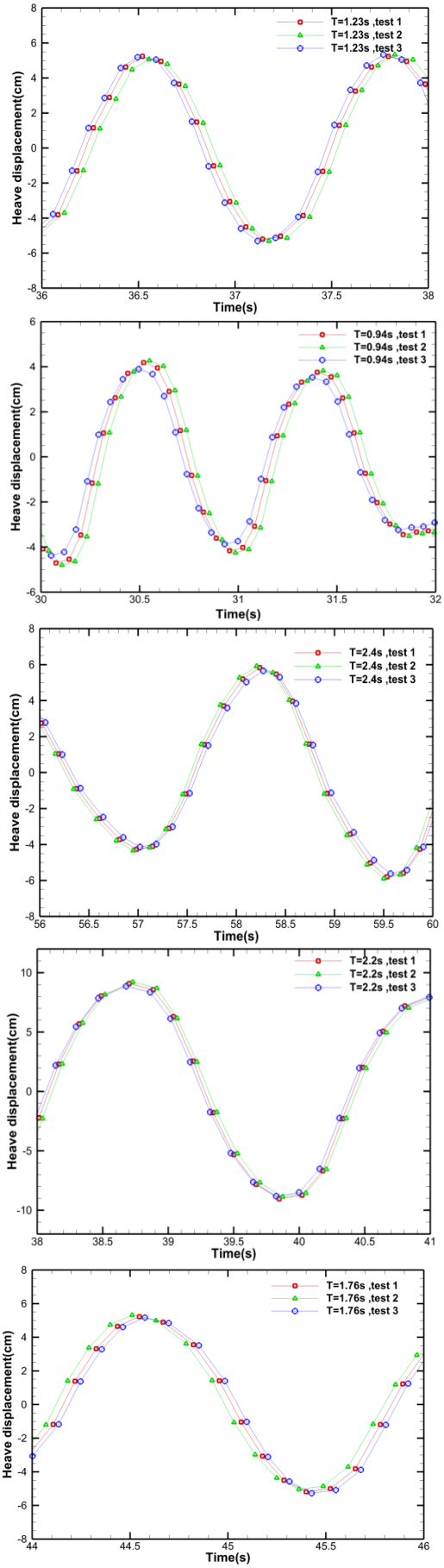
$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \delta_i}{N} \quad (۷)$$

$$\delta = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{k} (\zeta_i - \zeta_m)^2 \right\}^{1/2} \quad (۸)$$

بدین ترتیب مقدار عدم قطعیت استاندارد حاصل از تحلیل و بررسی آزمایش‌ها بصورت رابطه زیر بیان می‌گردد[۲۲]:

$$u_s = \frac{\delta}{\sqrt{N}} \quad (۹)$$

در شکل ۱۲ مقادیر انحراف استاندارد میانگین حرکات مدل حاصل از بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها در دوره تناوب ۰/۹۴ ، ۱/۲۳، ۱/۷۶، ۲/۲ و ۲/۴ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ مقادیر انحراف استاندارد میانگین و عدم قطعیت استاندارد محاسبه شده به ازای دوره‌های تناوب مختلف برای مقادیر جابجایی اندازه‌گیری شده مشخص شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول حد قابل قبول برای مقادیر انحراف استاندارد میانگین کمتر از ۰/۱ (معادل ۱۰ درصد) و مقادیر عدم قطعیت استاندارد کمتر از ۰/۰۵ (معادل ۵ درصد) حاکی از این موضوع است که نتایج تحلیل و بررسی در خصوص تکرارپذیری آزمایش‌ها از مقبولیت کافی برخوردار می‌باشد.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج حاصل از تکرار آزمایش مدل (Test 1,2,3) در دوره تناوب T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s

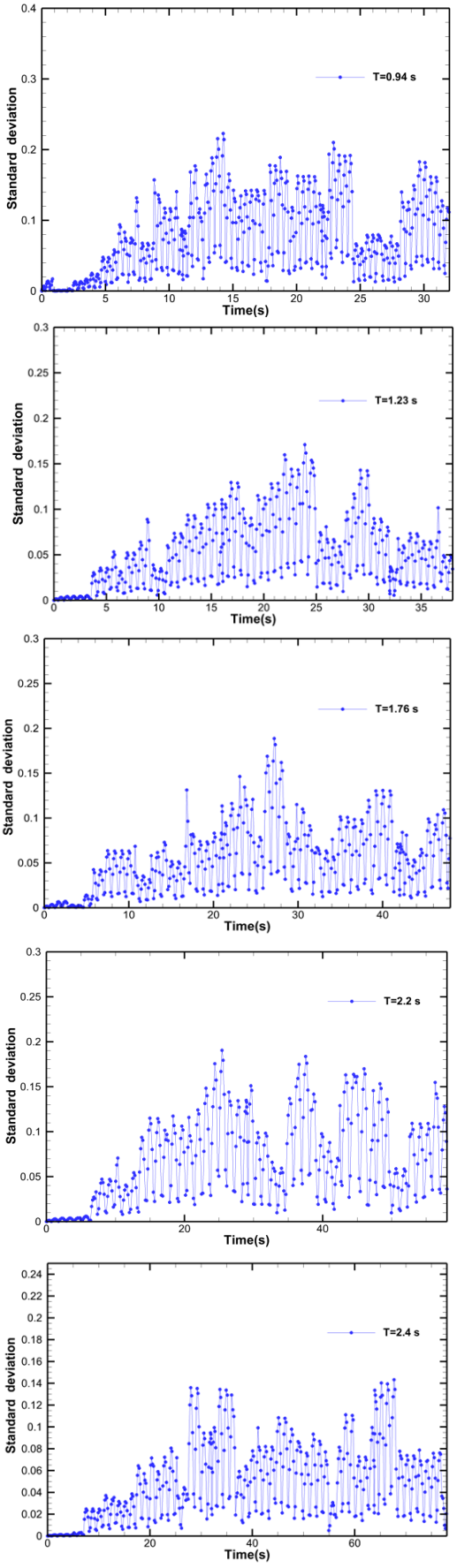
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

جدول ۲- نتایج حاصل از بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها شامل انحراف استاندارد و عدم قطعیت استاندارد

دوره تناوب موج (ثانیه)	انحراف استاندارد میانگین	عدم قطعیت استاندارد
۰/۹۴	۰/۰۶۵	۰/۰۳۷
۱/۲۳	۰/۰۵۴	۰/۰۳۱
۱/۷۶	۰/۰۵۵	۰/۰۳۲
۲/۲	۰/۰۶۲	۰/۰۳۵
۲/۴	۰/۰۴۹	۰/۰۲۸

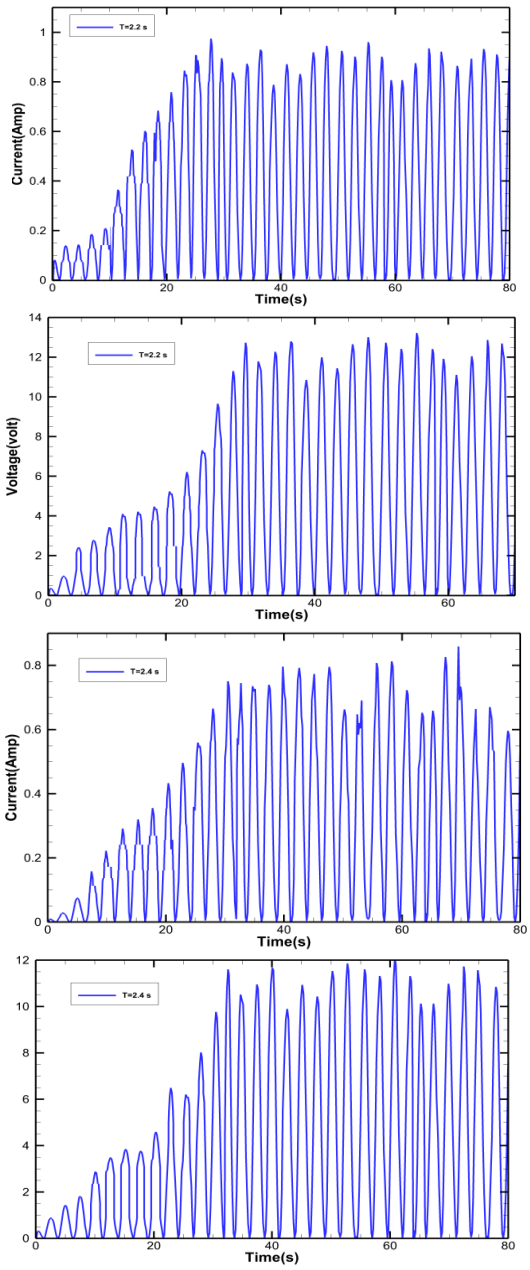
۴-۶- ولتاژ، جریان و توان الکتریکی خروجی

در این مرحله عملیات تست مدل در چند حالت انجام گرفته است و نتایج مورد نظر استخراج شده است. در گام نخست سیستم بصورت یک درجه آزادی و در گام بعد سیستم بصورت دو درجه آزادی آزمایش شده است. برای این منظور مقایسه‌ای بین توان خروجی سیستم در دو حالت انجام گرفته است. همچنین با تغییرات دوره تناوب موج و ارتفاع موج آزمایش‌ها تکرار و نتایج مورد نیاز استخراج شده است. در نمودارهای شکل ۱۳ و ۱۴ نتایج آزمایش‌های مربوط به سیستم در حالت دو درجه آزادی به ازای ۵ دوره تناوب T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. همانطور که اشاره شد مطالعه نتایج در این محدوده از دوره تناوب به جهت بررسی وقوع تشدید دارای اهمیت می‌باشد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ شامل نمودارهای مقادیر ولتاژ و جریان خروجی سیستم مربوط به هر دوره تناوب موج می‌باشد. همانطور که از این نمودارها نیز مشخص است در دوره تناوب ۲/۲ ثانیه (فرکانس موج ۰/۴۵۴هرتز) بدلیل وقوع تشدید مقادیر ولتاژ خروجی در مقایسه با دوره‌های تناوب دیگر بیشتر است. مقدار ارتفاع موج در این آزمایش نیز برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



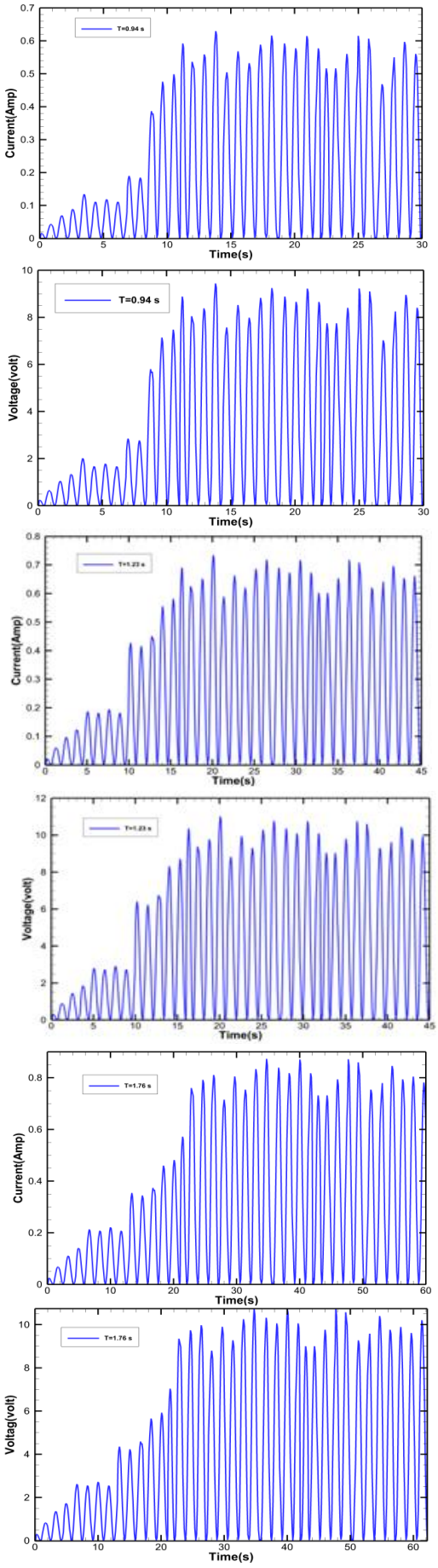
شکل ۱۲- مقادیر انحراف استاندارد میانگین حرکات مدل حاصل از بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها در دوره تناوب T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]



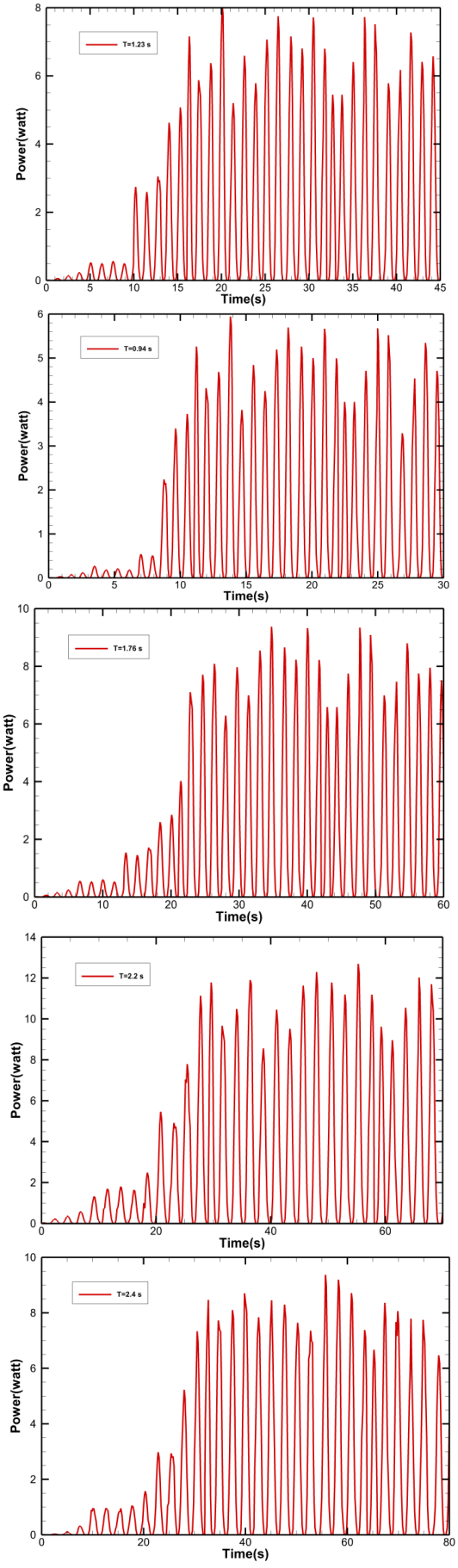
ادامه شکل ۱۳- نمودارهای زمانی ولتاژ و جریان خروجی، حاصل از نتایج تست مدل(T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s, H=10cm)

همچنین با توجه به نتایج بدست آمده مربوط به مقادیر جریان و ولتاژ خروجی سیستم می‌توان مقدار توان الکتریکی خروجی سیستم حاصل از نتایج تست مدل در دوره‌های تناوب مختلف را تعیین نمود. این نتیجه بصورت نمودارهای شکل ۱۴ در دوره‌های تناوب مختلف موج نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای نتایج این شکل نیز مشخص است، در دوره تناوب ۲/۲ ثانیه (فرکانس موج ۰/۴۵۴هرتز) بدلیل وقوع تشدید مقادیر جریان و ولتاژ خروجی در مقایسه با دوره‌های تناوب دیگر بیشتر است.



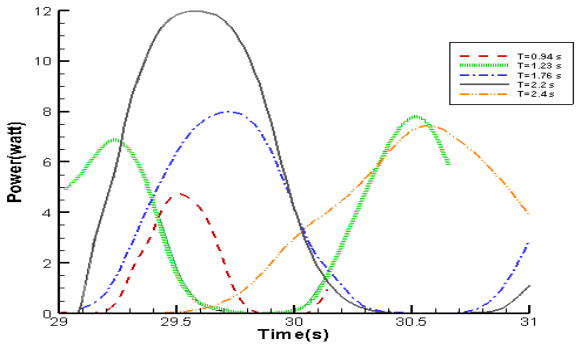
شکل ۱۳- نمودارهای زمانی ولتاژ و جریان خروجی، حاصل از نتایج تست مدل(T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s, H=10cm)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]



شکل ۱۴- نمودارهای زمانی توان خروجی سیستم، حاصل از نتایج تست مدل (T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s, H=10cm)

در شکل ۱۵ نمودار مقادیر توان الکتریکی خروجی سیستم به ازای ۵ دوره تناوب مورد آزمایش T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s به طور یکجا در محدوده زمانی ۲۹ تا ۳۱ ثانیه نشان داده شده است. در این شکل تغییرات مقادیر نظیر هر نمودار در هر دوره تناوب بصورت جداگانه نشان داده شده است. همانطور که از این نمودار نیز بر می‌آید جریان خروجی سیستم در محدوده صفر تا ۱ آمپر و ولتاژ خروجی در محدوده صفر تا ۱۴ ولت تغییر می‌کند. همچنین با مقایسه نمودارهای نتایج مربوط به دوره‌های تناوب مختلف موج می‌توان دریافت که بیشترین ولتاژ و توان خروجی مربوط به دوره تناوب در حالت وقوع تشدید (T=2/2s) می‌باشد.

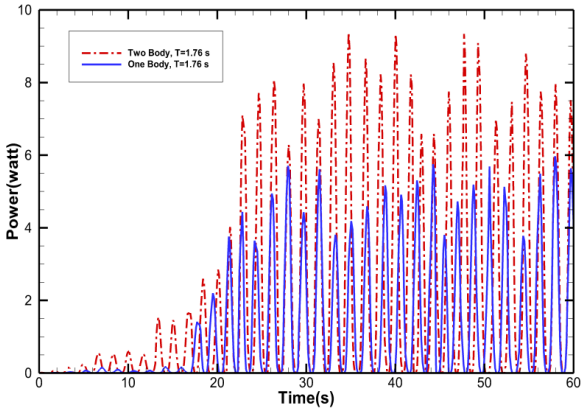


شکل ۱۵- نمودار مقایسه توان خروجی سیستم بر حسب زمان در دوره تناوب T=0/94,1/23,1/76,2/2,2/4s

۵-۶- مقایسه نتایج حاصل از تست سیستم یک و دو درجه آزادی

به جهت مقایسه سیستم در حالات یک و دو درجه آزادی، توان خروجی سیستم در دوره تناوب T=1/76s مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مقایسه این حالات مطابق با شکل ۱۶ نشان می‌دهد توان خروجی سیستم با مشخصات مشابه در حالت دو درجه آزادی بیشتر از حالت یک درجه آزادی خواهد بود. نتایج حاصل از آزمایش مدل نشان می‌دهد که مقدار توان خروجی در سیستم دو درجه آزادی تقریباً دو برابر مقدار توان خروجی در سیستم یک درجه آزادی می‌باشد. مقدار ارتفاع موج در این آزمایش نیز برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]



شکل ۱۶- نمودار مقایسه توان خروجی سیستم ۱ و ۲ درجه آزادی بر حسب زمان در دوره تناوب T=1/76

۷- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج حاصل از مدل سازی سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای با استفاده از نتایج تحقیق مشابه مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت.

جهت بررسی عملکرد سیستم در حالات و شرایط مختلف موج، مراحل ساخت و آزمایش مدل انجام گرفته است و نتایج ارزیابی سیستم توسط نمودارهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد در دوره تناوب موج ۲/۲ ثانیه (فرکانس موج ۰/۴۵۴هرتز) بدلیل وقوع تشدید در سیستم مقادیر جریان، ولتاژ و توان خروجی سیستم در مقایسه با دوره‌های تناوب دیگر بیشتر است. مقایسه نتایج عددی و نتایج حاصل از تست مدل، حاکی از وجود اختلاف جزئی بین نتایج می باشد. این تفاوت ناشی از اختلاف اندک در ابعاد مدل عددی و مدل ساخته شده و نیز برخی افت‌ها و خطاهای موجود در سیستم می‌باشد.

کلید واژگان

1- Floating-Point Absorber
2- Heave
3- ANSYS-AQWA
4- Panel method
5- Alves
6- Emmanuel
7- Computational Fluid Dynamics
8- Point Absorber Wave Energy Converter
9- Backer
10- WAMIT
11- AQWA
12- Ricci
13- Response Amplitude Operator
14- Bozzi
15- Pastor
16- Ocean Power Technology
17- Jun Koh
18- Babarit
19- Power Take Off
20- Amiri
21- Liang
22- Falcao
23- Floating body
24- Submerged body
25- Mooring
26- Yu and Li
27- Floating Section
28- Submerged Section
29- Li et al.

منابع:

1-M. Alves, A. Brito-Melo, and A. J. N. A. Sarmento, *Numerical Modelling of the Pendulum Ocean Wave Power Converter using a Panel Method*. Twelfth Int. Offshore Polar Eng. Conf. 26-31 May, Kitakyushu, Japan, vol. 12, no. January, pp. 655–661, 2002.

2- E. B. Agamloh, A. K. Wallace, and A. von Jouanne, *Application of fluid-structure interaction simulation of an ocean wave energy extraction device*. Renew. Energy, vol. 33, no. 4, pp. 748–757, 2008.

3- G. De Backer, *Hydrodynamic Design Optimization of Wave Energy Converters Consisting of Heaving Point Absorbers*. Ghent University, 2009.

4- J. D. R. De Backer G., M. Vantorre, R. Banasiak, C. Beels, *Numerical Modelling of Wave Energy Absorption By a Floating Point Absorber System*. Proc. Seventeenth Int. Offshore Polar Eng. Conf. 1-6 July, Lisbon, Port., 2007.

5- G. De Backer, M. Vantorre, C. Beels, J. De Rouck, and P. Frigaard, *Performance of closely spaced point absorbers with constrained floater motion*. 8th EWTEC, pp. 806–817, 2009.

6- I. Touzón González, P. Ricci, M. J. Sánchez Lara, G. Pérez Morán, and F. Boscolo Papo, *Design, Modelling and Analysis of a Combined Semi-Submersible Floating Wind Turbine and Wave Energy Point-Absorber*. Vol. 8 Ocean Renew. Energy, vol. 8, p. V008T09A085, 2013.

7- S. Bozzi, A. M. Miquel, A. Antonini, G. Passoni, and R. Archetti, “Modeling of a point absorber for energy conversion in Italian seas” Energies, vol. 6, no. 6, pp. 3033–3051, 2013.

8- J. Goggins and W. Finnegan, *Shape optimisation of floating wave energy converters for a specified wave energy spectrum*. Renew. Energy, vol. 71, pp. 208–220, 2014.

9- J. Pastor and Y. Liu, *Power Absorption Modeling and Optimization of a Point Absorbing Wave Energy Converter Using Numerical Method*. J. Energy Resour. Technol., vol. 136, no. 2, p. 021207, 2014.

10- H. J. Koh, W. S. Ruy, I. H. Cho, and H. M. Kweon, *Multi-objective optimum design of a buoy for the resonant-type wave energy converter*. J. Mar. Sci.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]

Technol., vol. 20, no. 1, pp. 53–63, 2015.
11-G. Duclos, A. Babarit, and A. H. Clément, *Optimizing the Power Take Off of a Wave Energy Converter With Regard to the Wave Climate*. J. Offshore Mech. Arct. Eng., vol. 128, no. 1, p. 56, 2006.
12- A. Babarit, J. Hals, A. Kurniawan, J. Krokstad, and T. Moan, *Power Absorption Measures and Comparisons of Selected Wave*. ASME 2011 30th Int. Conf. Ocean. Offshore Arct. Eng. OMAE2011, 2011.
13- A. Amiri, R. Panahi, and S. Radfar, *Parametric study of two-body floating-point wave absorber*. J. Mar. Sci. Appl., vol. 15, no. 1, pp. 41–49, 2016.
14- C. Liang and L. Zuo, *On the dynamics and design of a two-body wave energy converter*. Renew. Energy, vol. 101, pp. 265–274, 2017.
15- D. V. Evans and R. Porter, *Wave energy extraction by coupled resonant absorber*. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., vol. 370, no. 1959, pp. 315–344, 2012.
16- U. A. Korde, *Systems of reactively loaded coupled oscillating bodies in wave energy conversion*. Appl. Ocean Res., vol. 25, no. 2, pp. 79–91, 2003.
17- A. F. d. O. Falcão, *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010.
18- J. Van Den Berg, P. Ricci, M. Santos, A. Rico, and J. Lopez, *Hydrodynamic performance of heaving wave energy converters in wave climates*. 3rd Int. Conf. Ocean Energy, pp. 1–7.
19- J. N. Newman, *Wave Effects on Multiple Bodies*. Hydrodyn. Sh. Ocean Eng., vol. 2001, no. April, pp. 3–26, 2001.
20- Y.-H. Yu and Y. Li, *A RANS Simulation of the Heave Response of a Two-Body Floating Point Wave Absorber*. Proc. 21st Int. Offshore Polar Eng. Conf., no. March, pp. 1–10, 2011.
21- Y. Oghabneshin. S. Sedighi, M. Zabetian, A. Mohammad Ebrahim, *Experimental and numerical investigation of the effect of pressure on in-cylinder swirl flow using swirl meter*". Modares Mechanical Engineering. 2017; 17 (3) :327-335.
22- ITTC, *ITTC – Example for Uncertainty Analysis of Resistance Tests in Towing Tanks*. 27th Int. Towing Tank Conf., 2014.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.10.9]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.95]