بررسی تاثیر هندسه بویه بر توان مبدل جاذب انرژی موج با استفاده از مهار کتنری

شادی گودرزی [۱] ، مهدی حمیدی [۲*] ، رضا دزواره رسنانی [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ shadigoodarzi991@gmail.com
[۲] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ hamidi@nit.ac.ir
[۳] استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ rdezvareh@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۲

کلمات کلیدی:
مبدل جاذب انرژی موج
مهار کتنری
سیستم جاذب
تئوری تفرق
نرم‌افزار انسیس اکوا

چکیده

در مبدل‌های دو بدنه‌ای جاذب نقطه‌ای موج، جابجایی نسبی بدنه شناور و مغروق عامل اصلی تولید جریان الکتریسته می‌باشد. هندسه بدنه شناور نسبت به بدنه مغروق تاثیر بیشتری بر میزان انرژی استحصالی می‌گذارد. دو بدنه مغروق و شناور بوسیله سیستم فنر- میراگرخطی به یکدیگر متصل می‌شود و کل سیستم مبدل به وسیله مهارهای کتنری به بستر دریا وصل شده‌است. با توجه به تاثیر مستقیم محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی در حل معادلات دینامیکی، در تحقیق حاضر به محاسبه جرم‌افزوده و میرایی به روش المان مرزی با استفاده از نرم‌افزار انسیس-اکوا پرداخته شده است. همچنین تاثیر هندسه بویه شناور بر میزان پارامترهای هیدرودینامیکی و توان تولید انرژی از مبدل، با آنالیز در حوزه زمان و فرکانس صورت گرفته است. مقایسه نتایج عددی، با نتایج مدل آزمایشگاهی که در سال 2011 توسط محققین دانشگاه سندیاگو انجام شد، صحت مدلسازی عددی انجام شده را نشان‌می‌دهد. با توجه به نتایج با افزایش قطر بویه شناور، توان خروجی نیز افزایش خواهد یافت به شکلی که به ازای هر ۲ متر افزایش قطر بویه توان تولید انرژی به اندازه ۲۰ درصد زیاد می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد برای بویه شناور میزان توان تولید انرژی با هندسه نیم مخروطی ۱۷ درصد بیشتر از هندسه نیمکروی می‌باشد.

Investigation of the Float Body Geometry on the Power of Wave Energy Absorber Converter Using Mooring Catenary

Shadi goodarzi[1], Mehdi Hamidi[2*], Reza Dezvareh[3]

[1] M.Sc. student, Babol Noshirvani University of Technology; shadigoodarzi991@gmail.com
[2] Assistant Prof. Babol Noshirvani University of Technology; hamidi@nit.ac.ir
[3] Assistant Prof. Babol Noshirvani University of Technology; rdezvareh@nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 8 Apr. 2019
Accepted: 3 Aug. 2019

Keywords:
Wave energy convector
Catenary mooring
Power take off
Diffraction
Ansys aqwa

ABSTRACT

This paper presents the effect of hydrodynamic parameters of the two-body converters of a point wave absorber on the amount of power output. This converter includes two submerged and floating bodies which are connected to the spring-damper system. The whole of the converter is connected to the sea bed by mooring catenary. the relative displacement of the floating body and the submerged body is the main factor in generating electrical energy. Since the calculation of hydrodynamic coefficients has a significant effect on the solution of dynamic equations, this study focused on the calculation of added mass and hydrodynamic damping by boundary element method using the ANSYS-AQWA software. Also, this paper investigates the effect of floating borehole geometry on the hydrodynamic parameters and the extracted power of the converter using complementary analysis on the domain of time and frequency. Comparison of numerical simulation outputs and the results from the laboratory work which had carried out by Sandiego researchers in 2011, shows the suitable accuracy of the simulation. According to the results, with the two meters increase in buoy diameter, the power output will increase by 20%, and the output power for the half- conical is 17% more than the hemisphere.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

۱ - مقدمه

اگرچه سوخت‌های فسیلی همچنان منابع اصلی تامین انرژی برای چند دهه آینده می‌باشد، اما در اوایل سال ۱۹۷۰ آشکار شد که این نوع سوختها در آینده‌ای نه چندان دور تمام خواهند شد. امروزه به دلیل افزایش تقاضای انرژی در سراسر جهان و توجه ویژه به مسائل زیست محیطی، انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت زیادی برخوردار شده‌اند. انرژی نهفته در امواج دریا یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر بشمار می‌آید. از مزایای عمده‌ی انرژی امواج نسبت به دیگر انرژی-های تجدیدپذیر، مقدار چگالی بالای انرژی بر واحد سطح است[۱]. توربین‌های بادی فراساحلی و مبدل‌های جاذب انرژِی امواج، به منظور استحصال انرژی از دریا بیشترین موارد استفاده را دارا می‌باشند. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی توربین های بادی فراساحلی صورت گرفته است و بهینه‌سازی و کنترل ارتعاشات سازه آن‌ها از اولویت تحقیقاتی مرتبط با این موضوع می-باشد [۲-۵]. مبدل جاذب انرژی امواج سیستمی است که انرژی موج را از طریق امواج برخوردی به آن جذب نموده و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. این سیستم شامل مبدل‌های تضعیف کننده[۱]، ستون نوسانگر آب[۲]، سامانه اختلاف فشار مستغرق[۳]، مبدل-های بالارونده[۴]، مبدل جاذب نقطه‌ای[۵] و مبدل‌های پدالی[۶] می-باشد[۶-۷]. مبدل جاذب نقطه‌ای، به دو دسته یک بدنه‌ای و چند بدنه‌ای تقسیم می‌شود و از ساده‌ترین نوع مبدل‌ها بشمار می‌آید. در این مبدل به دلیل کوچک بودن حجم مبدل، عموما میزان جذب انرژی در آن کم بوده ولی مقدار انرژی جذبی توسط آنرا می‌توان با استفاده از سیستم‌های کنترلی افزایش داد. اولین گام برای استفاده بهینه از انرژی امواج، در سال ۱۹۴۷ توسط یوشی‌موسدا، مهندس ژاپنی برداشته شد[۸]. همچنین اولین نظریه در راستای استفاده از انرژی امواج توسط گرید (۱۹۷۷)، در پاریس مطرح شد[۹]. مطالعات و تحقیقات ابتدایی به‌منظور بررسی مفاهیم هیدرودینامیک و سیستم‌های جذب انرژی موج توسط بدل و فالتینسن[۱۰]، ایوانز[۱۱] و می[۱۲] انجام گردید. این محققین ایده‌ها و راهکارهایی را برای جذب انرژی موج و تئوری‌های جذب حداکثری انرژی بر روی جسم متقارن و مبدل جاذب نقطه‌ای تک بدنه مطرح کردند. نیومن و همکاران(۱۹۷۶)، با استفاده از روش-های عددی، پژوهشی در زمینه جذب انرژی امواج و تبدیل آن به انرژی الکتریسته انجام دادند و بعد از آن نیز ساخت مدل به عنوان موثرترین فعالیت عملی و کاربردی در این زمینه مورد توجه قرار گرفت[۱۳]. فالتینسن (۲۰۰۰)، با استفاده روش‌های عددی ثابت کرد که یک مبدل دو بدنه‌ای جاذب نقطه‌ای، عملکرد بهتری در تولید انرژی نسبت به سایر مبدل‌های تک بدنه‌ای دارد[۱۴]. گروهی از محققین دانشگاه آپسالا(۲۰۰۴)، مطالعه‌ای به منظور افزایش راندمان بویه شناور و همچنین بررسی اثرات مبدل جاذب نقطه‌ای بر محیط زیست انجام دادند[۱۵]. اریکسون و همکاران(۲۰۰۵)، اندرکنش مبدل جاذب موج نقطه‌ای در درجه آزادی قائم (هیو)[۷] را بر اساس تئوری پتانسیل و با استفاده از سیستم ژنراتور خطی متصل به بستر دریا مورد بررسی قرار دادند. آنها به بررسی میزان توان خروجی در هنگام پدیده تشدید با در نظر گرفتن قطرهای مختلف مبدل پرداختند[۱۶]. گومز و همکاران(۲۰۱۰)، با استفاده از نرم‌افزار WAMIT، ضرایب هیدرودینامیکی مبدل جاذب نقطه‌ای آی‌پی‌اس[۸] را محاسبه کرده و به بهینه‌سازی این مبدل پرداختند[۱۷]. لی و همکاران(۲۰۱۰)، به مطالعه آزمایشگاهی مبدل جاذب نقطه‌ای FPA در مقیاس ۱:۱۰۰ و بدون سیستم جاذب PTO[۹] در استخر موج دانشگاه برکلی با هدف تجزیه و تحلیل شرایط موج پرداختند[۱۸]. لی و یی‌هسیانگ (۲۰۱۱)، آزمایشاتی بر روی مدل آزمایشگاهی مبدل به همراه سیستم جاذب و با مقیاس ۱:۳۳ در دانشگاه برکلی انجام دادند. طی سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ یک سری تحلیل‌های عددی با روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از معادلات و روابط ناویر استوکس بر روی این مبدل و بدون سیستم مهار انجام شد. این تحلیل‌ها نشان داد توان استحصالی از موج با مجذور سرعت نسبی بین دو بدنه شناور و مغروق رابطه مستقیم دارد[۱۹-۲۰]. نظری و همکاران(۲۰۱۳)، به تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی مبدل جاذب نقطه‌ای در منطقه عسلویه خلیج فارس پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که تغییرات شکل و اندازه بویه شناور تاثیر مستقیم بر روی فرکانس بویه دارد. آنها همچنین نشان دادند تغییر شکل بویه استوانه‌ای مسطح به بویه مخروطی استوانه‌ای باعث کاهش پنجاه درصدی ضریب درگ و افزایش بیست درصدی دامنه متوسط حرکت در راستای هیو و سرانجام افزایش توان بویه در حدود ۴۵ وات می‌شود[۲۱]. هیوک و همکاران (۲۰۱۳)، به مطالعه عددی بررسی پدیده تشدید در راستای قائم بویه پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با توجه به شرایط، میزان توان خروجی در جاذب سه برابر مقدار متوسط آن افزایش یافته‌است[۲۲]. جی پاسور و همکاران (۲۰۱۴)، پژوهشی در دانشگاه لوئیزیانا، بر روی اشکال مختلف مبدل جاذب انرژی انجام دادند، شبیه سازی عددی با نرم افزار المان مرزی انسیس-آکوا و به منظور ارزیابی و بهینه‌سازی یک مبدل جاذب نقطه ای تک بدنه‌ای انجام گرفته است. در این تحقیق یک مدل با دامنه فرکانس خطی برای پیش بینی رفتار مبدل جاذب نقطه‌ای ایجاد شد. نتایج تحقیق نشان داد در استحصال انرژی امواج، همخوانی قطر بویه با طول موج باعث افزایش حرکت هیو و کاهش اثرات منفی حرکت رول خواهد شد. همچنین میزان انرژی استحصالی بویه مخروطی شکل بیشتر از بویه کروی شکل می باشد[۲۳]. رول‌کلی و همکاران(۲۰۱۴)، به بررسی عددی مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای در سیستم یک و سه درجه آزادی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

و در دو حالت، با سیستم جاذب و بدون سیستم جاذب (مکانیزم تولید برق) با استفاده ازکد وکسیم[۱۰] در نرم افرار سیمولینک متلب پرداختند. در تحقیق آنها نتایج حوزه زمان در درجات آزادی برای سه کد OrcaFlex , WaveDy, WEC-SIM ارائه شده که تطابق خوبی بین نتایج برقرار است[۲۴]. مالکا (۲۰۱۴)، به طراحی و بررسی عملکرد مبدل جاذب نقطه‌ای شناور در شرایط نزدیک ساحل با استفاده از کد تجاری المان محدود در فضای نرم افزار سیمولینک متلب پرداختند. آنها در این پژوهش به بررسی تاثیر شکل و شرایط شناوری بویه پرداختند و نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که بویه کروی شکل رفتار بهتری نسبت سایر هندسه‌ها دارد[۲۵].میشلن و لاسون (۲۰۱۵)، به مدلسازی عددی مبدل انرژی موج شناور ساخته شده در دانشگاه می‌نوت ایرلند پرداختند. این مبدل با استفاده از مهارهای افقی و قائم به کف مخزن مهار شده است. مبدل آزمایشگاهی را با استفاده از نرم‌افزار FAST و WEC-SIM برای انجام تست فروپاشی موج[۱۱]، شبیه‌سازی موج-های منظم و نامنظم شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد اختلاف کمی بین آنها وجود دارد[۲۶]. شادمان و همکاران (۲۰۱۸)، به بهینه‌سازی شکل هندسی مبدل جاذب نقطه‌ای تک بدنه‌ای با یک درجه آزادی در راستای قائم (Heave) با استفاده از روش‌های تحلیل آماری در دامنه فرکانس پرداختند. فرایند بهینه‌سازی بر روی این مبدل، برای یک ناحیه ساحلی در نزدیک سواحل ریودژانیرو برزیل اعمال‌شده‌است. ویژگی‌های دریا با استفاده از موج پنج ساله پیش‌بینی شد و هندسه بهینه‌شده با اجرای چندین شبیه‌سازی در حوزه فرکانس در نرم-افزار انسیس اکوا تعیین گردید و از طریق نرم‌افزار مینی‌تب (MINITAB) برای تعیین هندسه بهینه مورد استفاده قرار گرفت. دو مزیت مهم این روش بهینه سازی کاهش زمان محاسبات و امکان تجزیه و تحلیل پارامتری بر روی هندسه مبدل می‌باشد[۲۷]. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد بیشتر تمرکز تحقیقات بر روی مبدل تک بدنه‌ای و یا مدلسازی آزمایشگاهی مبدل دو بدنه‌ای بوده است. همچنین در سال های اخیر، توجه کمی به تاثیر نوع مهار و برخی پارامترهای هیدرودینامیکی از قبیل جرم‌افزوده و ضریب میرایی هیدرودینامیکی، بر روی توان خروجی مبدل شده است. مبدل مورد استفاده در این پژوهش از نوع مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای (FPA)[۱۲] می‌باشد که به روش مدار تحت فشار هیدرولیک، انرژی بدست آمده از موج را ذخیره می‌کند. این دستگاه از دو بدنه شناور(بویه) و بدنه مغروق(اسپار) تشکیل شده که بدنه شناور در تماس مستقیم با موج قرار می‌گیرد و انرژی موج را جذب کرده و با فرایندی که روی آن انجام می‌دهد آن را به سیستم‌های داخلی که شامل سیستم‌های تبدیل، ذخیره‌سازی و کنترل انرژی می‌باشد منتقل می‌کند. هدف این مطالعه، تمرکز بر روی حرکت مبدل در راستای قائم(هیو) می باشد. دو بدنه (بویه شناور و بدنه مغروق)، به وسیله سیستم خطی فنر- دمپر بهم متصل شده‌اند. همچنین در این تحقیق به بررسی تاثیر ارتفاع و دوره موج و نیز شکل و سایز بویه شناور پرداخته خواهد شد.

شکل ۱- مبدل جاذب نقطه‌ای OPT [۹]

۲ - معادلات اساسی حاکم بر مبدل جاذب نقطه‌ای

با توجه به ابعاد جسم و مشخصات موج اعمالی، پارامتر تفرق $\left(D/\lambda\right)$ و پارامتر ویسکوزیته $\left(H/D\right)$ که به ترتیب کوچکتر از ۰/۲و ۱/۵ می باشد. بنابراین می‌توان از هر دو تئوری تفرق و موریسون برای تحلیل هیدرودینامیکی سیستم مورد نظر استفاده کرد. D قطر سازه و λ طول موج و H ارتفاع موج می‌باشد. تئوری تفرق به دلیل استفاده از ماهیت جریان‌های پتاسیل دقت بهتری در محاسبه ضرایب و نیروهای هیدرودینامیکی دارد. به همین علت در این مطالعه از نرم‌افزار انسیس- آکوا که بر اساس تئوری تفرق می باشد، استفاده شده است. همچنین این بسته نرم افزاری می‌تواند نیروهای هیدرودینامیکی، جرم افزوده و میرایی را در شش درجه آزادی محاسبه کند. در تئوری تفرق، پتانسیل سرعت با فرض سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر و غیرچرخشی بدست می‌آید.

$$\Phi(x,y,z,t)=\Phi_r+\Phi_d+\Phi_i=\Phi_a=\Phi_r \qquad (۱)$$

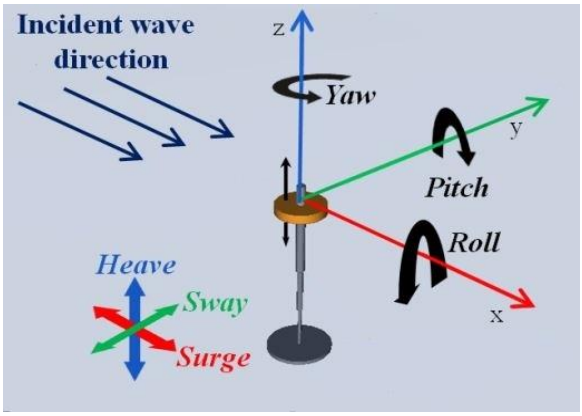
$$\Phi(x,y,z,t)=\mathrm{Re}\left\{\sum_{j=1}^{6}\begin{pmatrix}\xi_j\Phi_r(x,y,z)+\\ A\,\Phi_a(x,y,z)\end{pmatrix}e^{(-iwt)}\right\} \qquad (۲)$$

$$j=(1,2,...6)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

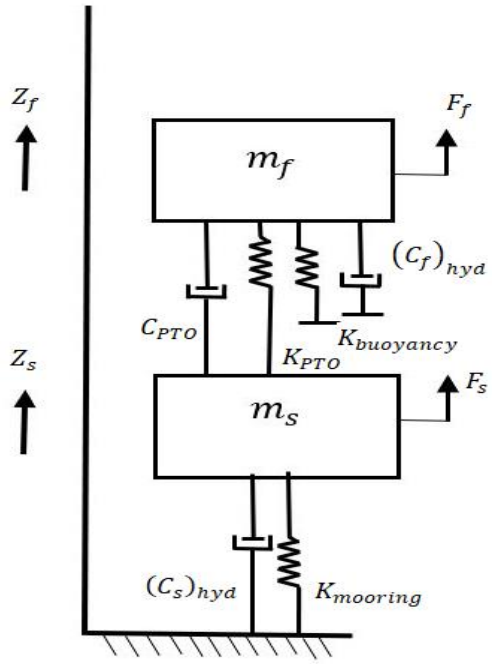
در رابطه (۱)، Φ تابع پتاسیل کل حاصل از یک موج خطی منظم به سیستم شناور، Φ_r پتاسیل موج تابشی، Φ_d پتانسیل موج تفرق و Φ_i پتاسیل موج برخوردی است. در رابطه شماره (۲)، A دامنه موج و w فرکانس موج برخوردی، ξ_j مشخص کننده دامنه مختلط نوسانات و جابجایی‌های جسم شناور در شش درجه آزادی می‌باشد. شکل ۲ درجات آزادی مبدل را در جهات X[۱۳]، Y[۱۴]، Z[۱۵]، R_X[۱۶]، R_Y[۱۷] و R_Z[۱۸] نشان می‌دهد.



شکل ۲- درجات آزادی مبدل جاذب نقطه‌ای[۲۴]

در تئوری تفرق با ارضا معادله لاپلاس پتاسیل سرعت در محیط سیال و اعمال شرایط مرزی سطح آب، شش جز نیرو و ممان بدست می‌آید. با معلوم شدن پارامترهای هیدرودینامیکی معادله حرکت جسم شناور براساس قانون دوم نیوتون تنظیم می‌شود.

مبدل جاذب نقطه‌ای FPA در این پژوهش از دو بخش بویه شناور و بدنه مغروق تشکیل شده‌است که به وسیله سیستم فنر- میراگر بهم متصل شده‌اند. بویه شناور که در تماس مستقیم با موج برخوردی قرار دارد بوسیله سیستم ترکیبی فنر- میراگر(مکانیزم PTO) به بدنه مغروق متصل شده‌است. توان استحصالی از موج ناشی از جابجایی نسبی بین دو بدنه نسبت به یکدیگر در راستای هیو (قائم) است. رابطه (۳)، معادله حرکت جسم در دامنه زمان می‌باشد که در این رابطه M وزن جسم، Z جابجایی جسم در راستای قائم و F نیروی کل موج وارد بر جسم است [۲۶]. رابطه (۴)، معادله حرکت مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای یک درجه آزادی (راستای قائم) می باشد. در این رابطه m وزن مبدل و m_a جرم افزوده، C_{PTO} ضریب میرایی جاذب، C_{Hyd} ضریب میرایی هیدرودینامیکی، F_{Ext} نیروی تحریک موج در راستای z، K_{PTO} ضریب سختی جاذب، $K_{Mooring}$ سختی مهارکتنری و $F_{Buoyancy}$ ضریب سختی بویانسی بویه می‌باشد. C_{Hyd}، F_{Ext} و m_a نیز پارامترهای هیدرودینامیکی هستند که وابسته به شکل مبدل و فرکانس موج برخوردی می‌باشند. با توجه به معادله (۵) نیروی تحریک موج بصورت مجموع نیروی تفرق F_D و نیروی فرود-کریلف F_{FK} تعریف می‌شود[۲۸]. در شکل ۳ این پارامترها به صورت شماتیک نمایش داده شده‌است.



شکل ۳- شکل شماتیک مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای

$$F(t) = M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ \tag{۳}$$

$$\begin{bmatrix} F_{(Ext)s} \\ F_{(Ext)f} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} m_s + (m_a)_s & 0 \\ 0 & m_f + (m_a)_f \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_f \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{PTO} + (C_{Hyd})_s & -C_{PTO} \\ -C_{PTO} & C_{PTO} + (C_{Hyd})_f \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{PTO} + k_{Mooring} & -k_{PTO} \\ -k_{PTO} & k_{PTO} + k_{Buoyancy} \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} z_s \\ z_f \end{bmatrix} \tag{۴}$$

$$F_{Ext} = F_D + F_{FK} \tag{۵}$$

در رابطه (۶) نیروی ایجاد شده در سیستم فنر- میراگر همان نیروی استحصالی از موج F_{PTO} است و $(F_Z)_f$ نیروی موج در راستای قائم در بدنه شناور، M_f وزن بویه شناور و $\ddot{Z}_f$ شتاب حرکت بدنه شناور در راستای قائم می‌باشد. در رابطه (۷) نیز $(F_z)_s$ نیروی موج در راستای قائم به بدنه مغروق و M_S جرم بدنه مغروق و $\ddot{Z}_S$ شتاب حرکت بدنه مغروق می‌باشد. در رابطه (۸)، F_{PTO} نیروی ایجاد شده در سیستم جاذب فنر- میراگر می‌باشد. این نیرو ناشی از تغییرات سرعت $\Delta\dot{Z}$ و تغییرات جابجایی ΔZ بین بویه شناور(F) و بدنه مغروق (S) دستگاه مبدل است. در این رابطه C_{PTO} ضریب میرایی جاذب، K_{PTO} ضریب سختی جاذب، Z جابجایی هیو، $\dot{Z}$ سرعت در راستای قائم و $\ddot{Z}$ شتاب جسم در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

راستای قائم می‌باشد. با توجه به رابطه (۹) میزان توان استحصالی از انرژی موج با اختلاف دامنه نوسان و سرعت هیو دو بدنه نسبت مستقیم دارد.

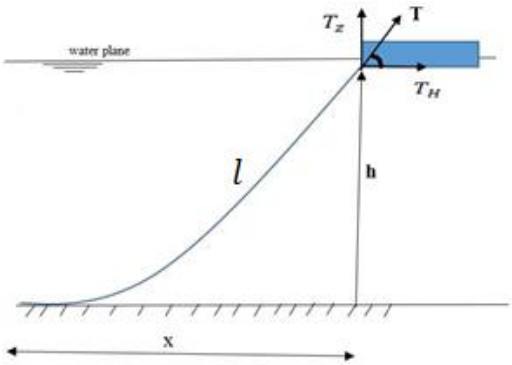
$$F_{PTO}+(F_z)_f=M_f\ddot{Z}_f \quad (۶)$$

$$-F_{PTO}+(F_z)_s=M_s\ddot{Z}_s \quad (۷)$$

$$F_{PTO}=-C_{PTO}(\dot{Z}_f-\dot{Z}_s)-k_{PTO}(Z_f-Z_s) \quad (۸)$$

$$P_{PTO}=C_{PTO}(\dot{Z}_f-\dot{Z}_s)^2 \quad (۹)$$

معمولا برای حفظ تعادل و پایداری سازه‌های شناور از یک سری کابل یا زنجیر مطابق شکل ۴ استفاده می‌شود. در این پژوهش، مبدل بوسیله چهار کابل کتنری مهار شده‌است. طول هریک از این مهارها بر اساس سختی مهار استفاده شده در آزمایشگاه از رابطه (۱۱) محاسبه شد. C_{33} سختی مهار در راستای هیو، h عمق آب بر حسب متر، w وزن واحد طول زنجیر در آب، T کشش در مهار در هر نقطه، T_H نیروی افقی مهار در سطح آزاد، T_{Max} نیروی کششی حداکثر زنجیر، L_{Min} طول معلق مهار کتنری و l طول کلی مهار کتنری بر حسب متر می‌باشد.



شکل۴ – شکل شماتیک از مهار جسم شناور به وسیله یک خط مهار کتنری

$$C_{33}=\frac{dH_m}{dZ}=w\left[\frac{-2}{(1+\frac{T_H}{hw})^{\frac{1}{2}}}+\cos^{-1}h(1+\frac{wh}{T_H})\right]^{-1} \quad (۱۰)$$

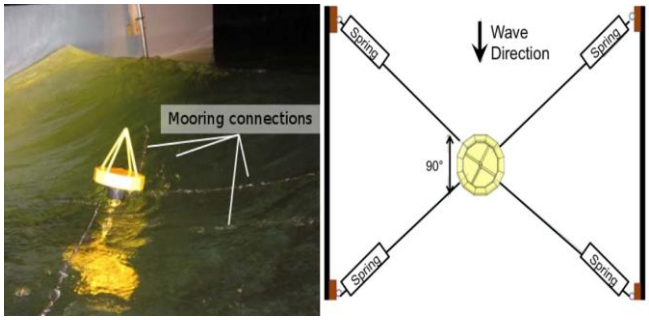
$$T_{\max}=T_h+wh \quad (۱۱)$$

$$l_{\min}=h(2\frac{T_{\max}}{wh}-1)^{(\frac{1}{2})} \quad (۱۲)$$

$$l=l_{\min}+100 \quad (۱۳)$$

۳ - اعتبارسنجی

تست های آزمایشگاهی مربوط به مدل مورد استفاده در این تحقیق پیشتر در دانشگاه برکلی کالیفرنیا بر روی مبدل جاذب نقطه‌ای تک بدنه‌ای بدون سیستم PTO در مقیاس ۱:۱۰۰ انجام شده است [۱۸]. در این مدل با انجام تست فروپاشی در لحظه اول یک جابجایی اولیه به مقدار ۰/۰۲ متر به مبدل اعمال شد و پس از آن با استفاده از مبدل با نوسان آزاد، دو پارامتر پریود طبیعی جاذب و میرایی محاسبه گردید[۱۸]. در ادامه در سال ۲۰۱۱ تست آزمایشگاهی در دانشگاه کالیفرنیا سندیاگو انجام شد. در این تست مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای (با مکانیزم PTO) در مقیاس ۱:۳۳ انجام شد. در این تست از چهار مهار مورینگ مطابق شکل ۵ به سختی KN/m ۰/۰۶ استفاده گردید. این چهار مهار از طریق صفحه اسپار به شمع فلزی واقع در دیوار استخر موج متصل بود. مشخصات مهار مورد استفاده در مدل در جدول ۱ ارائه شده است. از یک دستگاه ثبت موقعیت[۱۹] نیز در تمامی مراحل تست برای اندازه‌گیری حرکت نسبی بین بویه و بدنه مغروق استفاده گردید. در این تحقیق از نتایج آزمایش فوق‌الذکر برای صحت سنجی نتایج حاصل از نرم‌افزار انسیس اکوا استفاده شده‌است [۱۹].



شکل۵ -مهار مبدل جاذب نقطه‌ای دوبدنه‌ای در استخر موج دانشگاه سندیاگو[۱۹]

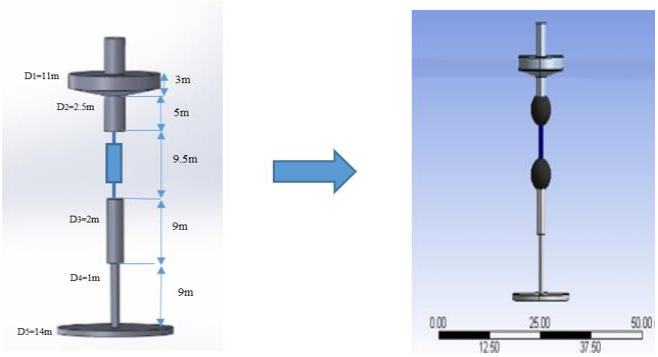
جدول ۱- مشخصات مهار در مقیاس ۱:۳۳ در مدل آزمایشگاهی[۱۹]

تعداد مهارها	۴
سختی هر کابل	۰/۰۶ KN/m
محل اتصال مهار ها به سازه	**روی صفحه اسپار**

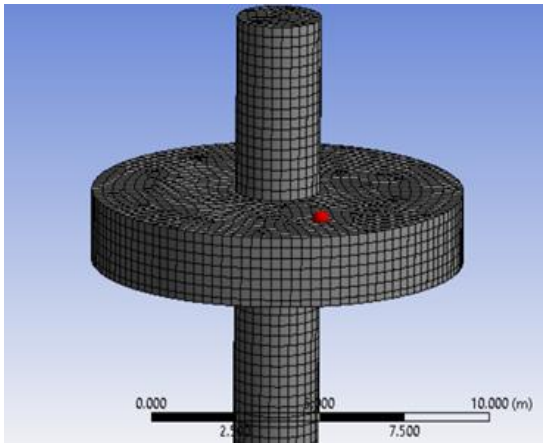
شکل۶ هندسه مدل و ابعاد مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای را نشان می‌دهد. در این مبدل، عامل اصلی توازن بین وزن و نیروی شناوری (بویانسی)، صفحه هیو[۲۰]می‌باشد و همواره برای حفظ پایداری جسم، مرکز ثقل پایین‌تر از مرکز شناوری قرار دارد. جرم جسم در مقیاس واقعی برابر ۲۴۹/۵ تن می‌باشد که بدنه شناور ۸۴/۵ تن و بدنه مغروق ۱۶۵ تن است. تحلیل‌ها در نرم افزار انسیس-آکوا، در حوزه زمان و فرکانس انجام شده است. در تحلیل حوزه فرکانس که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

پیش شرط اصلی تحلیل حوزه زمان است ماتریس‌های هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی بدست می‌آید. با توجه به ابعاد و شرایط دریا، عمق دریا ۷۰ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات جسم شامل ممان اینرسی حول محورهای مختلف، مرکز جرم جسم و جرم جسم در نرم‌افزار مقداردهی شده‌اند. تعداد کل شبکه-های تشکیل‌دهنده سطح جسم برابر ۴۲۰۰ عدد المان مربعی شکل می‌باشد. در شکل۷، جسم شبکه‌بندی شده مبدل نشان داده شده است.



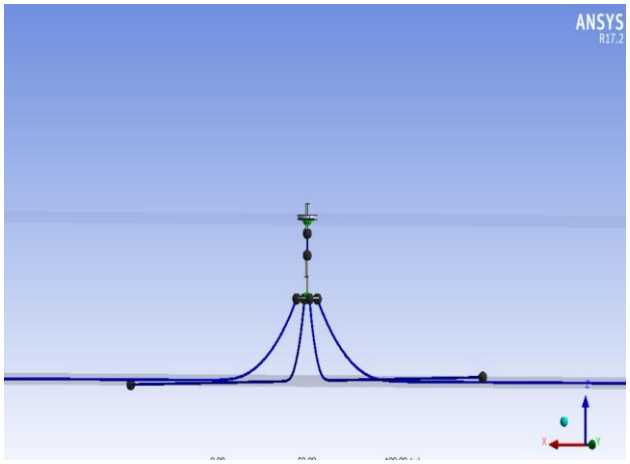
شکل ۶- نحوه مدل سازی مبدل جاذب دو بدنه‌ای در نرم‌افزار انسیس اکوا



شکل ۷ - نمایی از شبکه‌بندی مبدل جاذب نقطه‌ای در نرم افزار انسیس-آکوا

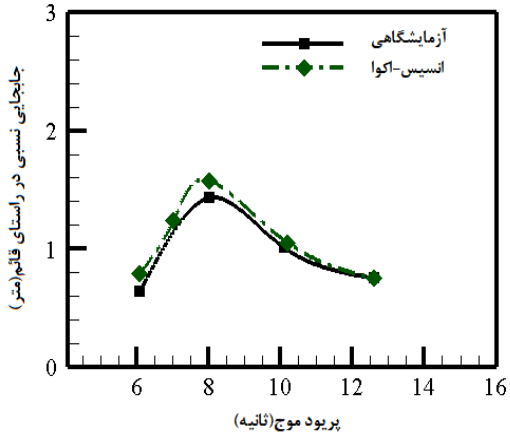
برای تحلیل حوزه فرکانس، موجی در جهت ۱۸۰ درجه و در بازه فرکانسی دلخواه در نظر گرفته شده‌است. برای اتصال دو بدنه در قسمت جاذب، از یک کابل خطی به سختی KN/m ۲۰ و ضریب میرایی$KN.s/m$ ۱۲۰۰ مطابق شکل ۶ استفاده شده‌است. شکل ۸ مهار مبدل بوسیله چهار خط مهار کنتری را نشان می‌دهد. طول مهارها برای سازه در مقیاس واقعی، با درنظرگیری سختی مهار آزمایشگاهی (برابر KN/m ۰/۰۶) و با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شده‌است. در شبیه سازی عددی مدل‌سازی مهارها در حوزه فرکانس و تحلیل دینامیکی آن ها در حوزه زمان بررسی می-شوند. این مهارها از طریق دیسک واقع روی بدنه مغروق به بستر دریا مهار می‌شوند. مهارهای کنتری بواسطه وزن رشته مهار، نیروی بازگرداننده و پیش‌کشیدگی را تامین می‌کنند. ماتریس سختی مهارکه توسط نرم افزار انسیس-آکوا محاسبه شده‌است، یک ماتریس ۶*۶ می‌باشد که شامل کوپل همه حرکات با یکدیگر می-باشد. با توجه به اینکه در این سیستم فقط جابجایی در راستای قائم (درجه آزادی هیو) مدنظر است، در این ماتریس فقط سختی در درجه آزادی هیو اعمال گردیده است. تحلیل در حوزه زمان، برای موج منظمی به ارتفاع ۲/۵ متر در بازه زمانی ۱۲۰ ثانیه و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه انجام شده است.

با اعمال شرایط محیطی و موج منظم مورد نظر می‌توان نیروهای فرود-کلیرلف، تفرق و همچنین سرعت، جابجایی و شتاب جسم را بدست آورد و نهایتا با استفاده رابطه (۹) می‌توان توان خروجی را محاسبه کرد.



شکل۸ - استفاده از مهار کنتری در مبدل در نرم‌افزار انسیس-اکوا

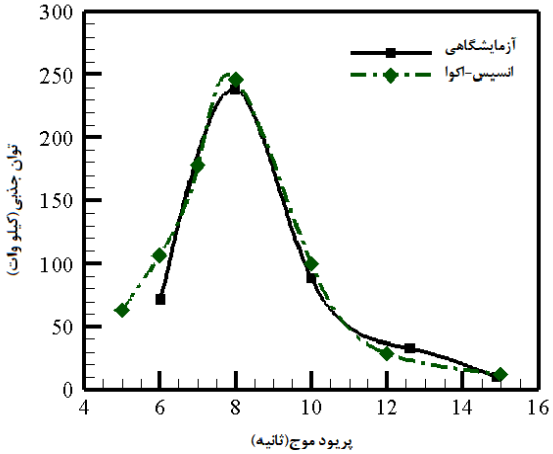
شکل۹ مقدار جابجایی نسبی بین دو بدنه مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای را برای دو حالت شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. این نتایج تطابق خوبی با هم دارند و اختلاف ناچیز حاصله نیز بدلیل صرف نظر کردن از اثرات لزجت در نرم افزار انسیس-آکوا می باشد.



شکل ۹ - مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی حرکت در راستای قائم برای مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

شکل ۱۰ توان خروجی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد. این مقایسه به منظور اطمینان از صحت توان خروجی محاسبه شده توسط نرم افزار، انجام گرفته است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دارای تطابق مناسبی می‌باشند.



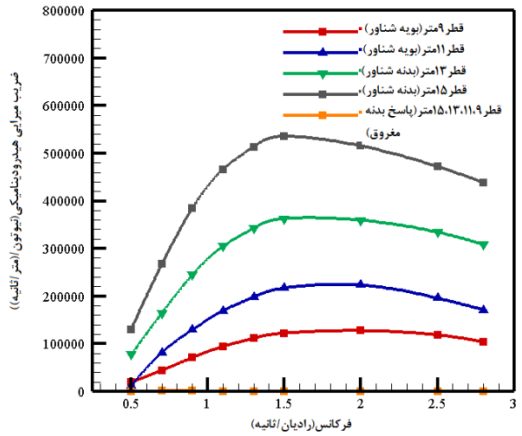
شکل ۱۰- مقایسه توان جذبی برای مبدل دو بدنه‌ای در دوحالت آزمایشگاهی و عددی

۴ -نتایج و بحث

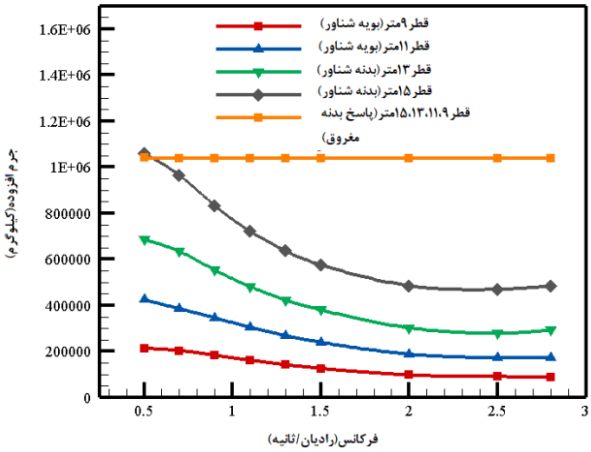
پس از انجام مدلسازی‌های مورد بحث و استخراج نتایج، در این بخش به بررسی تاثیر هندسه بویه در میزان توان خروجی پرداخته می‌شود.

۴-۱-تاثیر قطر بویه بر توان خروجی مبدل

با توجه به اینکه بدنه شناور در تماس مستقیم با موج قرار دارد تغییرات شکل و ابعاد آن نسبت به بدنه مغروق تاثیر بیشتری در میزان جذب توان استحصالی دارد. در این بخش تاثیر قطر بدنه شناور بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به رابطه (۴) ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده، ضریب میرایی هیدرودینامیکی و نیروی تحریک موج تحت تاثیر شکل بویه و فرکانس موج قرار دارند. در شکلهای ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش قطر بویه، میزان جرم‌افزوده و میرایی هیدرودینامیکی جسم شناور افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات قطر بویه تاثیری بر میزان جرم‌افزوده و میرایی بدنه مغروق ندارد.



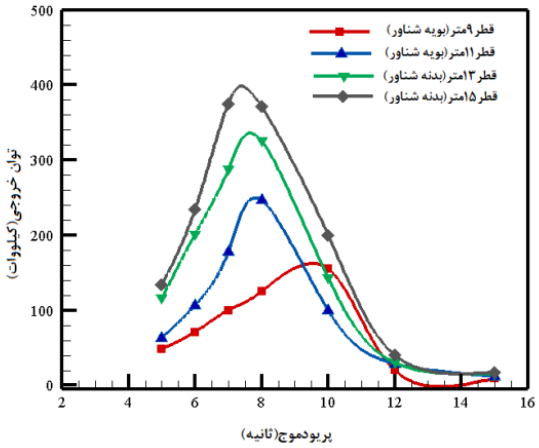
شکل ۱۱- نمودار تاثیر قطر بر پارامترهای هیدرودینامیکی میرایی هیدرودینامیکی



شکل ۱۲- نمودار تاثیر قطر بر پارامترهای هیدرودینامیکی جرم افزوده

در شکل ۱۳ میزان توان خروجی مبدل، برای ۴ قطر ۹ ، ۱۱،۱۳ و ۱۵ متر نشان داده شده است. با افزایش میزان قطر بویه شناور، میزان توان خروجی مبدل نیز به‌دلیل افزایش درصد جرم جسم شناور افزایش می‌یابد. افزایش توان خروجی به ازای هر ۲ متر افزایش قطر، تقریبا برابر ۲۰ درصد می‌باشد . همچنین افزایش قطر سبب افزایش وزن می گردد. در نتیجه، هزینه نیز به طور چشمگیر افزایش می‌یابد. با توجه به بررسی‌ها ، قطر بین ۱۱ تا ۱۳ متر می‌تواند به عنوان قطر بهینه و اقتصادی در نظر گرفته شود.

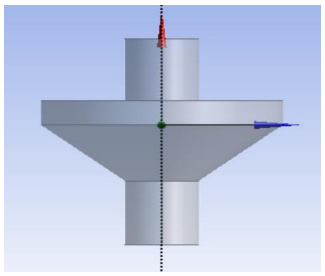
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]



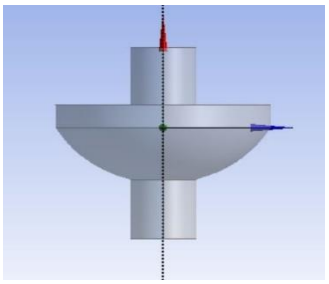
شکل ۱۳- تاثیر تغییرات قطر بدنه شناور بر میزان توان

۲-۴- تاثیرشکل بویه شناور برتوان خروجی مبدل

پارامترهای هیدرودینامیکی شامل کل نیروی موج، میرایی، جرم افزوده هیدرودینامیکی و توان خروجی جاذب برای دو هندسه نیم مخروطی و نیمکروی مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی‌ها با توجه به شکل ۱۴ با بدنه شناور به قطر ۱۱ متر، عمق آبخور ۳۴/۵۴ متر و ارتفاع موج ۲/۵ متر، برای پریود ۱۰ ثانیه انجام شده است. مطابق رابطه (۴) میزان نیروی موج و پارامترهای هیدرودینامیکی تابعی از شکل جسم و فرکانس موج برخوردی است و همانگونه که در اشکال ۱۵و ۱۶مشاهده می‌شود، میزان پارامترهای هیدرودینامیکی ذکرشده در حالت مخروطی ۱۷درصد بیشتر از حالت کروی می‌باشد.

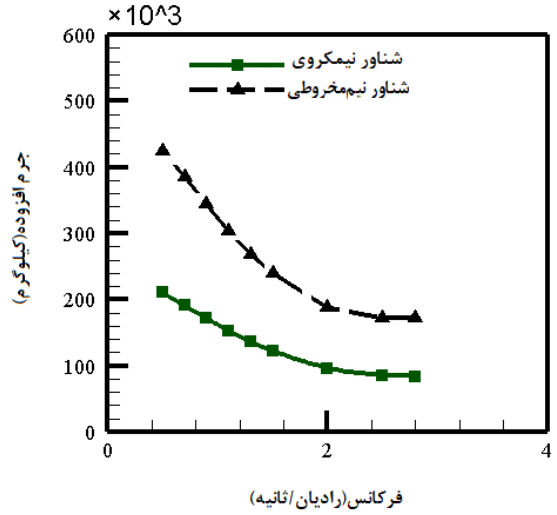


(الف): بویه نیم مخروطی

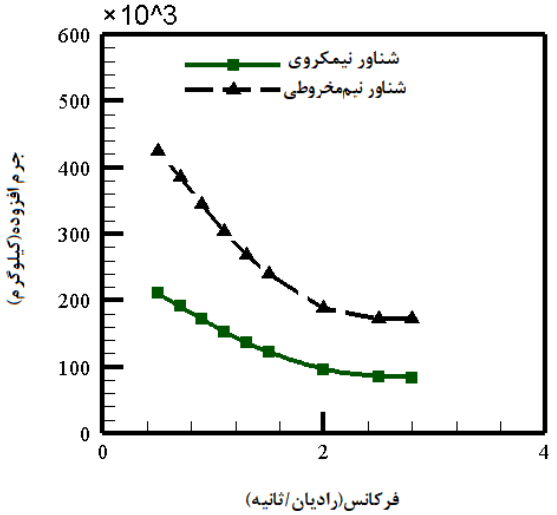


(ب): بویه نیمکروی

شکل ۱۴- دو شکل از بدنه شناور با جرم یکسان



(الف): نموادر جرم افزوده - فرکانس موج برخوردی برای دو شکل نیمکروی و نیم مخروطی

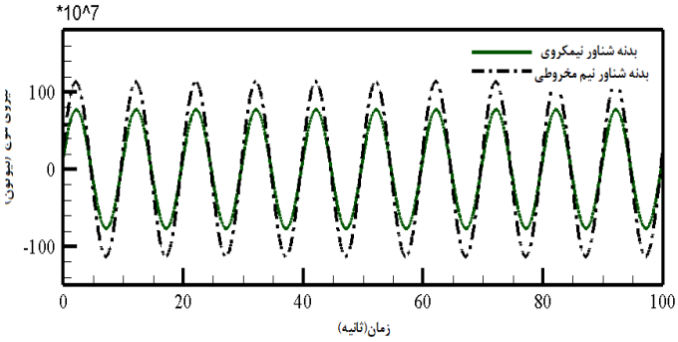


(ب): نموادر ضریب میرایی هیدرودینامیکی - فرکانس موج برخوردی برای دو شکل نیمکروی و نیم مخروطی

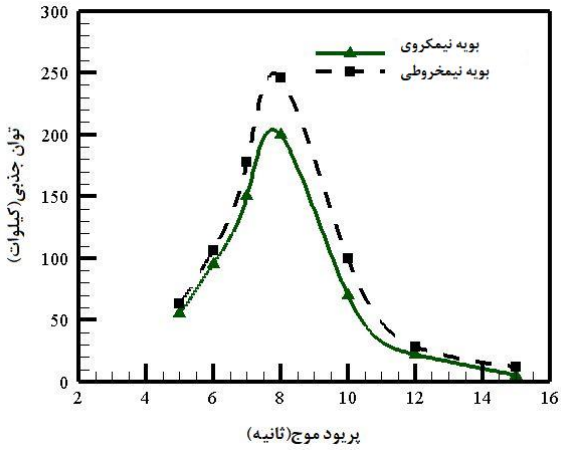
شکل۱۵ - بررسی تاثیر شکل بویه بر پارامترهای هیدرودینامیکی

در ادامه تحقیق، تاثیر شکل بدنه شناور بر میزان توان استحصالی نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۷ میزان توان خروجی را برای شکل بدنه مخروطی (مدل مورد استفاده در صحت سنجی) و بویه نیمکروی، نشان می‌دهد. با توجه به شکل۱۵، پارامترهای هیدرودینامیکی برای هندسه نیم مخروطی شکل بیشتر از هندسه نیم کروی می باشد. براساس شکل ۱۶ می توان به این نتیجه رسید که کل نیروی موج برای هندسه نیم‌مخروطی بیشتر می‌باشد و همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، مبدل نیم مخروطی، توان خروجی بیشتری خواهد داشت.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]



شکل۱۶ - بررسی تاثیر شکل بویه بر نیروی تحریک موج برای شکل نیم کروی و نیم مخروطی مخروطی



شکل۱۷ - نمودار توان جذبی برای دو مبدل نیمکروی و نیم مخروطی

۵ -نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات پارامترهای هیدرودینامیکی و شرایط موج و همچنین شکل هندسی بدنه شناور بر میزان توان تولید انرژی برای مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه‌ای پرداخته شد. مدل-سازی و تحلیل هیدرودینامیکی در دو حوزه زمان و فرکانس در نرم‌فزار انسیس اکوا انجام شد. نتایج بدست آمده از تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

- مدلسازی جاذب دو بدنه‌ای، در نرم‌افزار انسیس-آکوا انجام گرفت و نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. این صحت سنجی تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان داد.
- نتایج مدلسازی های عددی نشان می‌دهد، افزایش ارتفاع موج باعث افزایش نیروی وارد بر موج می‌شود. همچنین، با افزایش میرایی جاذب، جابجایی نسبی بین بدنه مغروق و شناور کاهش می‌یابد.
- نتایج نشان می دهد، افزایش قطر بویه باعث افزایش پارامترهای هیدرودینامیکی و در نتیجه افزایش نیروی وارد بر موج می‌شود. این امر میزان توان تولید انرژی از موج را به ازای هر ۲ متر افزایش قطر، تقریبا به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌دهد.
- بررسی شکل بویه شناور نشان داد، میزان پارامترهای هیدودینامیکی هندسه نیم‌مخروطی بیشتر از هندسه نیمکروی می‌باشد و بر این اساس، توان استحصالی از هندسه نیم مخروطی ۱۷ درصد بیشتر از شکل نیم کروی می‌باشد.

کلید واژگان:

1- Attenutor
2- Oscillating Watter clumn
3- Submerged Pressure Differential
4- Overtopping System
5- Heaving Point Absorber
6- Wave Roller
7- Heave
8- IPS Bouy
9- Power take off
10- Wave Energy Convector-Simulink
11- Free Decay Simulation
12- Floating Point Absorber
13- Surge
14- Sway
15- Heave
16- Roll
17- Pitch
18- yaw
19- Potentiometer
20- Heave Plate

۶ – مراجع

1. Ringwood, J., (2008), *Practical challenges in harvesting wave energy*. Natural gas, 60, 70.
2. Dezvareh, R., Bargi, K., & Mousavi, S. A., (2016), *Control of wind/wave-induced vibrations of jacket-type offshore wind turbines through tuned liquid column gas dampers*. Structure and Infrastructure Engineering, 12(3), 312-326.
3. Bargi, K., Dezvareh, R., & Mousavi, S. A. (2016), *Contribution of tuned liquid column gas dampers to the performance of offshore wind turbines under wind, wave, and seismic excitations*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 15(3), 551-561.
4. Dezvareh, R., (2019), *Evaluation of turbulence on the dynamics of monopile offshore wind turbine under the wave and wind excitations*. Journal of Applied and Computational Mechanics, 5(4), 704-716.
5. Dong, W., Moan, T., & Gao, Z., (2012), *Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]

effect of corrosion and inspection. Reliability Engineering & System Safety, 106, 11-27.

6. Carter, R. W., (2005), *Wave energy converters and a submerged horizontal plate* (Doctoral dissertation, University of Hawaii at Manoa).

7. Cruz, J. & Elkinton, C., (2009), *Oregon Wave Energy*. Trust Utility Market Initiative. Oregan, USA.

8. McCormick, M. E., (1981), *Ocean wave energy conversion.* Wiley. New York.

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

10. Budal,k, & Falnes, j., (1975), *A resonant point absorber ofocean-wave power*. Nature, 256(5517), 478-479.

11. Evans, D. V., (1976), *A theory for wave-power absorption by oscillating bodies*. Journal of Fluid Mechanics, 77(1), 1-25.

12. Mei, C. C., (1976), *Power extraction from water waves.* Journal of Ship Research, 20, 63-66.

13. Bret B., (2014). *On the Design, Modeling, and Testing of Ocean Wave Energy Converters*, PHD thesis, Oregon State University.

14. Fairies, J., (1999), *Wave-energy conversion through relative motion between two single-mode oscillating bodies.*

15. Leijon M, Boström C, Danielsson O, Gustafsson S, Haikonen K, Langhamer O, et al., (2008), *Wave energy from the North Sea: experiences from the Lysekil research site.* Surv Geophys;29:221–40.

16. Eriksson M, Isberg J, Leijon M., (2005), *Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter*. Int J Eng Sci;43:1377–87

17. Gomes R, Henriques J, Gato L, Falcao A, others, (2010), *IPS two-body wave energy converter: acceleration tube optimization.* Proc 12th Inter Polar Eng:834–42.

18. Yu Y-H, Li Y. A RANS, (2011), *simulation for the heave response of a two-body floating point wave absorber*. In: 21st International offshore (ocean) and polar engineering conference, ISOPE, Maui, Hi, United States.

19. Li Y, Yu Y-H, Epler J, Previsic M., (2012), *Experimental Investigation of the power generation performance of floating-point absorber wave energy systems*, In: 27th Internationalworkshoponwater wavesand floating bodies,Copenhagen, Denmark.

20. Yu, Y.S.., Li, Y., (2014), *Reynolds-Averaged Navier–Stokes simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system*, J. Computers & Fluids, 73, 104-114

21. Nazari M, Ghassemi H, Ghiasi M, Sayehbani M, (2013), *Design of the Point Absorber Wave Energy Converter for Assaluyeh Port n.d.* Iranica Journal of Energy & Environment, 4, 130135. DOI:10.5829/idosi.ijee.2013.04.02.09

22. Koh, H. J., Ruy, W. S., Cho, I. H., & Kweon, H. M., (2015), *Multi-objective optimum design of a buoy for the resonant-type wave energy converter*. Journal of Marine Science and Technology, 20(1), 53-63.

23. Pastor, J., & Liu, Y., (2014), *Power absorption modeling and optimization of a point absorbing wave energy converter using numerical method*. Journal of Energy Resources Technology, 136(2), 021207.

24. Ruehl, K., Michelen, C., Kanner, S., Lawson, M., & Yu, Y. H., (2014), *Preliminary verification and validation of WEC-Sim, an open-source wave energy converter design tool.* In 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, San Francisco, CA, United States (Abstract accepted).

25. Beirao P, Malça C, (2014), *Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter*. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 5, 1-11. DOI: 10.1007/s40095-014-0091-7

26. Lawson, M., Garzon, B. B., Wendt, F., Yu, Y. H., & Michelen, C., (2015), *COER hydrodynamic modeling competition: Modeling the dynamic response of a floating body using the WEC-SIM and FAST simulation tools.* In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V009T09A005-V009T09A005). American Society of Mechanical Engineers.

27. Shadman, M., Estefen, S. F., Rodriguez, C. A., & Nogueira, I. C., (2018), *A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter*. Renewable energy, 115, 533-546.

28. Dezvareh, R., (2020), *Upgrading the Seismic Capacity of Pile-Supported Wharfs Using Semi-Active Liquid Column Gas Damper*. Journal of Applied and Computational Mechanics, 6(1), 112-124.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.14.2]