بررسی عملکرد مبدل انرژی WaveStar تحت پارامترهای امواج دریای خزر با شبیه‌سازی امواج منظم و نیروی فرود کریلوف

پویا یوسفی خیابانی[۱]، محمد امین عباس‌زاده[۲]، علیرضا خورشید غازانی[۳]، میر محمد اتفاق[۴*]

[۱] کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ P.yoosefikhiabani@modares.ac.ir
[۲] کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ Mohammad.amin.abbaszadeh@gmail.com
[۳] کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ A.khorshid94@tabrizu.ac.ir
[۴] دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز؛ Ettefagh@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
مبدل انرژی WaveStar
نیروهای هیدرودینامیکی امواج
امواج منظم
دریای خـزر
پاسخ ارتعاشی

چکیده

دریای خزر در یکی از کم ارتفاع‌ترین نقاط منطقه، ما بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶/۳۴° و ۴۷/۱۳° شمالی واقع گردیده است. مساحت و عمق قابل توجه دریای خزر، پتانسیل مطلوب انرژی را فراهم آورده است. این پژوهش به تحلیل و تعیین کارکرد مکانیزم توربین WaveStar به عنوان یکی از مبدل‌های انرژی امواج با ساختاری شناور در آب‌های این دریا می‌پردازد. نیروهای هیدرودینامیکی وارد از امواج با ارتفاع و پریودهای معین، بر اجزای غوطه‌ور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین در ادامه، با استفاده از محاسبه‌ی فرکانس، پروفیل و سرعت موج و حل معادله‌ی دینامیکی برای سازه‌ی شبیه‌سازی شده، پاسخ ارتعاشی سازه تحت امواج منظم استوکس مورد مداقه قرار گرفته است. تأثیر تغییر طول بازو، تغییر قطر بالشتک، تغییر دوره تناوب موج و نهایتا تغییر ارتفاع موج بر پاسخ سازه و گشتاور وارده بر آن با شبیه‌سازی همزمان تئوری امواج منظم و با استفاده از نیروی فرود کریلوف بخش اصلی مقاله را تشکیل می‌دهد.

Investigation of WaveStar Energy Converter Performance in Caspian Sea Using Regular Wave and Froude-Krylov Force

Pooya Yoosefi Khiabani[1], Mohammad Amin Abbaszadeh[2], Alireza Khorshid[3], Mir Mohammad Ettefagh[4*]

[1] B.Sc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2] B.Sc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3] B.Sc, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4] Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 May 2015
Accepted: 21 Aug. 2016

Keywords:
WaveStar Energy Converter
Hydrodynamic Forces
Regular Waves
Caspian Sea
Vibration Response

ABSTRACT

Caspian Sea is one of the most low-lying areas of the region which is located between latitudes 36.34 and 47.13 degrees north. Its considerable vast area and depth have provided an opportunity to gain renewable energy by different methods. This paper analyzes the performance and mechanism of a floating wave energy converter known as WaveStar, in the above-mentioned sea. Different parts of mechanism are examined under hydrodynamic forces of waves with certain periods and amplitudes. By using the frequency parameters, profile and velocity of the waves; and solving the governing dynamic equations for the model, the vibration response of system has been derived. The main part of this study is the investigation of the effect of changing the arm length, float diameter, wave period and wave amplitude on the structure using regular wave with Froude-Krylov force.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

۱- مقدمه

قدرت تولیدی انرژی امواج دریا به دلیل چگالی زیاد آن (۲ الی ۳ کیلووات بر متر مربع) نسبت به دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی (۰/۲ −۰/۱ kW/m^2) و بادی (۰/۶−۰/۴ kW/m^2)، عظیم‌تر و قابل اعتمادتر است [۱].

طی سالیان اخیر طیف گسترده‌ای از تجهیزات استحصال انرژی از امواج دریا معرفی و توسعه یافته‌اند و تعداد زیادی از مبدل‌های انرژی با مکانیزم‌های مختلف طراحی و ارائه شده‌اند و برخی از آن‌ها نیز به صورت آزمایشی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. برخلاف آن‌چه پیرامون همگرایی مفاهیم مکانیزم‌های استحصال انرژی در بخش باد به وقـوع پیوسته، انرژی امواج هنوز به مفهوم بنیادین مشخصی برای استحصال بهینه‌ی انرژی دست نیافته است. این احتمال وجود دارد که در آینده با توجه به مشخصات مزارع موج، مفاهیم و مکانیـــزم‌های متفاوتی جهت استحصال انرژی، بسته به شرایط محیطی به صورت پایدار معرفی و بهینه‌سازی شوند [۲]. در حال حاضر ۸۰ فن‌آوری برای تبدیل انرژی موج در سطح جهان وجود دارد که با توجه به موقعیت، اساس کارکرد و اندازه‌ی مبدل‌های انرژی، به دسته‌های متعددی طبقـه‌بندی می‌شوند [۳][۴][۵][۶].

در این میان تا کنون کشور ایران علی‌رغم وجود کمربند دریایی شمال (دریای خـزر) و جنوب (خلیج فارس و دریای عمان) نقش چندانی در استحصال انرژی امواج ایفا نکرده است. به طوریکه دریای خزر با دارا بودن پتانسیل بالای انرژی امواج به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه‌ی جهان با مساحت ۴۳۶ هزار و ۳۴۰ کیلومتر مربع، و با عمق حدود ۱۸۰ تا ۱۰۰۰ متر در حوضه‌ی جنوب همچنان بدون توجه پژوهشگران و به تبع آن سرمایه‌گذاران قرار گرفته است [۷].

با توجه به داده‌های فضایی، یک جریان چرخشی بزرگ خلاف عقربه‌های ساعت (از راست به چپ) در دریای خزر وجود دارد [۸]. این جریان چرخشی به مثابه‌ی دستگاه گردش خون بدن انسان عمل می‌کند [۷] و باعث ایجاد موج‌های با توان بالا در این دریا شده است. توان متوسط این دریا در حدود ۱۴ کیلووات/متر، و توان بیشینه‌ی آن در طول سال به مقدار قابل توجه ۳۰ کیلووات/متر می‌رسد[۹][۱۰]. در حالیکه در آب‌های استوایی، میزان توان متوسط، علی‌رغم تغییرات فصلی، بین ۱۵ تا ۲۰ کیلووات/متر می‌باشد و در مناطق استوایی کشورهای مختلف با احداث مزارع موج متعدد اقدام به استحصال انرژی امواج دریا می‌نمایند [۱۱].

دریای خزر با داشتن یک بستر تخت تقریباً نرم سیلیکاتی، جزو سایت‌هایی است که قابلیت بهره‌مندی از تجهیزات فراساحلی با کابل‌های متصل به کف دریا را ندارد. علاوه بر این، علی‌رغم این‌که تجهیزات ساحلی هزینه‌ی تعمیر، نگهداری و نصب پایین‌تری نسبت به سیستم‌های شناور دارند، اما نمی‌توان از مسایل زیست محیطی آن‌ها در سواحل دریای خزر، چشم‌پوشی نمود. نکته‌ی مهم دیگر اینکه با توجه به کوچک‌بودن دامنه‌ی امواج دریای خزر، سیستم‌های Overtopping نمی‌توانند بهره‌وری قابل قبولی در این دریا داشته باشند. لکن سیستم‌هایی که با دامنه‌ی متغیر امواج دریا به استحصال انرژی موج می‌پردازند، از هر جهت برای کاربری در دریای خزر مناسب هستند [۷].

بهترین مکانیزم مورد بهره‌برداری خاصه در حوضه‌ی جنوبی این دریا با عنایت به ویژگی‌های آب و هوایی و پروفیل موج، دستگاه‌های جاذب نقطه‌ای هستند. مکانیزمی که علاوه بر پیچیدگی کمتر تکنولوژیکی، دسترسی و قیمت تولید کمتری نیز دارد [۷]. ساختار این سازه‌ها بر مبنای بالشتک‌های شناوری استوار است که با انرژی پتانسیل امواج دریا به حرکت در می‌آیند؛ جنبش‌های نوسانی‌ای که در راستای افقی یا عمودی بوده و یا ناشی از دوران جسم غوطه‌ور در آب می‌باشد. این حرکات می‌توانند از اندرکنش نیروهای هیدرودینامیکی موج و سازه نشأت بگیرند، به طوریکه در این تجهیزات با افزودن بر تعداد بالشتک‌های شناور می‌توان بهره‌مندی از پتانسیل آب را افزایش داده و با تحلیل حرکت اجسام شناور ناشی از نیروهای اندرکنشی، مقدار انرژی استحصالی را محاسبه نمود. از نمونه‌های مکانیزم جاذب نقطه‌ای، می‌توان به مبدل‌های مدل WaveStar[1] اشاره کرد [۱۲].

طی دهه‌های گذشته، تقلا و تحقیق در رابطه با کارایی و بهره‌وری اغتنام انرژی به طور متمرکزی افزایش یافته است، در حالیکه برآورد نیروهای وارد بر سازه علی‌رغم اهمیت بالا به جهت قابلیت اعتماد سازه تحت امواج طوفانی، چندان مورد اهمیت و تفقد قرار نگرفته است [۲].

گستره‌ی مکانیزم‌های مبدل‌های انرژی بسیار زیاد بوده و اکثر این تجهیزات در مرحله‌ی تحقیقات و توسعه قرار دارند. از این رو اطلاعات مربوط به هر یک از آن‌ها بسیار محدود و اطلاعات تجربی موجود نیز بعضاً غیر قابل اعتماد و بر مبنای تجربیات کوتاه مدت است [۲]. طراحی مبدل‌ها بر مبنای بارهای هیدرودینامیکی وارد از سمت موج از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. طراحی سازه‌های شناور مبدل‌های انرژی در اکثر مواقع بر مبنای نیروهای محلی انجام می‌گیرد [۲].

این مقاله در ابتدا با عنایت به مشخصه‌های موج دریای خزر و با توجه به ساختار توربین WaveStar، به باز طراحی مکانیزم این مبدل انرژی می‌پردازد. به عبارت دیگر ابعاد مناسب توربین مورد استفاده در دریای خزر برای استحصال بهتر انرژی استخراج شده است. در ادامه با تمرکز بر تعیین پارامترهای فرکانس، پروفیل و

[1]. ⟨http://www.wavestarenergy.com⟩

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

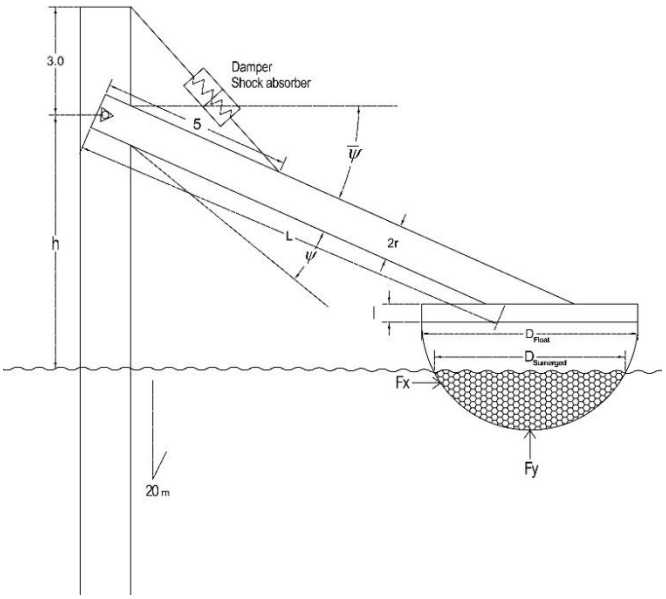
سرعت موج، معادلات دینامیکی و ارتعاشی آن تحت امواج شبیه‌سازی شده استخراج و پاسخ‌های ارتعاشی مبدل ارائه می‌گردد. توزیع نیروهای وارده بر سازه با عنایت به مشخصات امواج منظم تحت تعریف دو تئوری ایـری و استوکس مرتبه‌ی پنجم محاسبه شده است. نیروهای اعمالی نیز در جای جای مقاله با نیروی فرود کریلوف مدل‌سازی شده‌اند. مقدار نیروهای وارده بر سازه در بازه‌های زمانی متعینه با توجه به پریود موج، اسباب ایجاد پاسخ‌های متفاوت ارتعاشی را فراهم می‌آورد که تحت نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. از دیگر سو، تأثیر تغییر پارامترهای امواج دریا و ابعاد سازه در عملکرد مبدل WaveStar نیز به صورت مطول و با ارائه‌ی گراف‌های مستخرج از نرم‌افـزار فوق الذکر ارائه گردیده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- معرفی مبدل انرژی WaveStar

تجهیزات موسوم به مبدل انـرژی WaveStar نخسـتین بـار توسـط انسـتیتو تحقیقـات دانشـگاه Aalborg، طراحـی، معرفـی و ارائـه گردیده است. مدل مکانیزم WaveStar به صورت تجهیزات نزدیـک ساحل، جاذب‌های نقطه‌ای انرژی، و بـه صـورت سـازه‌هـای شـناور است. ساختار مکانیکی شناور به اندازه کافی بالاتر از سطح آب قرار می‌گیرد، به طوری که حتی مرتفع‌ترین امواج دریا نیز نمی‌توانند به سازه آسیبی برسانند [۱۳].

دستگاه بر اساس دو ردیف شناور که همه توسط اهرم‌هایی به شفت محوری متصل و مقید گردیده‌اند با یاتاقان‌های یکطرفه کار می‌کند. مشابه روش مورد استفاده در توربین بادی، شفت اصلی مبدل انرژی از طریق یک جعبه دنده به یک ژنراتور متصل است و ژنراتور خطـی را به آرامی به گردش در می‌آورد؛ حداقل طول ردیفی بالشتک‌ها در مقیاس طول موج و برابـر آن مـی‌باشـد. سیسـتم از اتصـال تعـداد متعددی سازه و بالشتک بـه صـورت ردیفـی بـه یـک محـور دوار، تشکیل شده است. هنگام عبور موج، اولین شناور به دلیل خاصـیت شناوری به سمت بالا حرکت مـی‌نمایـد و بـدین ترتیـب شـفت بـا حرکت دورانی خود، موجب به حرکت در آمدن ژنراتـور مـی‌گـردد. زمانی که سرعت بیشتر از سرعت دورانـی شـفت باشـد، اهـرم‌هـا و بازوهای متصل به شفت قفل می‌کننـد و دسـتگاه از کـار مـی‌افتـد [۱۳]. این در حالیست که مقاله‌ی پیش رو در صدد بررسی عملکرد یک شاخه از سیستم سازه‌ای WaveStar است.

شکل ۱ مکانیزم نمونه‌ی موردی بررسی شده را نشان می‌دهـد کـه در آن بالشتکی با بهره‌گیری از مکانیزم WaveStar، غوطه‌ور در آب، با کنش در قبال نیروهای هیدرودینامیکی وارد از سمت امواج دریا، به استحصال انرژی می‌پردازد. این سازه‌ی شامل جرم، فنر، دمپـر و متشکل از یک بازو و بالشتک نیم‌کره کـه در بـالای آن اسـتوانه‌ای قرار دارد، و پایه‌ای که به بستر دریا متصل است، می‌باشد.



شکل ۱ - نمای فنی توربین waveStar

چنانچه در شکل۱ مشاهده می‌شود، سازه‌ی مورد بررسی از اتصـال بالشتکی به قطر معلـوم و بـازوی متصـل بـه محـور اصـلی تـوربین تشـکیل شـده اسـت. قطـر بالشـتک D_{Float}، قطـر شـناوری $D_{Submerged}$، قطر بازو برابر $2r$، ارتفاع استوانه‌ی نیم‌کره‌ی بـالای بالشتک l، طول بازو L، h ارتفـاع پایـه بـالاتر از تـراز آب میـانگین (MWL[۱])، زاویه‌ی تعادل استاتیکی بازو با افق $\overline{\psi}$ و زاویه‌ی نوسـان بازو و بالشتک ψ است. به طوریکه یک میرا کننـده و یـک فنـر بـه عنوان سیستم PTO[۲] برای کنترل هرچه بهتـر ارتعاشـات ناشـی از اندرکنش موج و سازه مورد استفاده قرار گرفته است. این مکـانیزم، سیستمی یک درجه آزادی بوده و زاویه‌ی نوسان و سـرعت بـازوی آن به جهت طراحی در استحصال انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به اطلاعات منتشره در مرجع [۱۴] و با عنایت به سه مـدل ارائه شده در مرجع [۱۵] که بهره‌وری توربین مـورد نظـر بـا ابعـاد واقعی را در آب‌های با عمق ۲۰ متر، مطلوب گزارش نمـوده بودنـد؛ عمق آب ۲۰ متر برای نمونه‌ی موردی در دریای خزر انتخاب شد.

مدل اصلی به کار گرفته شده توسط تیم تحقیقاتی دانشگاه آلبورگ [۱۶] به ترتیب بخاطر مقاومت قابل توجه در برابر خوردگی آب دریا و در مقابل تنش‌های دینامیکی وارده، جنس بالشتک فایبرگلاس و جنس بازو فولادی تعیین گردید و از آن‌جا که چگالی کلی بالشتک و بازو به جهت شناوری باید کمتر از چگالی آب دریا باشد، سـازه‌ی مورد نظر توخالی انتخاب شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

۳- استخـراج مشخصات فیـزیکی و هیدرودینامیکی مبدل انرژی و امواج دریا به صورت پارامتریک

بر اساس مطالعات انجام گرفته [۱۷]، در حوضـه‌ی جنـوبی دریـای خزر (سواحل ایران) دوره تناوب موج (T) در بازه‌ی ۲ الی ۸ ثانیه و ارتفاع موج (H_s) ما بین ۰/۵ تـا ۳ متـر بسـته بـه فصـول مختلـف، متفاوت است [۷][۱۸].

با توجه به پروفیل امواج دریای خزر در حوضه‌ی جنوبی و با در نظر گرفتن درصد عمومیت‌پذیری و میانگین‌گیری از داده‌های استحصالی سازمان بنادر و دریانوردی در فاز دوم مدلسازی امواج دریاهای ایران، پریود و ارتفاع موج به ترتیب $5s$ و $1/75m$ جهت مطالعه در نمونه‌ی مورد بررسی لحاظ گردید. چگالی دریای خزر در دمای محیط $25^{\circ}C$، حدود $560\ g/m^3$ بیش از استاندارد چگالی آب دریاهای جهان است. این مقدار چگالی برای آب دریا، معلول وجود مقادیر جزیی Mg^{2+}، Ca^{2+} و SO_4^{2-} محلول در آب است [۱۹]. چگالی استاندارد آب‌های آزاد $1025 kg/m^3$ در نظرگرفته شد.

جرم بالشتک و بازو بترتیب از روابط (۱) و (۲) استخراج می‌گردد.

$$\begin{aligned} m &= 1900[V_{Hollow\,hemisphere} + V_{cylinder}] \\ &= 1900\left[\frac{2}{3}\pi(a^3-(a-l)^3)+\pi\,a^2 l\right] \end{aligned} \quad (۱)$$

$$m'' = 7850[V_{Arm}] = 7850[\pi(r^2-(r-e)^2)L] \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۱)، m جرم بالشتک، $V_{Hollow\,hemisphere}$ حجم بالشتک، $V_{cylinder}$ حجم استوانه بالای آن، l ارتفاع همان استوانه و a شعاع بالشتک است.

و در (۲) m'' مقدار جرم بازو، V_{Arm} حجم بازوی توخالی، L طول بازو و e ضخامت بازو است.

بدیهی است که چگالی مجموع بالشتک و بازو باید از چگالی آب دریا کمتر باشد. از این رو برای محاسبه‌ی مقدار این چگالی جهت باز طراحی، به معادلات (۳) دست یافته شد.

$$\begin{aligned} &\frac{m+m''}{V} < \rho_{Seawater} \rightarrow \\ &\frac{1900\left[\frac{2}{3}\pi(a^3-(a-l)^3+\pi\,a^2 l)\right]+7850[\pi(r^2-(r-e)^2\times L)]}{\left(\frac{2}{3}\pi a^3+\pi\,a^2 l\right)+(\pi r^2 L)} \\ &< \rho_{Seawater} = 1025.560 \end{aligned} \quad (۳)$$

میزان زاویه‌ی تعادل استاتیکی به صورت پارامتریک به قرار رابطه‌ی (۴) و شعاع غوطه‌وری بالشتک در حالت تعادل استاتیکی تنها به مقدار جرم سازه بستگی داشته و از حل رابطه‌های (۵) الی (۷) به دست آمده است.

$$\sin\bar{\psi} = \frac{h-(l+a-h_{submerged})}{L} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} V_{submerged} &= \int_{\varphi_0}^{\pi/2}\int_0^a\int_0^{2\pi} r^2\cos(\emptyset)\,d\emptyset dr d\varphi \\ &= \frac{2\pi(a)^3}{3}\sin(\varphi)\Big|_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\sin(\varphi_0) = \frac{(a-h_{submerged})}{a} \quad (۶)$$

$$(a_{submerged})^2 + (a-h_{submerged})^2 = (a)^2 \quad (۷)$$

که در روابط فوق h ارتفاع پایه بالاتر از MWL، $h_{submerged}$ ارتفاع غوطه‌وری بالشتک در آب، $V_{submerged}$ حجم غوطه‌وری بالشتک، φ و $\emptyset$ مشخصات مختصات کروی است.

از تعادل استاتیکی حول مفصل بازو رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0 \rightarrow &\left(m''g.L/2.\cos\bar{\psi}\right)+(mg.L.\cos\bar{\psi}) \\ &= V_{Submerged}\cdot\rho_{Seawater}.g.L.\cos\bar{\psi} \\ &\rightarrow V_{Submerged}\cdot\rho_{Seawater} = m+\frac{m''}{2} \end{aligned} \quad (۸)$$

ضخامت بالشتک برابر ۰/۶ و ضخامت بازو ۰/۰۵ متر تعیین گردید.

از طرفی برای محاسبه‌ی جرم افزوده از رابطه‌ی (۹) استفاده می‌کنیم که در آن m' جرم افزوده، ρ چگالی آب و C_A ضریب جرم افزوده است که مطابق با مرجع [۲۰] برابر ۰/۵ معین شد.

$$m' = \rho C_A V_{Submerged} = 950\,l(3a^2-2al+6l^2) \quad (۹)$$

ممان اینرسی حول مفصل بازو به قرار رابطه‌ی (۱۰) است:

$$I = (m+m')L^2 + \frac{1}{3}m''L^2 \quad (۱۰)$$

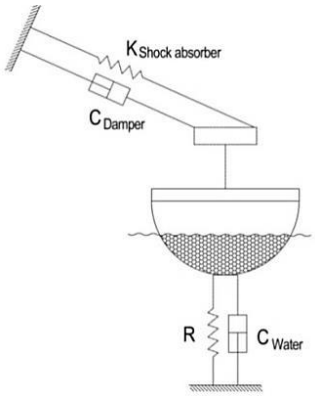
ضریب سختی نوسان heave مبدل چنان که در شکل ۲ آمده است، بسته به اندازه‌ی قطر انتخابی برای مبدل انرژی با استفاده از (۱۱) محاسبه می‌گردد که در آن $a_{Submerged}$ شعاع غوطه‌وری بالشتک است.

$$K_{Seawater} = \pi a_{Submerged}^2\cdot\rho g \quad (۱۱)$$

چنانچه در شکل ۲ نشان داده شده است علاوه بر ضرایب بازگردانندگی و میرایی آب، نیازمند تعریف این ضرایب ($K_{Shockabsorber}$ و C_{Damper} در سیستم PTO) برای کنترل برخورد سازه با پایه‌ی نگه‌دارنده‌ی اجزای غوطه‌ور هستیم، که بسته به فرکانس طبیعی آن و نسبت میرایی به سیستم اعمال می‌گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]



شکل ۲ - شمای کلی سیستم جرم، فنر، دمپـر

ابعاد سازه طوری باز طراحی می‌شوند که اولاً فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سازه نزدیک باشد تا نوسان بالشتک به حالت تشدید نزدیکتر شده و مسبب افزایش دامنه‌ی نوسان شود. اگر فرکانس طبیعی سازه از فرکانس تحریک کمتر باشد می‌توان با افزودن فنر در سیستم PTO مقدار فرکانس طبیعی را افزایش داد تا به فرکانس تحریک نزدیک گردد. نتیجتاً اگر میرایی آب برای کنترل نوسانات و جلوگیری از برخورد بالشتک به پایه کافی نباشد، نیاز به استفاده از میراکننده در سیستم PTO سازه خواهد بود که باید بررسی شود. ثانیاً زاویه‌ی تعادل استاتیکی ($\overline{\psi}$) کم باشد تا بالشتک امکان نوسان بیشتر را داشته باشد. ثالثاً در مقابل نیروهای وارده از طرف موج مقاومت لازم را داشته باشد.

فرکانس تحریک (ω) و فرکانس طبیعی سازه (ω_n) از رابطه (۱۲) حاصل می‌شود.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{\text{Caspian Seawater}} \cdot L^2 \cdot \cos^2\overline{\psi}}{I}} = \frac{\sqrt{\pi\rho g} \cdot a_{\text{submerged}} \cdot \cos\overline{\psi}}{\sqrt{m + m' + \frac{m''}{3}}} \quad (۱۲)$$

که در آن ω فرکانس تحریک و ω_n فرکانس طبیعی سازه است.

بدین ترتیب ابعاد مناسب سازه برای نمونه‌ی موردی دریای خزر به قرار زیر محاسبه شدند:

$$a = 3\ m, l = 0.6\ m, L = 10\ m, r = 0.5\ m,$$
$$e = 0.05\ m, h = 6\ m$$

زاویه‌ی تعادل استاتیکی به جهت ارضاء امکان نوسانات بیشینه‌ی سازه تا حدود °۴۴، با توجه به جنس و ابعاد سازه برابر $\overline{\psi} = 28.31°$ است.

برای انتخاب میراگر مناسب برای سیستم تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی (PTO) به منظور کنترل نوسانات نیازمند محاسبه‌ی نیروهای وارد از طرف موج بر بالشتک هستیم.

با توجه به ویژگی‌های موج نمونه موردی به انتخاب تئوری موج منظم مناسب برای مدل‌سازی موج می‌پردازیم. بدیهی است که امواج واقعی ناشی از باد منظم نیستند و ماهیتی تصادفی دارند. با این وجود اکثر روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌های فراساحلی مبتنی بر امواج منظم هستند [۲۱][۲۲]. در واقع تئوری‌های موج منظم شرایط واقعی را به شکل تقریبی مدل‌سازی می‌کنند، به طوریکه این تقریب برای اکثر اهداف مهندسی رضایت بخش است [۲۲]. تئوری موج منظم ایری، در محاسبات امواج مفروضی که ارتفاع آن‌ها در مقایسه با طول موج و عمق آب اندک است به کار می‌رود [۲۱]. زمانی که انجام محاسبات دقیق‌تر ضروری است، برای آن دسته از امواج طراحی که طولشان کمتر از حدود ۱۰ برابر عمق آب است باید از تئوری موج منظم استوکس استفاده شود [۲۱][۲۳]. به عبارت دیگر به علت کند بودن همگرایی سری در آب کم عمق محدوده کاربرد این تئوری در آب‌هایی است که عمق نسبی آن‌ها بزرگ‌تر از حدود ۰/۱ است [۲۳][۲۴]. چنین شرایطی معمولاً در امواج طوفانی که در طراحی جاذب‌های فرا ساحلی انرژی مد نظر قرار می‌گیرد برقرار است [۲۰].

یکی از ویژگی‌های اصلی تئوری استوکس که نسبت به تئوری ایری دقیق‌تر است، این است که این تئوری مقداری بزرگتری برای دامنه تاج موج در مقایسه با تئوری ایری ارائه می‌دهد. در واقع می‌توان گفت تئوری ایری قابل اعمال بر روی امواجی است که اختلاف دامنه‌ی تاج آن‌ها با آنچه توسط تئوری‌های دقیق‌تر تعیین شده است، از یک درصد بیش‌تر نباشد [۲۰]. بر این اساس می‌توان محدوده‌ای از مقادیر نسبت بلندی به طول موج را مشخص نمود که در آن محدوده، انتظار می‌رود نتایج به دست آمده از تئوری موج ایری دقت قابل قبولی داشته باشد. به عبارت دقیق‌تر شاخص انتخاب یکی از دو تئوری ایری و استوکس در آب‌های عمیق‌تر (همچون رکورد حاضر) نسبت ارتفاع به طول موج است [۲۱][۲۵] و به ازای نسبت‌های ارتفاع آب به طول موج بیشتر از ۰/۶۵ باید از تئوری استوکس استفاده کرد [۲۳].

از این رو با توجه به ویژگی‌های موج نمونه موردی و با استفاده از نمودارهای داده شده در مراجع [۲۳] و [۲۴] تئوری مناسب برای مدل‌سازی موج منظم، تئوری استوکس مرتبه‌ی پنجم است. با عنایت به محتاطانه بودن تئوری فرود کریلوف نسبت به تئوری تفرق از بُعد طراحی، نیروی تحریک امواج دریای خزر بر بالشتک از تئوری مذکور محاسبه گردید. از تئوری موج استوکس دامنه‌ی مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت و شتاب ذرات آب از [۲۰] به قرار روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه گردید.

$$u_0 = 0.093\left[\frac{m}{s}\right], v_0 = 0.025\left[\frac{m}{s}\right] \quad (۱۳)$$

$$\dot{u_0} = 0.118\left[\frac{m}{s^2}\right], \dot{v_0} = 0.013\left[\frac{m}{s^2}\right] \quad (۱۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

مؤلفه‌های افقی و قائم نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه از رابطه‌ی (۱۵) و مؤلفه‌ی گشتاورهای افقی، قائم و گشتاور کل به ترتیب از رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) به دست می‌آید [۲۰][۲۶].

در روابط ذیل، C_H و C_V ضرایب نیروی افقی و قائم، C_1 و C_2 پارامترهای فرکانس و k عدد موج است.

$$F_x = C_H \rho V [\dot{u}_0 + C_1 (ka) \omega v_0] \\ F_y = C_V \rho V [\dot{v}_0 + C_2 (ka) \omega u_0] \quad (۱۵)$$

$$M_1 = F_x L \sin \bar{\psi} \ , M_2 = F_y L \cos \bar{\psi} \quad (۱۶)$$

$$M_o = M_1 + M_2 \quad (۱۷)$$

ضریب میرایی آب نیز با استفاده از نمودارهای ارائه شده در مراجع [۲۷] و [۲۸] به قرار زیر تعیین می‌شود.

$$C_{Seawater} = 23.677 \left[\frac{KN.s}{m}\right] \quad (۱۸)$$

۴- معادله‌ی دینامیکی ارتعاشات سازه و شبیه‌سازی پاسخ ارتعاشی سازه

از آنجا که نیروهای اندرکنش آب و سازه، مقادیر ثابتی نداشته و با گذشت پریودهای زمانی مختلف مقادیر آن تغییر می‌کند؛ برای تحلیل دینامیکی نیروهای وارد بر سیستم مولد انرژی، نیازمند تعیین معادله‌ی دینامیکی حاکم بر اجزای غوطه‌ور هستیم.

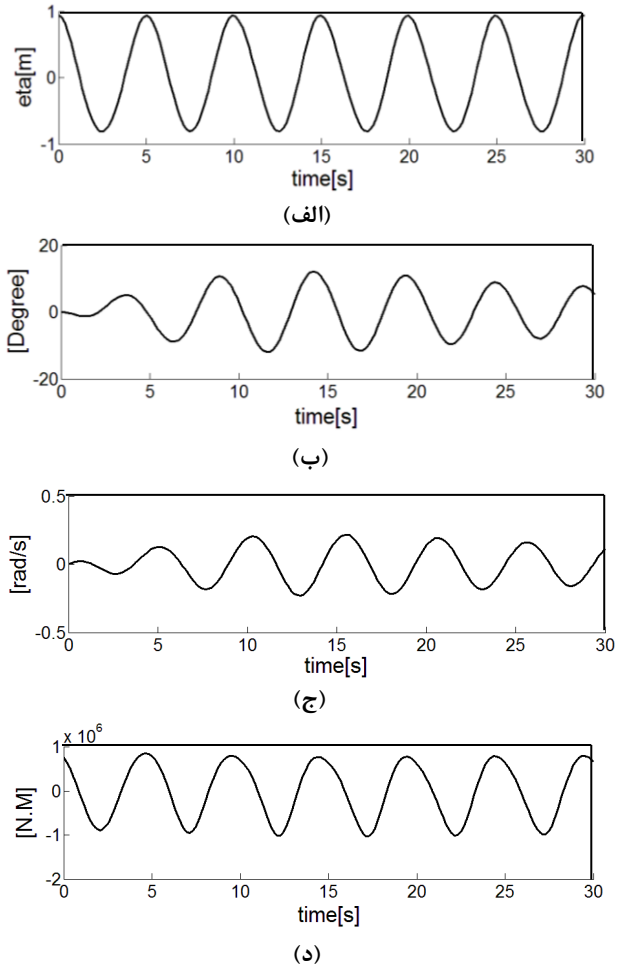
از این رو برنامه‌ای با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB جهت پیش‌بینی عملکرد دینامیکی و ارتعاشی توربین WaveStar با مدل‌سازی تئوری‌های امواج منظم و نیروی فرود-کریلوف برای تعیین نیروهای بر هم کنش آب و سازه نوشته شد. شایان ذکر است که از بین تئوری‌های امواج منظم نیز به دو تئوری ایری و استوکس مرتبه‌ی پنجم اکتفا شده است. در نهایت برای حل معادله‌ی ارتعاشی تحت نیروهای مستخرج از نیروی فرود کریلوف تحت دستور ode45 در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

معادله‌ی دینامیکی ارتعاشات سازه طبق رابطه‌ی (۱۹) استخراج و وارد تابع عملگر ode45 گردید.

$$I\ddot{\psi} + C_{Torsion,eq}\dot{\psi} + K_{Torsion,eq}\psi = M_0 e^{i(\delta - \omega t)} \quad (۱۹)$$

که در آن I ممان اینرسی سازه، $C_{Torsion,eq}$ ضریب میرایی نوسان pitch حول مفصل بازو و $K_{Torsion,eq}$ ضریب سختی نوسان pitch حول مفصل بازو است. (ضریب میرایی و سختی چرخش حول مفصل بازو)

ارتعاشات سازه‌ی باز طراحی شده تحت دو تئوری فوق الذکر و توسط برنامه‌ی مذکور مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج آن به صورت پروفیل مدل شده‌ی آب دریای خزر، زاویه‌ی نوسانات بازوی توربین بر حسب زمان برای کنترل برخوردهای احتمالی، سرعت زاویه‌ای و گشتاور مستخرج از نیروی امـواج بر حسب زمان به ترتیب در شکل‌های ۳- الف تا ۳- د برای کاربرد نمونه‌ی موردی در آبی به عمق ۲۰ متر ارائه گردیده است.



شکل ۳ - عملکرد مبدل انرژی بر حسب زمان
(الف): پروفیل آب (امواج منظم تحت تئوری استوکس مرتبه‌ی پنجم)
(ب): زاویه نوسان بازو (کنترل برخورد)
(ج): سرعت زاویه‌ای بازو
(د): گشتاور وارد بر بازو

چنانکه در شکل ۳- الف مشاهده می‌شود، پروفیل موج تحت پریود ۵ ثانیه و ارتفاعی به طول ۱/۷۵ متر به نوسان در آمده است. این حرکت منظم اسباب تغییر زاویه‌ی نوسانات بازو و بالشتک را در ثانیه‌های اولیه‌ی نوسان و در حالت ثابت فراهم می‌آورد. شکل ۳- ب جهت کنترل برخورد احتمالی ارائه شده است تا میزان تغییر نوسانات زاویه‌ای سازه، ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی، حول مفصل بازو مخرب نباشد. آنچنان که مشاهده می‌گردد مقدار بیشینه‌ی زاویه‌ی نوسان تحت شرایط مذکور ۱۴/۷۳ درجه است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

شکل ۳- ج میزان تغییرات سرعت و شکل ۳- د تغییرات گشتاور وارد بر توربین بسته به پروفیل موج استوکس مرتبه‌ی پنجم و نیروی فرود کریلوف را بر حسب زمان نشان می‌دهد.

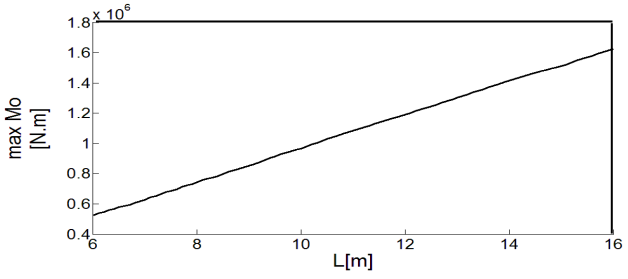
بیشینه گشتاور اعمالی حول مفصل، تحت حل تحلیلی برابر ۹۵۴/۷ [kN.m] به دست آمده است.

۵- بررسی تأثیر تغییر پارامترهای متعین سازه و امــواج دریا در عملکرد مبدل انرژی

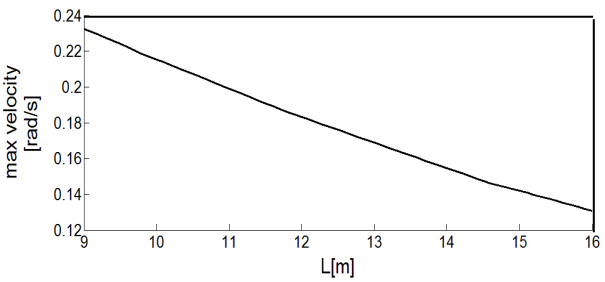
در طراحی سازه‌ی WaveStar متناسب با مشخصات دریای خزر، نیازمند علم بر میزان تأثیر تغییر در پارامترهای سازه و دریا در عملکرد بهینه‌ی مبدل انرژی در راستای افزایش استحصال انرژی هستیـم. از این رو در ادامه به بررسی تأثیر تغییر مقادیر طول بازو و قطر شناور از طرفی، و پریود و ارتفاع موج از طرف دیگر پرداخته شده است. در این بخش با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر مشخصات موج یا سازه، پاسخ ارتعاشی سیستم را به این تغییرات به دست آورده شده است.

گراف‌های شکل ۴ نتایج مربوط به بررسی تغییرات طول بازو بر پاسخ ارتعاشی سازه‌ای با قطر بالشتک ۶ متر تحت موج با پریود ۵ ثانیه و ارتفاع ۱/۷۵ متر در عمق ۲۰ متر، را نشان می‌دهند.

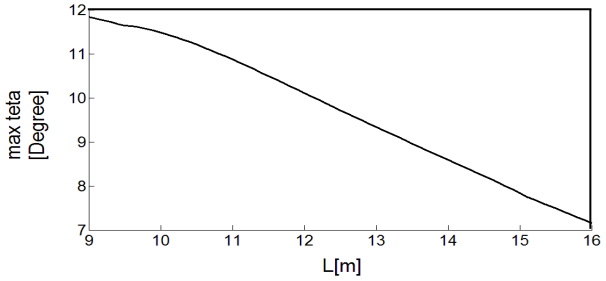
همان طور که در شکل ۴- الف دیده می‌شود با افزایش طول بازو گشتاور وارد شده به آن به صورت خطی افزایش می‌یابد و این نشان دهنده‌ی این است که برای استحصال گشتاور بیشتر، بهتر است که زاویه‌ی تعادل با افق کمینه مقدار ممکن باشد. از این رو یکی از مهم‌ترین پارامترهای بهینه‌سازی می‌تواند افزایش طول بازو جهت استحصال بیشتر نیرو باشد.



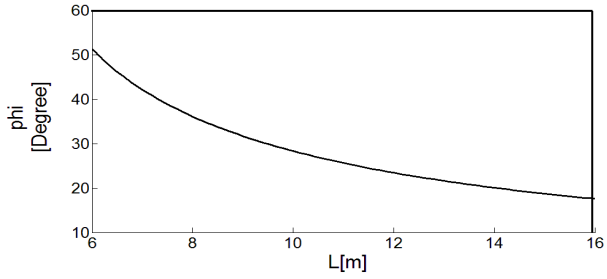
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴ - تأثیر تغییر طول بازو بر عملکرد مبدل انرژی
(الف): بیشترین گشتاور وارد بر بازو
(ب): بیشترین سرعت
(ج): بیشترین جابجایی
(د): زاویه‌ی تعادل

نکته‌ی قابل توجه در شکل‌های ۴- ب و ۴- ج این است که، افزایش طول بازو باعث کاهش بیشینه‌ی سرعت و جابجایی شده و این ممکن است به دلیل ماهیت توربین‌های WaveStar مناسب نباشد؛ لذا یک حالت بهینه را بسته به ماهیت توربین و نحوه‌ی عملکرد آن از نمودارهای بدست آمده می‌توان پیش‌بینی نمود. به عنوان مثال اگر ایجاد گشتاور بالا و در عین حال بیشینه‌ی جابجایی بازو مد نظر طراحان باشد طول بهینه بازو می‌تواند در محدوده‌ی ۹ الی ۱۱ متر انتخاب گردد. بدیهی است با افزایش طول بازو، زاویه‌ی تعادل و احتمال برخورد شناور و دیواره‌ی نگه‌دارنده‌ی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد (شکل ۴- د).

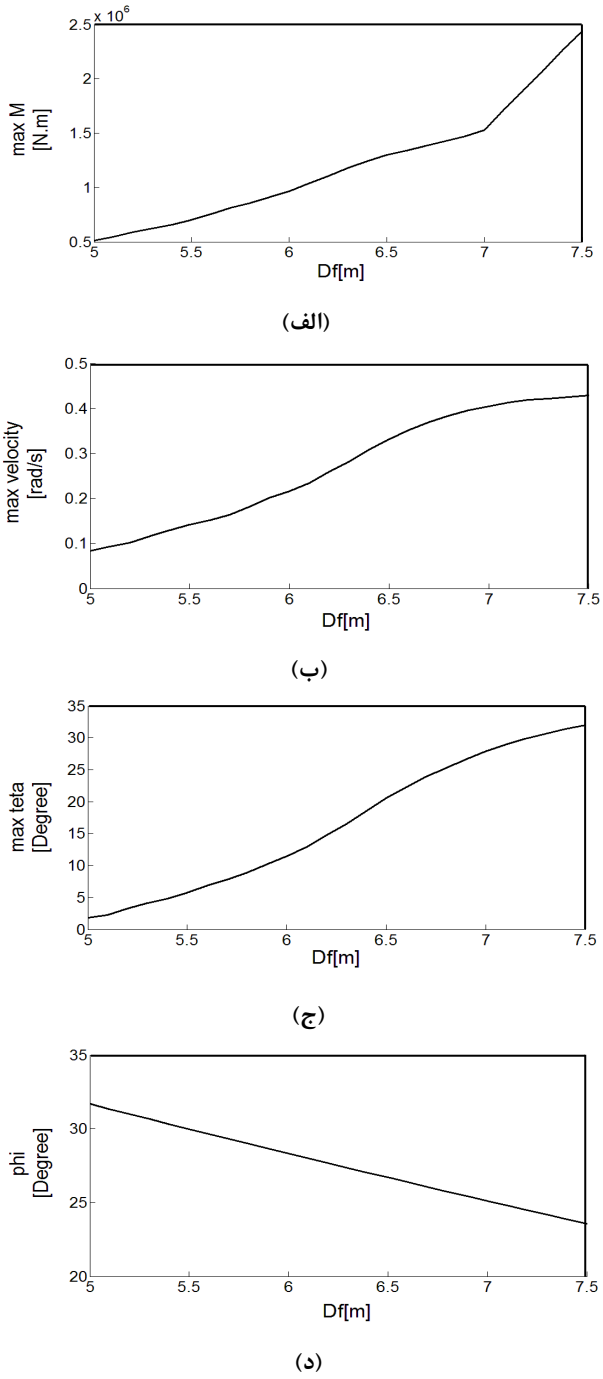
شکل ۵ نتایج مربوط به تأثیر تغییر قطر شناور بالشتک بر پاسخ ارتعاشی توربین را با فرض ثابت بودن طول بازو نشان می‌دهد.

در شکل ۵- الف مشاهده می‌شود که با افزایش قطر بالشتک گشتاور اعمالی به بازو افزایش می‌یابد، بطوریکه با ۱/۵ برابرکردن آن گشتاور وارد شده حدود ۵ برابر شده است. البته بررسی نمودارهای بعدی نشان دهنده‌ی این است که همواره افزایش قطر بالشتک منجر به تغییر سرعت زاویه‌ای ماکزیمم بازو با یک نرخ ثابت نخواهد بود و تغییر در قطر بالشتک با تغییرات سرعت بازو رابطه‌ی غیر خطی دارد. هر چند در نهایت، در این محدوده از قطر بالشتک با افزودن بر شعاع کره غوطه‌ور در آب هر دو مشخصه‌ی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

گشتاور تولیدی و سرعت زاویه‌ای نوسان افزایش می‌یابند. (شکل ۵- ب).



شکل ۵ - تأثیر تغییر قطر شناور بر عملکرد مبدل انرژی

(الف): بیشترین گشتاور وارد بر بازو

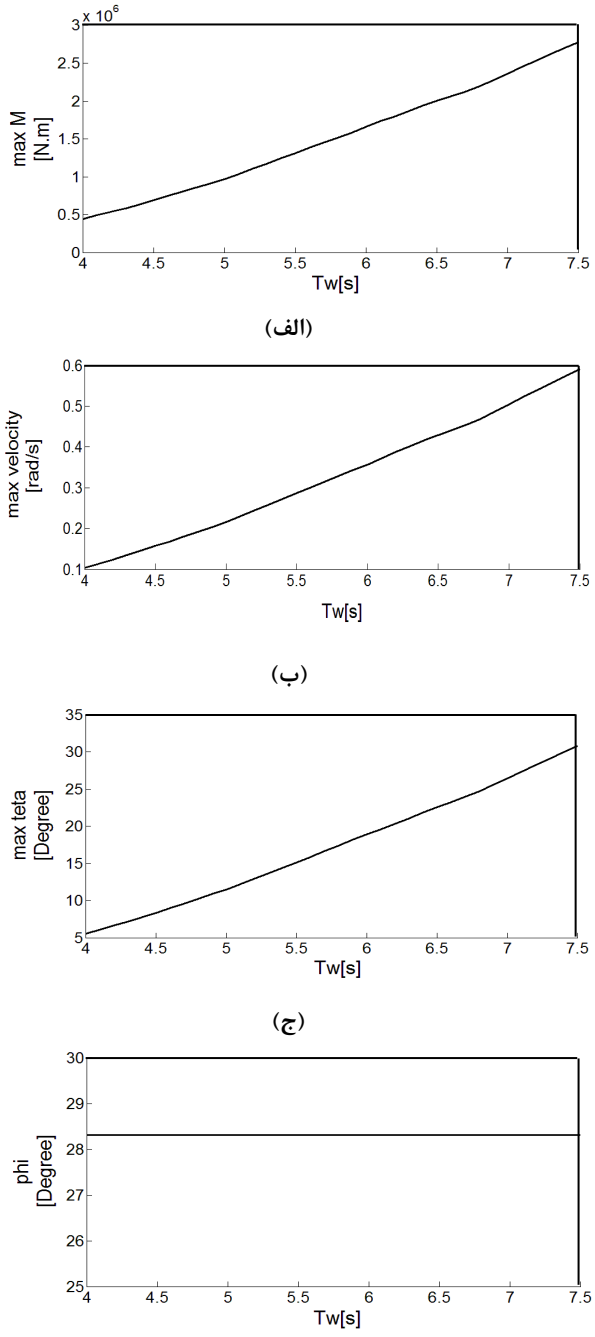
(ب): بیشترین سرعت

(ج): بیشترین جابجایی

(د): زاویه‌ی تعادل

با مقایسه شکل‌های ۵- الف و ۵- ج می‌توان اظهار داشت افزایش بیشینه مقدار جابجایی مبدل تحت تأثیر امواج دریا نیز، موجب ازدیاد انرژی استحصالی می‌شود. شکل ۵- د نشان می‌دهد با قطورتر شدن شناور، زاویه‌ی تعادل کاهش می‌یابد. قطر بالشتک تأثیر قابل توجهی در برخورد بالشتک سازه با پایه‌ی نگه‌دارنده نداشته، هر چند افزایش بیش از حد آن نیز می‌تواند تا حدودی از برخوردهای احتمالی جلوگیری کند.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر تغییرات دوره‌ی تناوب امواج دریا بر پاسخ ارتعاشی در شکل‌های ۶- الف تا ۶- د ارائه شده است.



شکل ۶ - تأثیر تغییرات دوره‌ی تناوب موج بر عملکرد مبدل انرژی

(الف): بیشترین گشتاور وارد بر بازو

(ب): بیشترین سرعت

(ج): بیشترین جابجایی

(د): زاویه‌ی تعادل

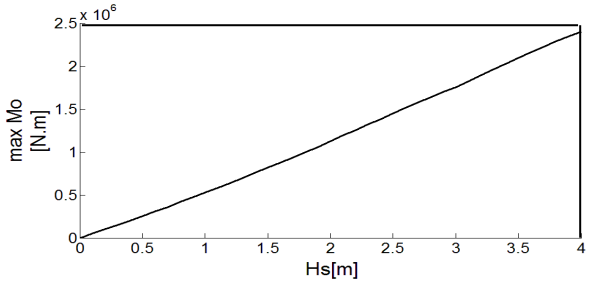
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

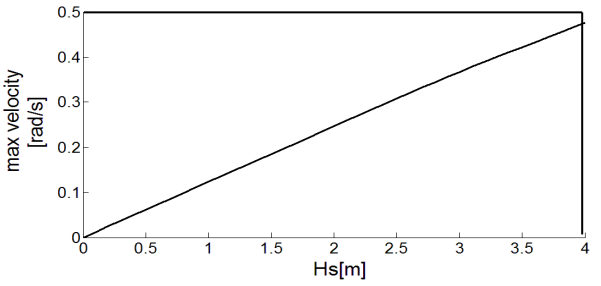
در گراف‌های شکل ۶ که طول بازو برابر ۱۰ متر و قطر بالشتک ۶ متر در نظر گرفته شده، ارتفاع موج ثابت و برابر ۱/۷۵ متر فرض شده است تا تنها اثرات ناشی از تغییر دوره تناوب امواج بر سازه مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. شکل ۶- الف نشان می‌دهد با افزایش دوره تناوب در بازه‌ی ۴ الی ۷/۵ ثانیه همواره گشتاور وارد شده به بازو افزایش می‌یابد.

محدوده‌ی تغییرات دوره تناوب به گونه ای انتخاب شده است که بتوان با استفاده از نیروی فرود کریلوف به تحلیل رفتار مبدل انرژی پرداخت و از حرکت به سمت حالت‌های حدی که ممکن بود در آن‌ها تقریب استفاده از این فرضیه با چالش مواجه گردد پرهیز گشته است. با توجه به نمودارهای دیگر می‌توان این نتیجه‌گیری کلی را کرد که در این بازه از دوره‌ی تناوب، با افزایش این پارامتر مقدار استحصال انرژی، سرعت و جابجایی بازو به صورت خطی افزایش می‌یابد. (شکل ۶- ب الی ۶- ج)

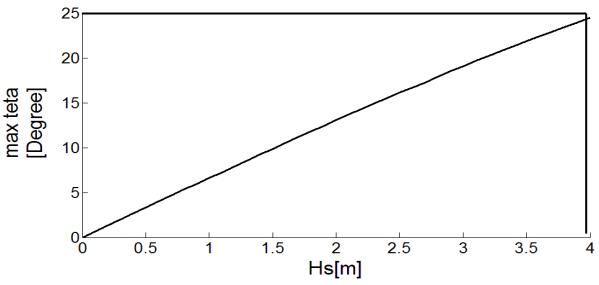
همچنین شکل‌های ۷- الف تا ۷- د نیز نتایج مربوط به بررسی تأثیر تغییر ارتفاع امواج دریا بر ارتعاشات مبدل WaveStar نمونه‌ی موردی در عمق ۲۰ متر را نشان می‌دهند که در آن‌ها پریود موج ثابت و برابر ۵ ثانیه فرض شده و طول بازو برابر ۱۰ متر و قطر بالشتک ۶ متر در نظر گرفته شده است.



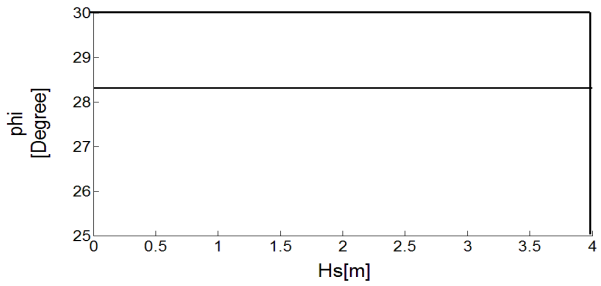
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷- تأثیر تغییرات ارتفاع موج بر عملکرد مبدل انرژی
(الف): بیشترین گشتاور وارد بر بازو
(ب): بیشترین سرعت
(ج): بیشترین جابجایی
(د): زاویه‌ی تعادل

از تحلیل تقریبی بر هم کنش آب و سازه به وسیله تئوری موج استوکس مرتبه‌ی پنجم و نیروی فرود کریلوف این نتیجه‌ی بدیهی به دست می‌آید که هر چه ارتفاع امواج دریا بلندتر باشد از لحاظ میزان جابجایی سازه، سرعت زاویه‌ای به وجود آمده و گشتاور اعمالی برای عملکرد بهینه‌ی توربین جهت استحصال انرژی بیشینه مناسب‌تر است (شکل ۷- الف الی ۷- ج). می‌توان دریافت که زاویه‌ی تعادل سازه متأثر از پریود و ارتفاع موج نیست (شکل۶- د و شکل ۷- د).

بدیهی است که تنها در امواج بسیار بلند است که احتمال برخورد سازه با دیواره وجود دارد که این مسئله را می‌توان با افزودن بر کمیت ضریب میرایی سیستم PTO رفع نمود. امواج بلند برای استحصال انرژی مناسب می‌باشند که البته بدیهی است که چنین ارتفاع و پریودهای موج بلندی برای دریای خزر عملاً امکان پذیر نبوده و مقادیر آن بسیار بیشتر از آن چیزی است که در این دریا اتفاق می‌افتد؛ لکن مناسب دیده شد تا عملکرد توربین WaveStar با مشخصات ذکر شده در مقاله‌ی حاضر، تحت دوره‌های تناوب و ارتفاع امواج بلند مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن بررسی گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر کارکرد مکانیزم توربین WaveStar تحت مشخصات امواج دریای خزر تحلیل شده و در ادامه پاسخ ارتعاشات سازه به امواج تحت تئوری موج منظم استوکس مرتبه‌ی پنجم بر مبنای محاسبه‌ی پارامترهای موج، در قالب نمودار ارائه و معادله‌ی دینامیکی ارتعاشات سازه استخراج گردیده است. بیشنیه‌ی گشتاور اعمالی حول مفصل تحت حل تحلیلی برابر [kN.m] ۹۵۴/۷ و میزان بیشینه تغییرات زاویه‌ی نوسان $^{\circ}$۱۴/۷۳ به دست آمده است. این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش طول بازو، گشتاور وارد به سیستم به صورت خطی افزایش می‌یابد. البته این افزایش اسباب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

کاهش بیشینه‌ی جابجایی و سرعت را نیز فراهم می‌آورد؛ به طوریکه طول بهینه‌ی بازو طبق پارامترهای موج دریای خزر می‌تواند در حدود ۹ الی ۱۱ متر انتخاب شود.

همچنین طبق بررسی‌های صورت گرفته عیان می‌گردد که با افزایش ۱/۵ برابری قطر بالشتک، گشتاور اعمالی به سازه حدود ۵ برابر رشد می‌کند. کاهش زاویه‌ی تعادل نیز از دیگر اثرات افزایش قطر بالشتک غوطه‌ور در آب است. لکن با توجه به اینکه نرخ تغییرات سرعت زاویه‌ای ماکزیمم بازو و جابجایی آن با تغییرات قطر بالشتک یکسان نیست، اما در نهایت در بازه‌ی مذکور با افزودن بر شعاع کره غوطه‌ور در آب هر دو مشخصه‌ی گشتاور تولیدی و سرعت زاویه‌ای نوسان افزایش می‌یابند.

در محدوده‌ی مورد نظر در این پژوهش برای دوره‌ی تناوب، با افزایش این پارامتر مقدار استحصال انرژی، سرعت و جابجایی بازو به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به تحلیل نیروی تحریک موج معین شد که هر چه ارتفاع امواج دریا بلندتر باشد، این امواج از لحاظ میزان جابجایی، سرعت زاویه‌ای و گشتاور اعمالی در عملکرد بهینه‌ی توربین جهت استحصال انرژی بیشینه موثرتر هستند.

کلید واژگان

1- Mean Water Level

2- Power Take Off system

۷- مراجع

1- Villate, J., (2010), *Situacion Actual de Las Energías Marinas y Perspectivas de Futuro*, Seminario Anual de Automatica, Electronica e Instrumentacion (SAAEI).

2- Fonseca, N., Pessoa, J., Pascoal, Morais, T. and Dias, R., (2010), *Design Pressure Distributions on the Hull of the Flow Wave Energy Converter*, Ocean Engineering, Vol. 37, p.611–626.

3- Andersen, M., Argyriadis, K., Butterfield, S., Fonseca, N., Kuroiwa, T. and Le Boulluec, M., (2007), *Ocean Wind and Wave Energy Utilization*, Proceedings of the 17th International Ship and Offshore Structures Congress, Seoul.

4- Falcão, A., (2010), *Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, p.899–918.

5- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F. and Hammarlund, K., (2002), *Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, p.405–431.

6- López, A., Iraide. A.J., Ceballos, S., Alegría, I. and Kortabarria, I., (2013), *Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, p.413–434.

7- Alamian, R., Shafaghat, R., Miri, S.J., Yazdanshenas, N. and Shakeri, M., (2014), *Evaluation of Technologies For Harvesting Wave Energy in Caspian Sea*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.32, p.468–476.

8- The Direction of Sea Current in the Caspian Sea. Available From: (http://www.caspinfo.net/content/content.asp?menu=0130000_000000), [accessed 13.07.16].

9- Wave Height and Height of Caspian Sea. Available from: (http://www.dmi.gov.tr/en-US/marine-metu3-detail.aspx?b=Hazar&t=H&s=03&g=p#sfB), [accessed 24.06.13].

10- Mahmoudzadeh, K. and Jafari, F., (2005), *Study of Caspian Sea and its Circumference*, 2nd ed, Dabizesh Publication, Tehran, Iran.

11- Barstow, S. Mork, G. Lonseth, L. and Mathisen, J., (2009), *Worldwaves Wave Energy Resource Assessments from the Deep Ocean to the Coast*, European Wave and Tidal Energy Conference, p.149–59.

12- Marquis, L., Kramer, M., Krimgelum, J., Chozas, J. and Helstrup, N., (2012), *Introduction of WaveStar Wave Energy Converters at the Danish Offshore Wind Power Plant Horns*, Rev 2, International Conference on Ocean Energy (ICOE).

13- Kramer, M., (2004), *WaveStar Energy*, *WaveStar Bølgekraftmaskine 1:40 Skala Model*, Denmark, n.d.

14- WaveStar Energy converter. Available from: (http://www.WaveStarEnergy.com), [accessed 13.07.16].

15- Kramer, M., (2006), *Numerical Modeling of Oscillating Body for Wave Energy Extraction*, Technical Report, Department of Civil Engineering,Aalborg University, Denmark.

16- Marquis, L., Kramer, M. and Frigaard, P., (2010), *First Power Production Figures from the WaveStar Roshage Wave Energy Converter*, 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao.

17- Iran Port & Maritime Organization, (2003), *The Second Phase of Sea Wave: of the Caspian Sea*, Administration of Coastal and Marine Engineering, Iran. (In Persian)

18- Golshani, A., Nakhaee, A., Taebi, S., Chegini, V. and Alaee, M.J., (2005), *Wave Hindcast Study of the Caspian Sea*, Journal of Marine Engineering, Vol. 1, p.19–25.

19- Millero, F.J. and Chetirkin, P.V., (1979), *The Density of Caspian Sea Waters*, Deep-Sea Research, Vol. 27, p.265-271.

20- Lotfollahi Yaghin, M.A. and Ahmadi, H., (2011), *Dynamics of Offshore Structures*, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian)

21- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., (2002), *Water Wave Mechanics*, University of Florida, USA.

22- Sorensen, R.M., (2006), *Basic Coastal Engineering*, Springer Science, Business Media, Inc.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]

23- Dawson, T.H., (1983), *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall Inc.
24- LeMehaute, B., (1969), *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Technical Report, Us Department of Commerce, USA.
25- Dean, R.G., (1970), *Relative Validity of Water Wave Theories*, Journal of Waterways Harbors and Coastal Engineering, ASCE 96.
26- Wilson, J.F., (2002), *Dynamics of Offshore Structures*, 2nd Edition, ISBN: 978-0-471-26467-5.
27- Kornev, N., (2011), *Ship Dynamics in Waves*, Universität Rostock.
28- Larsen, M.M., (2013), *Time-Domain Simulation of Floating, Dynamic Marine Structures Using USFOS*, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.5.0]