



ارزیابی تجربی مبدل انرژی موج نوع جاذب نقطه‌ای در استخر موج آزمایشگاهی

رضوان عالمیان، روزبه شفقت^{*}، امیرمحمد خزایی، عبدالرضا یوسفی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱ تیر ۱۳۹۴

بازنگری: ۱۵ دی ۱۳۹۴

پذیرش: ۴ بهمن ۱۳۹۴

ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

مبدل انرژی امواج دریا

دریای مازندران

آزمون تجربی

استخر موج

کالیبراسون موج

چکیده: انرژی نهفته در دریا، یکی از انواع تجدیدپذیر انرژی است که استفاده از آن، امکان تأمین انرژی مورد نیاز بخشی از جهان و کاهش میزان وابستگی به سوخت‌های فسیلی و سایر منابع تجدیدناپذیر را فراهم خواهد آورد. مبدل‌های انرژی موج، امکان استحصال انرژی را از امواج دائم دریا، فراهم می‌نمایند. در مسیر رسیدن به این فناوری، مدل‌سازی تجربی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شبیه‌سازی تجربی، عملکرد سامانه در شرایط گوناگون دریا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که برای اعمال این شرایط به‌طور معمول از یک استخر موج بهره گرفته می‌شود. در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی مبدل انرژی موج ساخته شده در آزمایشگاه هیدرودینامیک، آکوستیک و پیش‌رانش دریایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، در استخر موج این دانشگاه و برای بازه وسیعی از شرایط امواج دریا، مورد مطالعه و ارزیابی تجربی قرار گرفته است. هدف نهایی بررسی حرکت پیچ سامانه می‌باشد که در این راستا با ثبت مشخصات امواجی که در آن سامانه با حرکت پیچ مناسب انرژی الکتریکی قابل قبولی تولید نموده است، در نهایت مقیاس مناسب برای ساخت مدل واقعی جهت به‌کارگیری در دریای مازندران و میزان توان قابل استحصال از آن، شناسایی و معرفی شده است.

۱- مقدمه

انرژی حاصل از امواج دریا در سرتاسر دنیا، به‌عنوان یک منبع انرژی پاک، طبیعی، فراوان و تجدیدپذیر شناخته شده است. این منبع تجدیدپذیر، هیچ‌گونه آلودگی زیست‌محیطی نداشته و سبب افزایش گرمایش جهانی نمی‌شود. از مزایای این روش تولید انرژی، فراوانی موج، متناوب بودن و قابل پیش‌بینی بودن آن است. امکان تبدیل انرژی موج به انرژی قابل استفاده، الهام‌بخش تعداد کثیری از مخترعین و محققین بوده است. تا سال ۱۹۸۰، بیش از هزار اختراع در این زمینه ثبت شده بود [۱] و از آن زمان به بعد تعداد آن، به اندازه‌ی قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

به‌طور طبیعی، مطالعات اولیه با هدف شناسایی منابع انرژی موج در کشورهای پیشرو در زمینه‌ی فناوری انرژی موج توسعه داده شد. مک‌کورمیک یک بیان نظری را از قدرت موج ایجادشده توسط یک آرایه مستقیم‌الخط از مبدل‌های انرژی موج در دریا ارائه داده است [۲]. مک‌کابی و همکاران به بررسی توسعه مبدل انرژی موج ساخته‌شده در دانشگاه لنکستر با نام قورباغه PS پرداخته است [۳]. در این کار، اصول کاری سامانه با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داده شده است. آنها همچنین توان تقریبی خروجی سامانه را به‌دست آوردند. باباریت و همکاران سیستم مبدل انرژی موج جاذب نقطه‌ای سی‌رو را ارائه دادند [۴]. در این پژوهش، مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های عددی که هم در دامنه زمانی و هم فرکانسی جهت ارزیابی تولید برق در یک سایت مشخص توسعه داده شده بود، شرح داده شده است. در ادامه با

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مدل‌های عددی که اجرا شده بود، شکل هندسی و پارامترهای مکانیکی سامانه بهینه‌سازی شدند. براکو و همکاران یک مدل ۱:۴۵ با توان ۲/۲ وات را طراحی نموده و آن را در تانک موج مورد آزمایش قرار دادند [۵]. مبدل استفاده‌شده در این مقاله، یک سیستم WEC می‌باشد که از واکنش ژيروسکوپیک یک چرخ طیار چرخشی برای استخراج توان (که درون یک محفظه آب‌بندی شده شناور قرار دارد) استفاده می‌کند. هاردیستی یک مدل هارمونیک از مبدل نوع جاذب نقطه‌ای را برای محاسبه فرکانس تشدید و بازده جذب بدنه سامانه که در جهت هیو نوسان می‌کند، ارائه داده است [۶]. مدل با یک سری از آزمایش‌های آب ساکن و همچنین آزمایش‌های موج تک‌طیفی در یک فلوم آزمایشگاهی تست شده است. در این مقاله، روابط تجربی برای ضرایب جرم افزوده و میرایی سامانه استخراج شده است. تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بازده جذب تجربی در حالت تشدید، بیش از ۸۰٪ است. فلوکارد و فینیگان استخراج توان مبدل را به‌وسیله اصلاح اینرسی که توسط پرکردن بخشی از سامانه توسط آب انجام شده است، بهینه‌سازی نمودند [۷]. سامانه در نظر گرفته شده در این مطالعه، شامل یک جاذب نقطه‌ای استوانه‌ای پچی لولاشده به کف می‌باشد که به‌عنوان یک سامانه نزدیک ساحل (با عمق حدوداً ۲۵ متر) شناخته می‌شود. مزایای کلی اصلاح اینرسی نسبت به سازه با اینرسی ثابت، افزایش ۱۵ تا ۲۵ درصدی جذب انرژی می‌باشد.

در شبیه‌سازی تجربی، عملکرد سامانه در شرایط گوناگون دریا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که برای اعمال این شرایط به‌طور معمول از یک

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rshafaghat@nit.ac.ir



Fig. 2. Right side view of the wave tank

شکل ۲: نمای راست استخر

شکل ۳، سامانه موج‌ساز را نشان می‌دهد که توسط دستگاه اینورتر^۱ کنترل می‌شود. سامانه موج‌ساز طراحی شده، امکان آزمایش را در ۱۵ طول بازو با جابجایی افقی ۶ تا ۳۶ سانتی‌متر برای صفحه موج‌ساز فراهم می‌نماید. این سامانه به یک موتور ۵ کیلوواتی و یک گیربکس کاهنده دور، مجهز بوده و دور موتور را از ۱۰ تا ۱۵۰ دور در دقیقه برای سامانه موج‌ساز تامین می‌نماید. در شکل ۴، شمایی از موتور متصل به موج‌ساز ارائه شده است.

شکل ۵، دمپر استفاده‌شده در استخر موج را نشان می‌دهد. این دمپر در ۴ حالت قابل تنظیم می‌باشد که وضعیت آن برای عمق‌های مختلف آب تغییر داده می‌شود.

شکل ۶ نمای شماتیکی از استخر به‌همراه مبدل را نشان می‌دهد. در شکل، محل قرارگیری مبدل و همچنین سامانه فیلمبرداری از آن نشان داده شده است. دوربین استفاده‌شده برای ثبت حرکت مبدل و نوسانات امواج در این تست‌ها، دوربین نیکون مدل COOLPIX L830 می‌باشد. اندازه‌گیری میزان نوسانات مبدل و همچنین مشخصات امواج با استفاده از آنالیز تصویر



Fig. 3. The wave maker system

شکل ۳: سامانه موج‌ساز

استخر موج بهره گرفته می‌شود. با توجه به این مسئله، در مقاله حاضر، از استخر موج برای شبیه‌سازی امواج دریا و تست تجربی مبدل انرژی موج ساخته شده، جهت تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی استفاده شده است. در این آزمایش‌ها تلاش بر این است که بتوان امواج دریای مازندران را در آن شبیه‌سازی نمود. در سال‌های اخیر، دریاهای بسیاری در سرتاسر دنیا توسط افراد متعددی بررسی شده ولی دریای مازندران با وجود داشتن سطح انرژی مطلوب تا کنون مورد توجه زیادی قرار نگرفته است. به همین علت نیاز دیده شده است تا در این کار، دریای مازندران معرفی شده و نمودار سالیانه انرژی امواج این دریا ارائه شود. در طول آزمایش، امواج با مشخصات دوره تناوب و ارتفاع‌های مختلف در استخر تولیدشده و مبدل انرژی موج ساخته‌شده جهت استحصال انرژی الکتریکی در آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتهای مقاله، مقیاس مناسب برای ساخت مدل واقعی جهت بکارگیری در دریای مازندران و میزان توان قابل استحصال از آن، به‌دست آمده و گزارش شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

با توجه به مطالعات نیازسنجی و محاسبات انجام‌شده، برای آزمایش سامانه مبدل انرژی موج طراحی شده، استخری به طول ۱۱ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۳ متر در آزمایشگاه هیدرودینامیک، آکوستیک و پیشرانس دریایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل طراحی و ساخته شده است. این استخر، شامل سامانه موج‌ساز جهت تولید امواج مورد نظر و ساحل (دمپر) جهت شبیه‌سازی ساحل دریا و جلوگیری از آشفتنی موج‌های برگشتی و برخورد آن‌ها با مبدل می‌باشد. در شکل‌های ۱ و ۲، نماهای چپ و راست از استخر ارائه شده است. همان‌طور که در این نماها مشاهده می‌شود، راهرویی جهت دسترسی به مبدل و سیستم مهاربندی آن و همچنین پنجره‌هایی جهت مشاهده عملکرد مبدل و فیلم‌برداری از آن تعبیه شده است.



Fig. 1. Left side view of the wave tank

شکل ۱: نمای چپ استخر

مازندران، از مبدل فرانسوی سیرو' الگوبرداری شده است [۸]. در سیستم انتقال قدرت این سامانه، بر خلاف نمونه فرانسوی، از سیستم چرخ‌دنده و زنجیر استفاده شده است تا حرکت نوسانی پاندول‌ها به حرکت دورانی جهت اتصال به ژنراتور استفاده شود؛ لذا حرکتی که در مبدل حائز اهمیت است، حرکت پیچ (چرخش حول محور عمود بر پاندول) می‌باشد. سامانه مبدل انرژی موج، در شکل ۷ نشان داده شده است.

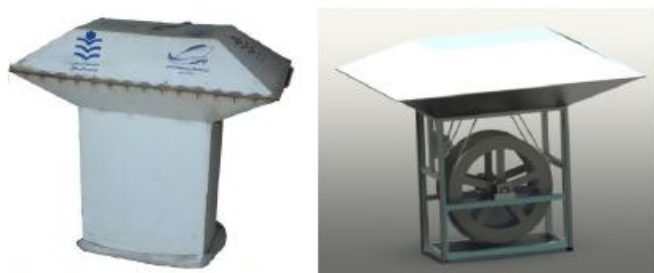


Fig. 7. The pendulum used in the bottom part of the WEC (right side), the outer shell of the WEC (left side)

شکل ۷: پاندول استفاده شده در بخش زیرین مبدل (سمت راست)، پوسته بیرونی مبدل انرژی موج (سمت چپ)

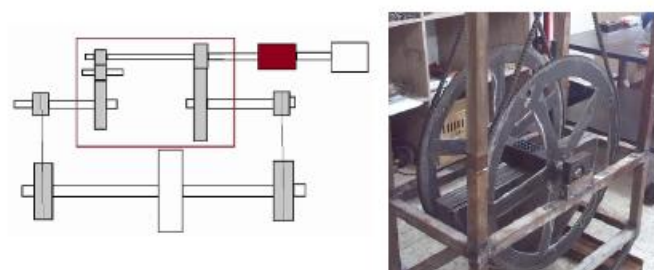


Fig. 8. Pendulum installed in the WEC along with the mounted weights among it (right side), schematic of the chain-and-gear system (left side)

شکل ۸: پاندول نصب شده در مبدل به همراه وزنه‌های نصب شده در بین آن (سمت راست)، شکل شماتیک سیستم چرخ‌دنده و زنجیر (سمت چپ)

مشخصات شاخص و مزایای این سامانه، به‌طور خلاصه عبارتند از:

۱. قرار گرفتن تمامی قسمت‌های متحرک در داخل بدنه: عدم تماس مستقیم با آب دریا- کاهش هزینه‌های خرابی
۲. قرار گرفتن پاندولی بزرگ با مرکز جرم خارج از مرکز برای تولید نوسان مناسب با قابلیت چندین نوسان حول محور افقی خود: قابلیت بقای بیشتر نسبت به امواج بی‌شمار دریا
۳. نیاز نداشتن به سیستم خارجی و بستر دریا برای اتصال: کم شدن هزینه‌های نگهداری و اتصال
۴. انتقال آسان سامانه به ساحل برای تعمیرات احتمالی، در صورت بروز خرابی: در مقایسه با سامانه‌های ثابت
۵. نیاز نداشتن به تکنولوژی خیلی پیشرفته به دلیل شناور بودن: کاهش هزینه‌های ساخت
۶. امکان نصب آرایه‌ای از چند ده عدد از این سامانه را می‌توان در



Fig. 4. Motor and moving mechanism of the paddle

شکل ۴: نمایی از موتور و مکانیزم به حرکت درآورنده صفحه موج‌ساز



Fig. 5. The damper system of wave tank

شکل ۵: نمایی از دمپر موج استخر تست

توسط نرم‌افزار Tracker انجام شده است. برای اندازه‌گیری مشخصات امواج توسط این نرم‌افزار، یک بویه به فاصله ۲ متر قبل از مبدل قرار داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار Tracker، حرکات نقطه نارنجی بالای بویه در زمان ثبت می‌گردد. در واقع این نرم‌افزار، جایابی نقطه نارنجی مذکور را در زمان دنبال کرده و با استفاده از نموداری خروجی از آن، ارتفاع و پریود موج به دست می‌آید.

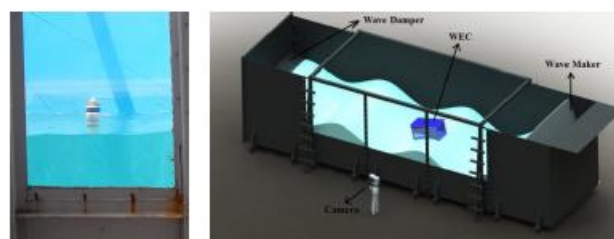


Fig. 6. schematic view of the wave tank along with the WEC (right side), the buoy used to measure the wave characteristics in the wave tank (left side)

شکل ۶: شماتیکی از استخر به همراه مبدل (سمت راست)، بویه استفاده شده در استخر جهت اندازه‌گیری مشخصات امواج (سمت چپ)

مبدل استفاده شده در طول آزمایش درون پوسته‌ای جهت آب‌بندی کامل آن قرار داده شده و شامل پاندول و سیستم انتقال قدرت می‌باشد. طرح این مبدل بر اساس مطالعه‌ای جامع برای به‌کارگیری مبدل مناسب در دریای

نواحی مختلف آن، در شکل ۹ نشان داده شده است.

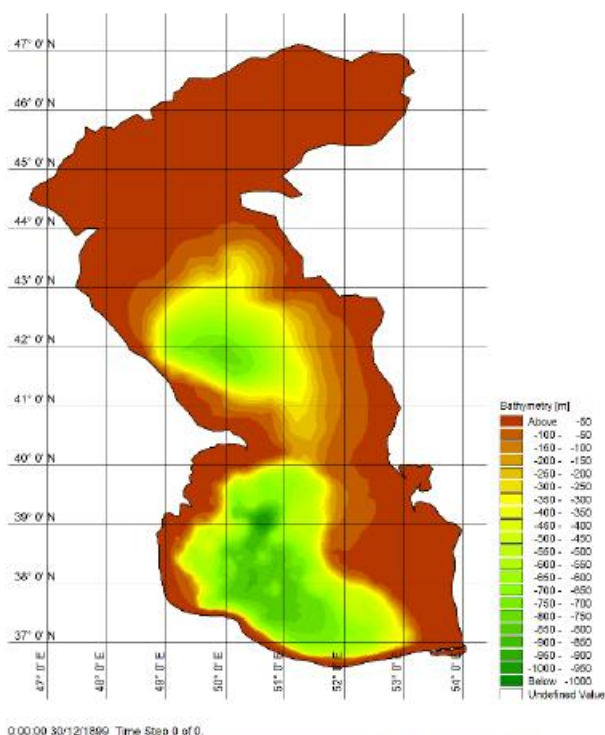


Fig. 9. Bathymetric contour map of the Caspian Sea

شکل ۹: عمق نواحی مختلف دریای مازندران [۱۰]

۳-۲- امواج دریای مازندران

اطلاعات استفاده شده برای این مطالعه، شامل پریود، ارتفاع مؤثر و انرژی موج از سال ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۱۳ در مزره‌های آبی ایران، بخش‌های جنوبی دریای مازندران در نزدیکی شهر بابلسر می‌باشد که با پریود ۶ ساعت ثبت شده است. علت انتخاب این نقطه، پتانسیل بالای انرژی امواج در آن در مقایسه با بقیه نقاط و همچنین نزدیکی آن به محل ساخت مبدل جهت سهولت در تست و کاهش هزینه‌ها می‌باشد. داده‌های مورد استفاده در این مقاله، از سرور ECMWF استخراج شده است. سرور ECMWF¹ یک پروژه ادغام داده‌های هواشناسی می‌باشد که در آن داده‌های اندازه‌گیری شده در یک مدت زمان طولانی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با استفاده از آنها و مدل‌سازی‌های عددی، مشخصات امواج و باد در آینده پیش‌بینی می‌شوند. این مدل‌های عددی، برای پیش‌بینی حالت‌های هواشناسی، بر اساس این که چگونه یک سیستم هوایی از حالت اولیه با زمان تحول پیدا می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از اطلاعات این پروژه در مقالات بسیاری دریا مقایسه شده است [۱۱-۱۴]. نتایج بررسی شده، حاکی از اعتبار و تطبیق مناسب داده‌های آن با داده‌های واقعی می‌باشد.

شکل ۱۰ میزان انرژی متوسط‌گیری شده زمانی و قابل انتقال در واحد

گستره وسیعی از دریا: عدم تأثیرپذیری از ساحل

۷. تناسب این سامانه با امواج با طول موج کوتاه و ارتفاع متوسط

شاخص: مقرون به صرفه بودن استفاده از آن در دریای مازندران

با توجه به مشخصات امواج این دریا

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به مبدل انرژی موج ساخته شده و شرایط

تست، ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به مبدل انرژی موج ساخته شده و شرایط تست

Table 1. Information related to the built WEC and test conditions

مقدار	مشخصات
۸۳۲ kg	وزن مبدل
۱/۳۰۲ m	ارتفاع سطح آب‌خور مبدل
۰/۸۳۲ m ³	حجم زیر آب مبدل
۱۷۴ kg	وزن پاندول
۱/۵۱ m	ارتفاع آب درون استخر

۳-۳- دریای مازندران

۳-۱- معرفی دریای مازندران

دریای مازندران به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه زمین، آب‌گیر بسته‌ای در نیم‌کره شمالی کره زمین است که تقریباً در مرز آسیا و اروپا واقع می‌باشد. طول شرقی آن از نصف‌النهار گرینویچ ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۱ دقیقه می‌باشد و در امتداد شمالی جنوبی حول مدار نصف‌النهار شرقی ۵۰ درجه قرار داشته که بالاترین نقطه آن در عرض جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و پایین‌ترین نقطه آن در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی می‌باشد [۹]. کشورهای همسایه این دریا به ترتیب از جنوب به شرق عبارتند از: ایران در جنوب، ترکمنستان و قزاقستان در شرق و شمال شرقی، روسیه در شمال غرب و غرب و آذربایجان در غرب. طول خط ساحلی آن نیز حدود ۷۰۰۰ کیلومتر است که حدود ۱۰۰۰ کیلومتر از آن (از آستارا تا رودخانه اترک) جزو سواحل ایران می‌باشد. قابل ذکر است، دریای مازندران دریای آرامی نبوده و در اکثر مواقع از سال به دلیل قرارگیری در مسیر باد، امواج است. این دریای امواج، پتانسیل فوق‌العاده زیادی برای تبدیل انرژی امواج دارا است که متأسفانه تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است. دریای مازندران اگرچه حوضه آبی بسته است، اما به دلیل گستره زیاد و عمق بسیار آن و همچنین سامانه‌های جوی مختلف گذرنده بر روی آن، در بسیاری از زمان‌ها، بادهای شدید و طوفانی را تجربه می‌کند که به تبع آن امواج طوفانی و مرتفع ایجاد می‌شوند. قسمت شمالی این دریا بسیار کم عمق بوده، به طوری که تنها نیم درصد آب این دریا در یک چهارم شمالی دریا قرار دارد. عمق دریا از شمال به جنوب افزایش می‌یابد و به حدود ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ متر در برخی نقاط می‌رسد. شکل شماتیک تغییر عمق دریای مازندران در

1 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

طول جبهه موج، برای ارتفاع مؤثر و پریود موج در نقطه انتخابی در نزدیکی شهر بابلسر را نشان می‌دهد. طراحی و یا انتخاب نوع مبدل باید به گونه‌ای باشد که بیشترین راندمان را در بازه ۰/۵ تا ۱ متر برای پارامتر ارتفاع مؤثر موج (Hs) و ۴ تا ۶ ثانیه برای پارامتر پریود موج (Te) داشته باشد. در این بازه، میزان انرژی ۲/۲۶ مگاوات ساعت بر واحد طول جبهه موج در اختیار می‌باشد.

۴- نتایج

در این بخش نتایج مربوط به تست‌های انجام‌شده گزارش شده است. تست‌ها شامل دو بخش می‌باشند. بخش اول مربوط به کالیبراسیون استخر تست بوده، در بخش دوم با در نظر گرفتن مدل در داخل استخر، پس از انجام تست‌های مختلف بر روی آن، نتایج به‌دست آمده از آن تحلیل شده است.

۴-۱- کالیبراسیون استخر تست

در آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، ابتدا آزمایش‌های مربوط به کالیبراسیون موج انجام‌شده است. برای شناخت امواج تولیدی جهت اعمال بر روی مبدل انرژی موج، صفحه موج‌ساز برای کلیه حالات ممکن مورد آزمایش قرار گرفت. تست‌ها برای تعداد ۱۳ طول بازو و دور موتور ۱۰-۷۰ دور در دقیقه برای بازوهای کوچک و ۱۰-۳۰ دور در دقیقه برای طول بازوهای بزرگ انجام‌شده است. هرکدام از این بازوها، با فاصله افقی مختص به خود، موج با دامنه و طول موج معینی را تولید می‌کند. امواج تولیدشده توسط صفحه موج‌ساز در تمامی حالات مورد تحلیل قرار گرفته و اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج به‌دست آمده از آنها بر حسب ارتفاع موج و همچنین دوره تناوب موج مرتب و دسته‌بندی شدند. نمایش تمامی نتایج به‌دست آمده بسیار حجیم بوده، در اینجا میسر نمی‌باشد. لذا در جدول ۳، تنها برخی از نتایج مربوط به کالیبراسیون به‌طور مختصر، جهت معرفی ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج مختصر کالیبراسیون موج بر حسب ارتفاع موج

Table 3. Brief results from wave calibration by wave height

دور موتور (RPM)	شماره بازو	دوره تناوب موج (ثانیه)	ارتفاع موج (سانتی‌متر)
۲۰	۳	۳	۳
۷۰	۱	۱	۷
۳۰	۲	۲	۷
۵۰	۴	۱/۱	۱۱
۳۰	۵	۲	۱۱
۳۰	۷	۲/۸	۱۱
۴۰	۷	۲/۲	۱۴
۲۵	۱۳	۱/۹	۱۴
۵۰	۵	۱/۱	۲۰
۵۰	۷	۱/۱	۲۶

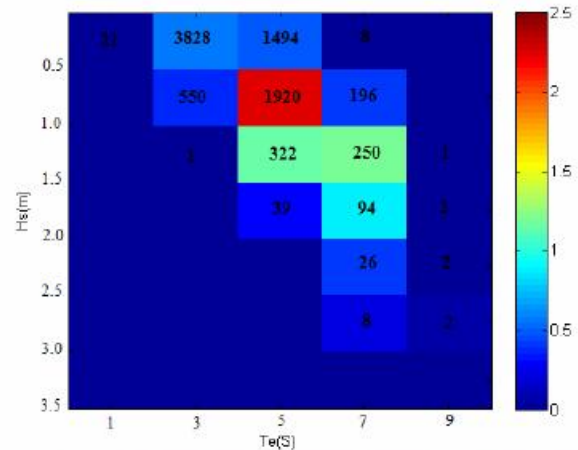


Fig. 10. Combined scatter and energy diagrams of the annual energy corresponding to sea states in different ranges of Hs and Te for site near the Babolsar (the colour scale represents total annual energy per unit length of wave front, the bold numbers indicate the occurrence of sea states in number of hours per year).

شکل ۱۰: نمودار ترکیبی پراکندگی و انرژی از انرژی امواج بر حسب پارامترهای ارتفاع مؤثر و پریود موج برای ناحیه نزدیک بابلسر (مقیاس رنگی، میزان کل انرژی سالانه در واحد طول جبهه موج و اعداد برجسته، میزان احتمال اتفاق افتادن یک شرایط خاص از امواج را بر حسب تعداد ساعات در سال، ارائه می‌دهد)

جدول ۲، مشخصه‌های امواج دریای مازندران را در حالات بیشترین توان قابل استخراج و به ترتیب اولویت‌ها در سایت منتخب نشان می‌دهد. طراحی و یا انتخاب نوع مبدل باید به گونه‌ای باشد که بیشترین راندمان را در اولویت ۱ داشته باشد.

جدول ۲: اولویت‌های مشخصه‌های امواج دریای مازندران برای انتخاب نقاط با حداکثر راندمان

Table 2. The priorities of the wave characteristics of the Caspian Sea for selecting sites with maximum efficiency

اولویت	پریود موج (ثانیه)	ارتفاع موج مؤثر (متر)	انرژی قابل استحصال (مگاوات ساعت بر واحد طول جبهه موج)	درصد احتمال وقوع از سال
۱	۴-۶	۰/۵-۱	۲/۲۶	۲/۹
۲	۶-۸	۱-۱/۵	۱/۱۹	۲/۹
۳	۴-۶	۱-۱/۵	۱/۱۶	۳/۷

$$\frac{P_2}{P_1} = \alpha_L^{3.5} \quad (3)$$

که در آن، H ارتفاع موج، T دوره تناوب موج، P توان موج و α_L نسبت مدل و ابعاد واقعی می‌باشد.

جدول ۴: نتایج تست سامانه در حضور مبدل

Table 4. The WEC test results in the presence of the WEC

طول بازو	دور موتور (RPM)	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	دور تناوب موج (ثانیه)
۱۰	۲۷	۱۱/۲	۲/۰۸۴
۱۱	۲۷	۷	۱/۹۵۴
۱۲	۲۸/۵	۱۰/۴	۱/۹۳۷
۱۳	۲۸	۱۴/۶	۱/۹۹۴
۱۴	۲۸/۵	۲۱/۳	۱/۹۸۶

طبق شکل ۱۰، همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، اولویت اول برای طراحی مبدل و در واقع بیشترین توان قابل استحصال سالیانه در دوره تناوب بین ۴ تا ۶ ثانیه و ارتفاع موج ۰/۵ تا ۱ متر می‌باشد. با توجه به جدول ۴ و اعمال مقیاس ۱:۵ و ۱:۶ به آنها، تقریباً تمامی این امواج در اولویت اول یا دوم دریای مازندران قرار می‌گیرند. این امر نشان از این واقعیت است که مبدل ساخته‌شده برای نصب در دریای مازندران بسیار مناسب می‌باشد.

شایان ذکر است که در حالتی که اندازه واقعی مبدل نهایی کمتر از ۵ و یا بیشتر از ۶ برابر باشد، بیشتر نقاطی که مبدل در آن دارای بهترین عملکرد است، در خارج از ناحیه اولویت اول دریای مازندران قرار خواهد گرفت. با توجه به این امر، مقیاس ۱:۵ و ۱:۶، مقیاس مناسبی برای ساخت مدل واقعی است. با توجه به رابطه (۳) و با توجه به این که مدل ساخته‌شده دارای توان تقریبی ۱۰۰ وات است، مدل‌های واقعی با مقیاس ۱:۵ و ۱:۶ دارای توان‌های تقریبی ۲۸ و ۵۳ کیلووات خواهند بود که توان قابل ملاحظه‌ای است و استفاده آرایه‌ای از این مبدل‌ها در کنار هم می‌تواند انرژی الکتریکی مورد نیاز منطقه‌ی نسبتاً بزرگی را پوشش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مبدل انرژی موج ساخته‌شده به کمک استخر موج آزمایشگاه هیدرودینامیک، آکوستیک و پیش‌رانش دریایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مورد آزمون و ارزیابی تجربی قرار گرفته است. در ابتدا، امواج تولیدشده توسط سامانه موج‌ساز بررسی و کالیبره شدند. از نتایج کالیبراسیون برای تولید یک موج مشخص با توجه به شرایط دریای مازندران استفاده‌شده است. در ادامه، مبدل انرژی موج در استخر تست قرار داده شد و برای بازه گسترده‌ای از امواج مورد ارزیابی قرار گرفت. امواجی که در آن سامانه دارای

۴-۲- تست مبدل داخل استخر تست

در مرحله بعد و پس از کالیبره نمودن سامانه تست، مبدل موج در آن قرار داده شده است. تست با حضور مبدل نیز در تمامی حالات طول بازو و دورهای مختلف موتور، انجام شده است. شکل مبدل به همراه لامپ‌های روشن که در واقع نشان‌دهنده میزان توان استحصال شده از مبدل می‌باشد، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



Fig. 11. The WEC with lamps in the test system

شکل ۱۱: مبدل به همراه لامپ‌ها در سامانه تست

در سامانه تست شکل ۱۱، عملکرد مبدل در امواج مختلفی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است تا شرایطی که از آن می‌توان به توان مورد نظر دست یافت، مشخص شود. تست با حضور مبدل نیز در تمامی حالات، طول بازو و دورهای مختلف موتور، انجام شده است. جدول ۴ نشان‌دهنده نتایجی است که در آن لامپ‌ها به خوبی روشن شده و توان حدوداً ۱۰۰ وات از آن استخراج شده است.

در جدول ۴، علاوه بر مشخصات حالتی که میزان توان و روشنایی استخراج شده از سامانه قابل قبول بوده، مشخصه موج متناظر با آن‌ها نیز ارائه شده است. به منظور استفاده از نتایج به دست آمده برای حالات واقعی دریا، باید مدل را در اندازه واقعی در نظر گرفت. در این راستا، اندازه واقعی مبدل برای دو حالت ۵ و ۶ برابر مدل در نظر گرفته شده است. با استفاده از عدد فرود، شرایط امواج دریا برای این دو حالت در حالتی که مبدل لامپ‌ها را روشن می‌نماید، محاسبه شده است. روابط بین ارتفاع موج و دوره تناوب موج مدل اصلی و ابعاد واقعی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\frac{H_2}{H_1} = \alpha_L \quad (1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \alpha_L^{1/2} \quad (2)$$

- "SEAREV: A fully integrated wave energy converter," *Proceedings of the OWEMES'09*, 2006.
- [5] Bracco, G., E. Giorcelli, and G. Mattiazzo, "ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation," *Mechanism and Machine Theory*, 46 (2011): 1411-1424.
- [6] Hardisty, J., "Experiments with point absorbers for wave energy conversion," *Journal of Marine Engineering & Technology*, 11 (2012): 51-62.
- [7] Flocard, F. and T. D. Finnigan, "Increasing power capture of a wave energy device by inertia adjustment," *Applied Ocean Research*, 34 (2012): 126-134.
- [8] Alamian, R., R. Shafaghat, S. J. Miri, N. Yazdanshenas, and M. Shakeri, "Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32 (2014): 468-476.
- [9] Mahmoudzadeh, K. and F. Jafari, *Study of Caspian Sea and its circumference*, 2nd ed. Tehran: Dabizesh Publication, 2005.
- [10] Bathymetry of the Caspian Sea, <<http://irancoasts.pmo.ir/en/phases/phase5/rsltacvmnt/nmrclm dl/crntm dl>>.
- [11] Akpınar, A. and M. İ. Kömürçü, "Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea," *Energy*, 42, (2012): 289-302.
- [12] Liang, B., F. Fan, F. Liu, S. Gao, and H. Zuo, "22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas," *Renewable Energy*, 71 (2014): 200-207.
- [13] Reikard, G., P. Pinson, and J.-R. Bidlot, "Forecasting ocean wave energy: The ECMWF wave model and time series methods," *Ocean Engineering*, 38 (2011): 1089-1099.
- [14] E. Rusu and F. Onea, "Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea," *Energy*, 50 (2013): 1-14.

حرکت پیچ مناسب بوده و انرژی الکتریکی قابل قبولی از آن استحصال گردیده‌اند، گزارش شده است. در نهایت برای ابعاد ۵ و ۶ برابر مدل و برای به‌کارگیری در دریا، مشخصات دوره تناوب و ارتفاع موج مناسب دریا برای استخراج انرژی از این مبدل به‌دست آمده است. نشان داده شده است که این مقیاس‌ها، مقیاس مناسبی برای ساخت مدل واقعی با توجه به شرایط دریای مازندران است. توانی که از این مبدل‌ها به‌دست خواهد آمد، برای مدل‌های واقعی با مقیاس ۱:۵ و ۱:۶ دارای برابر ۲۸ و ۵۳ کیلووات خواهند بود که توان قابل ملاحظه‌ای است. استفاده آرایه‌ای از این مبدل‌ها در کنار هم می‌تواند انرژی الکتریکی مورد نیاز منطقه‌ی نسبتاً بزرگی را پوشش دهد.

تشکر و قدردانی

از سازمان توسعه برق ایران (IPDC) و آزمایشگاه هیدرودینامیک، آکوستیک و پیش‌رانش دریایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل بابت ارائه کمک‌های فنی، اجرایی و مالی تقدیر شده و از حمایت‌های آنها تشکر می‌شود.

منابع

- [1] McCormick, M. E., "Ocean wave energy conversion," *New York, Wiley-Interscience*, vol. 1, 1981.
- [2] McCormick, M. E., "Wind-wave power available to a wave energy converter array," *Ocean Engineering*, 5 (1978): 67-74.
- [3] McCabe, A., A. Bradshaw, J. Meadowcroft, and G. Aggidis, "Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter," *Renewable Energy*, 31 (2006): 141-151.
- [4] Babarit, A., A. Clement, J. Ruer, and C. Tartivel,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

R. Alamian, R. Shafaghat, A. M. Khazaei, A. Yousefi, "Experimental Evaluation of a Point Absorber Wave Energy Converter in a Laboratory Wave Tank", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 93-100.
DOI: 10.22060/mej.2016.754

