



تبدیل انرژی امواج با سیستم جاذب فرش بستر دریا

محمدحسین جهانگیر^{۱*}، حسن مجدم^۲، حسین یوسفی^۳

۱- استادیار، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

* صندوق پستی تهران، ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، mh.jahangir@ut.ac.ir

چکیده

انرژی یکی از اساسی‌ترین چالش‌های روبروی همه جوامع است که در صورت عدم توجه کافی به آن موجب بروز خطرات متعددی در همه جنبه‌های زندگی بشر مانند عقب‌افتادگی اقتصادی و مشکلات امنیتی می‌شود. انرژی امواج دریا یکی از اقسام انرژی‌های تجدیدپذیر است که از دیرباز منبع تأمین توان مصرفی جوامع بشری بوده است. تاکنون جاذب‌های مختلفی وابسته به شرایط خاص موجود اقیانوس‌ها توسعه یافته است. بسیاری از ایده‌های نوآورانه برای تبدیل موج به نیروی محرکه در سه دهه اخیر اختراع شده‌اند. سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته در نیروگاه‌های موج باعث می‌شود تا در آینده نزدیک با نیروگاه‌های متعارف رقابت کنند. فرش بستر دریا یکی از جاذب‌های موجود می‌باشد که از مزایای قابل‌توجهی در مقایسه با سایر سیستم‌های تولید توان برخوردار است. مطالعه حاضر به بررسی ساختار و عملکرد این جاذب با هدف شناخت بیشتر به منظور امکان‌سنجی استفاده در دریا‌های ایران می‌پردازد. در این مقاله ابتدا به مطالعه ادبیات موجود در حوزه استحصال انرژی پرداخته شده است. سپس به بررسی پارامترها و مزایای استفاده از جاذب فرش بستر دریا می‌پردازد. همچنین روابط ریاضی مربوط به محاسبه توان و بازده عملی دستگاه به‌طور گسترده بسط داده شده‌اند.

کلیدواژگان: فرش بستر دریا، تولید برق، انرژی امواج دریا، فرش بستر انعطاف‌پذیر

Energy conversion of the waves using seabed carpet system

Mohammad hossein Jahangir^{1*}, Hassan Mojaddam², Hossein Yousefi³

1- Assistant Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Master of Science (MSc) Student, Renewable Energies Engineering, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, mh.jahangir@ut.ac.ir

Received: 20 November 2018 Accepted: 2 February 2019

Abstract

Energy is one of the most fundamental challenges faced by all societies, which, lack of attention to it, causes many dangers in all aspects of human life. The energy of the sea waves is one of the types of renewable energies that has been sources of energy used in human societies. so far, the different absorbents is developed on the specific conditions in the oceans. Many innovative ideas have been invented to transform the wave into power generation in the last three decades. The seabed carpet is one of the available absorbents, which offers significant advantages over other power generation systems. the present study investigates the structure And the function of this absorbent is to further understand the feasibility of using in the seas of Iran. This paper first explores the parameters and advantages of using a seabed carpet absorbent by studying literature on energy extraction. Also, mathematical relations related to the calculation of the power and efficiency of the device have been extensively expanded.

Keywords: Seabed carpet, Power generation, Sea wave energy, Flexible bed carpet



۱- مقدمه

الکتريسيته توليدي توسط اين مبدل‌ها مي‌توان براي تصفيه و شيرين سازي آب دريا و همچنين براي تأمين الكتريسيته موردنياز پمپ‌ها در نيروگاه‌هاي برق‌آبي، كه يكي از پربازده‌ترين راه‌ها براي ايجاد تعادل در شبكه الكتريكي است، استفاده كرد.

در همين راستا تاكنون جاذب‌هاي مختلف بر اساس شرايط مختلف فزيكي امواج توليدشده‌اند. فرش مبدل انرژي امواج (CWEC) يكي از جاذب‌هاي موجود مي‌باشد كه با بهره‌گيري از جذب بخش چشم‌گيري از انرژي كف دريا مي‌تواند منبع خوبي براي مناطق ساحلي باشد. اين دستگاه متشكل از يك صفحه ويسكوالاستيك، فنرها، ژنراتورهاي متصل به صفحه انعطاف‌پذير مي‌باشد تا بتواند خاصيت ويسكوالاستيك گل‌لاي كف دريا را القا كند.

۲- پيشينه تحقيق

بررسي‌هاي متعددي در مورد تبديل انرژي موج در قالب كتاب، مقالات كنفرانس، مجله و گزارش منتشرشده است. امكان تبديل انرژي موج به انرژي قابل‌استفاده، الهام‌بخش بسياري از مخترعان است: بيش از هزاران اختراع تا سال ۱۹۸۰ ثبت‌شده‌اند و از آن زمان تعداد قابل‌توجهي افزايش‌يافته است [۵]. پوشيو ماسودا، يك افسر نيروي دريايي سابق ژاپن است كه از آن به‌عنوان پدر فن‌آوري مدرن انرژي موج ياد مي‌شود. او در دهه ۱۹۴۰ توانست اولين جاذب شناور انرژي موج مجهز به توربين هوا را بسازد كه در واقع همان چيزي بود كه بعدها به‌عنوان ستون آب شناور (OWC) شناخته شد. اين شناورها در ژاپن از سال ۱۹۶۵ (و بعداً در ايالات‌متحده آمريكا) تجاري شدند [۶]. به دليل وقوع جنگ‌هاي جهاني اول و دوم و همچنين قيمت پايين سوخت‌هاي فسيلي توسعه انرژي امواج با وقفه طولاني همراه بود.

مطالعات سالتر از دانشگاه ادينبورگ در سال ۱۹۷۴ براي ايجاد يك منبع انرژي جايگزين با اختراع سالترزداك^۱ به نتيجه انجاميد [۷]. ايده نوسانگر موج ارشميدس^۲ (AWS) توسط گاردنر و بروگل در سال ۱۹۹۳ مطرح شد تا اولين نمونه آن پس از آزمايشات در مقياس كوچك در سال ۱۹۹۷ در هلند (در مقياس ۱:۲۰) و در سال ۱۹۹۸ در ايرلند (در مقياس ۱:۵۰) ساخته شود [۸]. در آغاز سال ۱۹۹۷ شركت فناوري‌هاي برق‌آبي آمريكا اقدام به توليد جاذب پاوربوي كرد كه نمونه‌هاي اوليه خود را در اقيانوس آرام و اطلس تحت آزمايش در آب اقيانوس قرارداد [۹]. دستگاه پلاميس، ساخته كمپاني اسكاتلندي انرژي موج پلاميس (شركت انتقال انرژي اقيانوس سابق) سال ۲۰۰۴ كه براي اولين بار به شبكه سراسري انتقال نيروي بریتانيا متصل شد. اين اولين دستگاه تبديل انرژي موج دريا به الكتريسيته بود كه خارج

انرژي يكي از اساسي‌ترين چالش‌هاي روبروي همه جوامع است كه در صورت عدم توجه كافي به آن موجب بروز خطرات متعددي در همه جنبه‌هاي زندگي بشر مي‌شود. نگراني درباره تغييرات زيست‌محيطي در کنار قيمت روزافزون سوخت‌هاي فسيلي باعث وضع قوانيني مي‌شود كه بهره‌برداري و تجاري‌سازي منابع سرشار تجديدپذير را تشويق مي‌كنند. کاهش شديد منابع سوخت‌هاي فسيلي و هسته‌اي و تخریب محیط‌زیست توسط آلاینده‌های ناشی از بهره‌برداري از اين منابع انرژي، گزینه استفاده و توسعه کاربرد انرژي‌هاي تجديدپذير را امري ضروري و اجتناب‌ناپذير نموده است. انرژي موج در دريا و اقيانوس‌ها بر اثر وزش باد روی سطح آب توليد مي‌شود. انرژي مكانيكي باد كه در اثر جذب نابرابر گرمای پرتوهای فروسرخ و نور مريي خورشيد به وجود مي‌آيد، به شكل انرژي پتانسيل گرانشي در آب دريا ذخيره شده كه پس از مدت كوتاهي آب دريا آن را به شكل انرژي جنبشي (موج) پس مي‌دهد [۱]. انرژي امواج يكي از اقسام انرژي‌هاي تجديدپذير است كه از پتانسيل بالقوه‌اي جهت تأمين الكتريسيته دارا مي‌باشد. مجمع بين‌المللي تغييرات اقليمي (IPCC) با ارزيابي جامع پتانسيل تئوري انرژي امواج، رقم قابل‌ملاحظه TWh/yr ۳۲۰۰۰ گزارش داده است [۲].

البته مسلم است كه همه اين ظرفيت قابل استحصال نمي‌باشد. با اين وجود توليد انرژي به اين روش آلودگي در بر ندارد. گاهي اوقات انرژي موج با انرژي باد در ۲۵ سال پيش مقايسه مي‌شود، درست زماني كه اين صنعت (انرژي باد) نه‌تنها طراحي منحصربه‌فردي نداشت بلكه هيچ موافقت‌نامه جهاني مبني بر توسعه آن وجود نداشت اما هم‌اكنون مي‌توان شاهد بود كه اين صنعت به يكي از مهم‌ترين منابع توليدكننده انرژي تجديدپذير جهان تبديل شده است. اكنون با مشاهده توسعه صنعت انرژي باد، مي‌توان تكامل انرژي موج را براي در بازه زماني كوتاه‌تر پيش‌بيني كرد.

نيروگاه‌هاي امواج دريا منابع مهم توليد توان در طول زمان پيك مصرف هستند از اين رو قابليت كنترل سيستم عرضه و تقاضا را بهبود مي‌بخشند. مولدهاي كوچك موجي مي‌توانند در نواحی دور دست كه انتقال برق مقرون‌به‌صرفه نيست، به كار روند. از آنجايي كه آب حدود ۸۰۰ برابر چگال‌تر از هواست، تراكم انرژي موج بيش از انرژي باد و انرژي خورشيدي است و مقدار انرژي موجود براي برداشت را افزايش مي‌دهد [۳]. از طرف ديگر يكي از بزرگ‌ترين چالش‌هاي سده كنوني افزايش تقاضاي انرژي در شهرهاي ساحلي مي‌باشد به طوري كه در همين راستا پيش‌بيني مي‌شود در سال ۲۰۲۵ تقريباً ۳ ميليارد نفر در ۲۰۰ كيلومتری ساحل دريا زندگي كنند كه اين مسئله باعث افزايش نگراني‌ها براي تأمين انرژي اين مناطق شده است [۴]. از

^۱Carpet of Wave Energy Conversion^۲oscillating water column^۳Salter's Duck^۴Archimedes Wave Swing^۵Intergovernmental Panel on Climate Change

فرش بستر را با استفاده از یک راه حل زمان جابجایی هیدروالاستیک مرتبط کنند. عالم در سال ۲۰۱۲ توانست مدلی تحلیلی برای مبدل انرژی فرش انعطاف‌پذیر برای دستیابی به بازده حداکثر ارائه دهد [۱۸]. او همچنین به تجزیه و تحلیل رفتار غیرخطی یک فرش در برداشت انرژی موج اقیانوس پرداخت. مطالعات او نشان داد ما نشان می‌دهیم که با در نظر گرفتن تعاملات غیرخطی مرتبه بالا، بهره‌وری فرش بستر می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیشتر برای امواج صاف باشد [۱۹]. لمان و همکاران به‌صورت نظری و تجربی استخراج نیروی موج چند جهت و پهنای باند فرش مصنوعی دریایی را برآورد کردند [۲۰]. از سوی دیگر آن‌ها یک مدل تحلیلی پایه، توسعه یافته و بهینه‌سازی شده یک نمونه اولیه مقیاس برای آزمون ژنراتور موج، نتایج تجربی و بحث‌ها ارائه کرده‌اند [۲۱]. جهانگیر و همکارانش مطالعه و ارزیابی‌های اولیه برای تولید انرژی با استفاده از فناوری فرش بستر دریا انجام داده‌اند [۲۲]. همچنین معلمی و همکاران توانستند مدلی تحلیلی از این جاذب را برای شرایط خلیج فارس ارائه دهند. نتایج مدل آن‌ها نشان داد این جاذب به دلیل بازده بالا در آب‌های کم و عمق گزینه مناسبی برای استحصال انرژی در خلیج فارس است [۲۳].

۳- روش تحقیق

در این مقاله ابتدا به تشریح مکانیزم عملکردی سیستم جاذب پرداخته شده است. در گام بعدی به فرمولاسیون و روابط موجود جهت محاسبه تولید توان و عملکرد سیستم اشاره شده است. در نهایت به برخی ویژگی‌های منحصر به فرد جاذب اشاره شده است.

۴- تشریح مکانیزم عملکرد مکانیکی

این فرش به منظور استخراج انرژی امواج گرانشی سطحی بکار برده می‌شود. در این سیستم مجموعه‌ای از فنرها که دارای ضرایب سختی هستند k^* به‌صورت خطی ترکیب شده‌اند. در واقع نقش این فنرها فراهم آوردن نیروی بازگرداننده برای فرش است. در اینجا ژنراتور به‌وسیله میرا سازهای با ضریب b^* به منظور استخراج انرژی مدل شده است. فاصله بین هر ماژول فنر خیلی کوچک‌تر از طول موج‌های معمولی عبوری فرض می‌شود. با این فرض پیوستگی فنریت و میرایی معتبر است. طراحی سیستم این مبدل انرژی شامل چهار مؤلفه اصلی "فرش جاذب انرژی"، "اتصالات"، "سیستم بالابرنده" (PTO) و "مهارکننده‌ها" است.

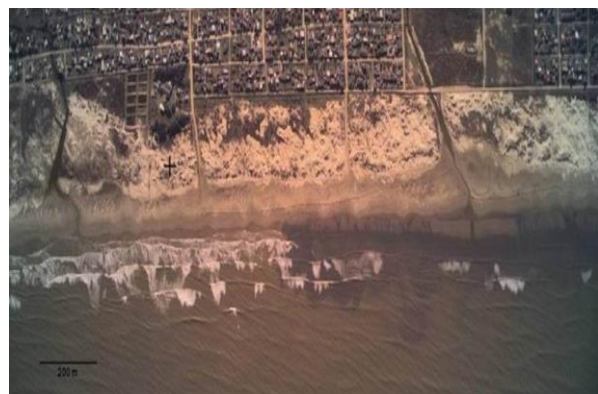
فرش جاذب انرژی موج عبوری را جذب و آن را به اتصالات منتقل می‌کند. اتصالات، انرژی دریافتی را به واحد هیدرولیک منتقل و در آنجا این واحد، انرژی جنبشی موج عبوری را به انرژی

^aPower take off

از ساحل و در دل دریا کار تبدیل انرژی را انجام می‌داد [۱۰]. دانشگاه ادینبورگ سیستم جاذب آکوامارین^۱ را در سال ۲۰۰۵ توسعه داد تا بتواند انرژی موجود در امواج نزدیک به ساحل را جذب کند [۱۱]. مادسون با حمایت مالی اتحادیه اروپا، آژانس توسعه و لز، اداره انرژی دانمارک توانست درآگون امواج^۲ را پس از چند نمونه آزمایشی در سال ۲۰۱۱ بسازد [۱۲].

تولید انرژی از سیستم‌های جاذب امواج مجاور دریا به‌سختی فراهم می‌شود که همین امر باعث شده با وجود انرژی پتانسیل بالا، هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده باشند. یکی از موانع اصلی استفاده از این انرژی ایمنی در برابر آسیب‌های طبیعی دریا و مباحث اقتصادی می‌باشد لذا ساخت دستگاهی که بتواند بیشترین استحصال انرژی و ایمنی در برابر سیلاب باشد، از اهمیت خاصی برخوردار است.

برای دستیابی به هدف بالا، سیلوستر مطالعاتی را درباره برداشت انرژی به‌وسیله جاذب که با الهام‌بخشی از نیروی قوی موج در سطح گلی کف دریا، صورت داد [۱۳]. مشاهدات مکفرسن به‌صورت تجربی نشان داده شده است که ماهیگیران مکزیکی در هنگام وقوع طوفان-های شدید و موج شدن دریا به سمت نواحی که کف آن گلی می‌باشد، پناه می‌آورند و همین اتفاق باعث شروع ایده‌ای برای جذب انرژی امواج به نام فرش بستر دریا شد [۱۴]. جید نشان داد که بستر گل‌آلود خلیج مکزیکی می‌تواند نقش میراسازی امواج دریا در بستر ساحل را ایفا کند [۱۵]. شکل ۱ نمای بالای یک ساحل در برزیل را نشان می‌دهد که تفاوت طول موج در محل گل لای دریا مشخص شده است [۱۶].



شکل ۱ تفاوت طول موج در محل گل لای دریا در محل ساحلی ساحل کاسینو، برزیل

مطالعات اولیه برای استحصال انرژی از بستر دریا توسط کولا و همکاران صورت گرفت [۱۷]. آن‌ها توانستند به‌صورت عددی حرکت

^۱Aquamarine Power
^۲Wave Dragon

۴-۲- اتصالات

میله‌هایی هستند که به منظور اتصال مستقیم فرش به PTO متصل استفاده می‌شوند در اینجا این میله‌ها از جنس آلومینیوم انتخاب شده‌اند.

۴-۳- سیستم بالابرنده

این واحد برای ایفای دو وظیفه مستقر در سیستم قرار داده شده است:

- میراسازی حرکت فرش جاذب انرژی
- ایجاد نیروی بازگرداننده در جهت عمودی برای پیستون‌ها به منظور مقابله با جابجایی مثبت ایجاد شده در پمپ‌ها

۴-۴- مهارکننده‌ها

مهارکننده‌ها وظیفه اتصال واحد PTO را به بستر دریادارند. در عین حال، آن‌ها باید اجازه چرخش را به PTO در جهت عمودی بدهند. علت این موضوع را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که با حرکت موج سطحی که سبب تغییر شکل فرش می‌شود، قسمت بالایی پیستون و اتصالات در جهت محور Xها و Zها جابجا می‌شود. به همین علت PTO باید بتواند در جهت محور عمودی چرخش کند.



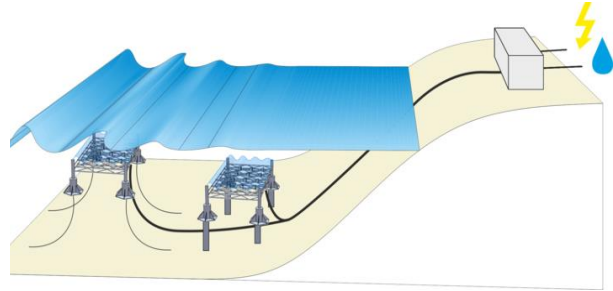
شکل ۴ نمای از قطعات تشکیل شده فرش بستر دریا [۱۹]

۵- بیان ابعاد و اندازه‌های نمونه تجاری سازی ساخته شده

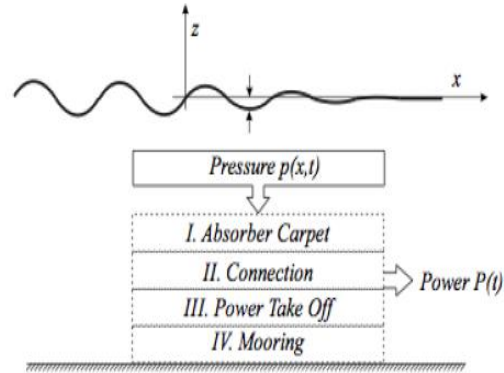
نمونه آزمایشگاهی جاذب که در دانشگاه برکلی طراحی شده است دارای مخزنی به طول ۳۰ متر، ۴۵ سانتی‌متر عرض متر و ۳ متر ارتفاع می‌باشد. سطح درونی مخزن شامل پنل‌های صاف طولانی که با اهرم‌های فولاد مهار شده‌اند تشکیل شده است. سرتاسر دیواره و سطح پنل‌ها در دو انتهای مخزن به وسیله صفحات فولاد ضدزنگ پوشیده شده، در حالی که پنل‌های جانبی در طرفین تانک از پلاستیک روشن ساخته شده‌اند.

موج‌ساز در یکی از انتهای دور از مخزن موج واقع شده است که توسط یک موتور طراحی شده است. موج‌ساز در انتهای مخزن موج قرار دارد و از طریق یک شفت به موتور متصل می‌شود. موج‌ساز از طیف وسیعی از مخزن موج عبور می‌کند تا

مکانیکی قابل استفاده تبدیل می‌کند. در نهایت مهارکننده وظیفه اتصال سیستم PTO، به بستر دریا را دارد. با این مشخصات، چهار مؤلفه اصلی ذکر شده به شکل زیر در کنار یکدیگر عمل می‌کنند و ویژگی‌های هر کدام به شرح زیر است. شکل ۲ و ۳ به ترتیب شماتیک اجزای فرش بستر جهت تولید توان و مؤلفه‌های اصلی تشکیل دهنده مبدل فرش جاذب انرژی [۲۴]:



شکل ۲ شماتیک اجزای فرش بستر جهت تولید توان



شکل ۳ مؤلفه‌های اصلی تشکیل دهنده مبدل فرش جاذب انرژی

۴-۱- فرش جاذب انرژی

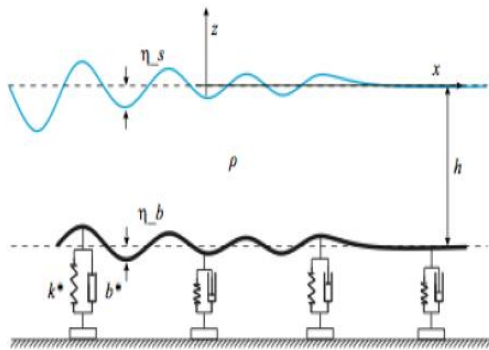
در اینجا برای اینکه فرش پیوستگی خود را حفظ کند لازم است که به صورت همگن ساخته شود. فرش باید در امتداد محور Xها رفتار الاستیک داشته باشد به همین منظور مدول یانگ ماده سازنده فرش باید پایین باشد تا به فرش اجازه تغییر طول نسبت به طول اولیه‌اش را بدهد. مدول یانگ پایین تنها به وسیله پیوستگی در مواد سازنده فرش به دست می‌آید و در اینجا به منظور برقراری پیوستگی، صفحه انعطاف پذیر از جنس پلاستیک طبیعی با ضخامت $6/35 \text{ mm}$ و با مدول یانگ $0/045$ به عنوان فرش جاذب انرژی فرض شده است. میزان انرژی تبدیل شده، رابطه مستقیم با جابجایی فرش در محل قرارگیری پیستون‌ها در واحد دارد ولی در کل هیچ انرژی در این قسمت تبدیل نمی‌شود. شکل ۴ نمای از قطعات تشکیل شده فرش بستر دریا را نشان می‌دهد.

^۴Young's Modulus



اضافه گردیده است. همچنین معادلات حاکم از درجه دوم به صورت کامل تشریح شده‌اند.

برای سیال در سطح آزاد و بالای فرش انعطاف‌پذیر و غیر چرخشی، همگن و تراکم ناپذیر فرض گردیده است. فرش در عمق $Z=-h$ بررسی شده است (مطابق شکل ۷). با این فرضیات و با صرف‌نظر از کشش سطحی معادلات خطی‌سازی شده‌اند. معادلات پتانسیل سرعت φ و ارتفاعات زیرین و سطحی η_b و η_s با توجه به تنش سطحی به صورت زیر نوشته شده است:



شکل ۷ شماتیکی از فرش ویسکوالاستیک مصنوعی بستر دریا

$$\nabla^2 \varphi = 0, \quad -h + \eta_b < z < \eta_s \quad (الف-۱)$$

$$\eta_{s,t} + \eta_{s,x} \varphi_x = \varphi_z, \quad Z = \eta_s \quad (ب-۱)$$

$$\varphi_t + \frac{1}{\rho} (\varphi_x^2 + \varphi_z^2) + g\eta_s = 0, \quad Z = \eta_s \quad (پ-۱)$$

$$\eta_{b,t} + \eta_{b,x} \varphi_x = \varphi_z, \quad z = -h + \eta_b \quad (ت-۱)$$

$$\varphi_t + \frac{1}{\rho} (\varphi_x^2 + \varphi_z^2) + g\eta_b + \frac{P_b}{\rho} = 0, \quad z = -h + \eta_b \quad (ث-۱)$$

$$b^* \eta_{b,t} + K^* \eta_b + P_b, \quad z = -h + \eta_b \quad (ج-۱)$$

در معادلات حاضر شتاب گرانشی g ، تراکم مایع ρ ، فشار روی فرش بستر P_b ، ضریب میرایی فرش بستر b^* و ضریب سختی پایین پایه ویسکوالاستیک در واحد سطح K^* می‌باشد. شکل خطی از معادلات حاکم یک موج نشان داده شده است.

$$\eta_s = a_s e^{i(kx - \omega t)} \quad (الف-۲)$$

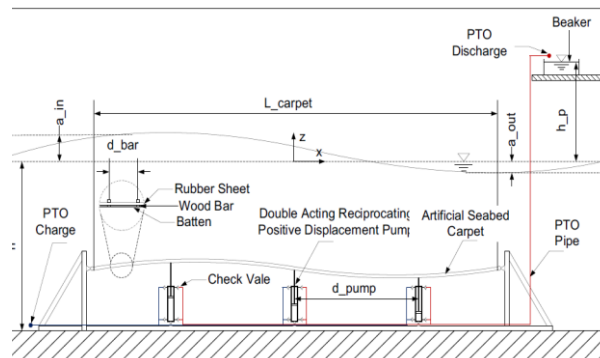
$$\eta_b = a_b e^{i(kx - \omega t)} \quad (ب-۲)$$

$$\varphi = (Ae^{kz} + Be^{-kz}) e^{i(kx - \omega t)} \quad (پ-۲)$$

از امواج در طرف عقب تخته موج جلوگیری کند. موج‌ساز، امواج را برای شبیه‌سازی چند حالت دریایی ایجاد می‌کند. مدل انرژی موج در پایین تانک موج نصب شده است. شکل ۵ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه برکلی را نمایش می‌دهد. این نمونه‌ای ساده از کاربری تجربی فرش بستر می‌باشد. همچنین شکل ۶ دیاگرام شماتیک مخزن موج را نشان می‌دهد. تمامی اجزای فرش بستر به همراه فواصل موجود از هم مشخص شده است.



شکل ۵ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه برکلی [۱۹]



شکل ۶ شماتیک دیاگرام مخزن و اجزای دستگاه

۶- روابط محاسباتی

معادلات حاکم بر این سیستم شامل معادلات کوپل و معادلات غیرخطی است. این معادلات خود شامل معادله دینامیک امواج گرانشی و معادلات بستر ویسکوالاستیک کف دریا هستند. نتیجه میرایی امواج در مد سطحی به ازای طول موج‌های بلندتر بیشتر است.

علاوه بر این محاسبات مربوط به اثر متقابل غیرخطی امواج

سطحی و فرش نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی موج عبوری توسط فرش با افزایش شیب موج سطحی افزایش می‌یابد. لذا در اینجا ابتدا فرمول‌هایی برای در نظر گرفتن این مسئله به ازای طول موج‌های بلند در آب کم عمق اضافه گردیده است. سپس اینجا فرمول‌هایی برای در نظر گرفتن این مسئله به ازای طول موج‌های بلند در آب کم عمق

$$\eta = \frac{\eta_{PTO}}{\eta_{tot}} \quad (الف-۱۳)$$

$$P_{PTO} = P_{pot} + P_{kin} = \rho \dot{V} g h_p + \frac{1}{\gamma} \rho \dot{V} v_{free}^2 \quad (الف-۱۴)$$

$\dot{V} = \frac{v_{meas}}{t_{meas}}$ به صورت PTO در واحد سیال در واحد $v_{free} = \frac{\dot{V}}{A_{out}}$ تعریف می‌گردد. می‌توان اثبات کرد که انرژی جنبشی جت آزاد در PTO

$$\eta_{total} = \frac{\sqrt{gkt \tanh(kh)}}{gW a_{in}^2 (\tanh(kh) - kh(\tanh^2(kh) - 1))} \quad (الف-۱۷)$$

در نهایت می‌توان بازده کلی سیستم را به توانایی آن در تبدیل انرژی موج سطحی عبوری به انرژی هیدرولیکی قابل استفاده دانست. علاوه بر این راندمان جذب، به قابلیت مبدل در جذب انرژی موج و میراسازی آن اشاره دارد که می‌توان نوشت.

$$\eta_{ABS} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}} = \frac{a_{in}^2 - a_{out}^2}{a_{in}^2} \quad (الف-۱۸)$$

۷- مزایای منحصربه‌فرد فرش بستر دریا

برخی از مزایای فرش بستر نسبت به سایر سیستم‌های جاذب بدین شرح است:

- فرش بستر دریا (یا به‌سادگی فرش موج) می‌تواند کل انرژی امواج حادثه (باند یا پهنای باند) را جذب کند و از این‌رو بازده نظری بالایی دارد. این مزیت بیشتر در مقایسه با سایر جاذب‌های استفاده‌شده در اقیانوس برتری دارد.
- فرش موج دارای پهنای باند گسترده‌ای از عملکرد بالا است این ویژگی باعث می‌شود که آن را بیشتر به محیط واقعی اقیانوسی که در آن موج‌ها به‌طور خاص طیف وسیعی از فرکانس‌های مختلف را تشکیل می‌دهند، مناسب باشد.
- دارای قابلیت جذب همه‌جانبه است یعنی می‌تواند انرژی امواج ورودی را که از همه جهات می‌آید جذب کند.
- فرش موج کاملاً زیر سطح آب قرار دارد و از این‌رو خطر کمتری برای قایق وزندگی درون دریا (به‌عنوان مثال هیچ‌گونه خطری پستانداران) ایجاد نمی‌کند و همچنین باعث آلودگی بصری نمی‌شود.
- فرش از لحاظ جابجایی شدید طوفان، به دلیل ستون آب بالای آن به‌عنوان یک بافر عمل می‌کند. در واقع فرش موج می‌تواند حتی در شرایط بسیار پرتلاطم (مانند طوفانی) دریایی می‌تواند بهتر عمل کند درحالی‌که اکثر دستگاه‌های انرژی موج موجود در این حالت از کار می‌افتند.
- ایده فرش موج و تغییرات آن همچنین می‌تواند برای ایجاد پناهگاه‌های امن برای ماهیگیران و ملوانان محلی در دریاها

$$a_b = a_s \cosh\left(1 - \frac{gh \tanh kh}{\omega^2}\right) \quad (الف-۳)$$

$$A = -i a_s \frac{\omega^2 + gk}{\gamma \omega}, \quad B = i a_x \frac{\omega^2 - gk}{\gamma \omega}$$

که در آن $\Omega = \omega \sqrt{\frac{h}{g}}$ فرکانس بی‌بعد، $\gamma = \frac{\rho g}{k^*}$ نیروی بازگرداننده بی‌بعد، $\mu = kh$ ضریب کم‌عمقی و h عمق بستر است.

$$\gamma \Omega^2 \tanh(\mu) + i \mu \gamma \zeta \Omega^2 - \mu \Omega^2 - i \mu^2 \gamma \zeta \Omega \tanh(\mu) + \mu^2 (1 - \gamma) \tanh(\mu) = 0 \quad (الف-۴)$$

متوسط انرژی ذخیره‌شده در یک میراکننده پیستونی در طول یک دوره زمانی به‌صورت زیر است:

$$\overline{E_p} = \int_0^T F_p \cdot V_p dt = \int_0^T b \omega^2 a_b^2 \cos^2(\omega t) dt = \frac{\gamma \pi^2 b a_b^2}{T} \quad (الف-۵)$$

انرژی ذخیره‌شده در فرش در واحد سطح برای یک سیستم ضعیف به شرح زیر توصیه می‌شود

$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{\gamma} \rho g a_s^2 D \quad (الف-۶)$$

$$E_{kin} = \frac{1}{\gamma} \rho g a_s^2 \left\{ \frac{\sin 2kh}{\gamma} \left(\frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - \gamma \sin^2 kh \right\} \quad (الف-۶)$$

$$E_{pot} = \frac{1}{\gamma} \rho g (a_s^2 - a_b^2) + \frac{1}{\gamma} K^* a_b^2 \quad (الف-۶)$$

ضریب ثابت بی‌بعد D را بدین‌صورت تعریف‌شده است.

$$D = \frac{\sin 2kh}{\gamma} \left(\frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - \gamma \sin^2 kh + \frac{a_s^2 - a_b^2}{a_s^2} + \frac{K^* a_b^2}{\gamma \omega^2 a_s^2} \quad (الف-۷)$$

$$E_{tot} = \frac{1}{\gamma} \rho g a_s^2 \left\{ \frac{\sin 2kh}{\gamma} \left(\frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - \gamma \sin^2 kh + g(a_s^2 - a_b^2) + K^* a_b^2 \right\} \quad (الف-۸)$$

$$D_a = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\sinh(\gamma D)}{\gamma} \left(\frac{\Omega r^2}{\mu} + \frac{\mu}{\Omega r^2} \right) - \gamma \sinh(\mu)^2 \right) + \frac{1 - \alpha}{\gamma} + \frac{\alpha}{\gamma D} \quad (الف-۹)$$

$$\alpha = \frac{a_s^2}{a_b^2} \cosh^2 \mu \left(1 - \frac{\mu \tanh \mu}{\Omega^2} \right) \quad (الف-۱۰)$$

انرژی در فرم بی‌بعد به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} = \frac{1}{\gamma} e^{2\Omega_i \tau} D_a \quad (الف-۱۱)$$

$$E_c = \frac{1}{\gamma} \rho g a_s^2 \varepsilon A_c \quad (الف-۱۲)$$

راندمان کلی سیستم را می‌توان به فرم زیر تعریف کرد:



energy pilot plant. Woodhead Publishing Limited.

[9] ع. سلطانی فرد و ن. کاکاندی، "تکنولوژی های استحصال انرژی از امواج اقیانوس." ۲۰۱۲.

[10] "PELAMIS WAVE POWER," *The European Marine Energy Centre*, 2003. [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>.

[11] "AQUAMARINE POWER," *The European Marine Energy Centre (EMEC) Ltd.* [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>.

[12] E. Kofoed, Jens Peter; Frigaard, Peter Bak; Knapp, Wilfried; Friis-Madsen, "Description of the Power Take-off System on board the Wave Dragon Prototype."

[13] R. SILVESTER, "Silvester, R. Coastal Engineering. Elsevier, 1974," vol. 78, no. 2, pp. 431-432, 1978.

[14] H. MACPHERSON, "Wave Damping at the Kerala Mudbanks," *Indian J. Mar. Sci.*, vol. 10, no. June, pp. 154-160, 1981.

[15] H. G. Gade, "Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water," *J. Mar. Res.*, 1958.

[16] A. Sheremet and G. W. Stone, "Observations of nearshore wave dissipation over muddy sea beds." 2003.

[17] P. M. Koola and A. Lbragimov, "The dynamics of Wave Carpet - A novel deep water wave energy design."

[18] M.-R. Alam, "A FLEXIBLE SEAFLOOR CARPET FOR HIGH-PERFORMANCE WAVE ENERGY EXTRACTION." 2012.

[19] MOHAMMAD-REZA ALAM, "Nonlinear analysis of an actuated seafloor-mounted carpet for a high-performance wave energy extraction." 2015.

[20] M. Lehmann, R. Elandt, H. Pham, R. Ghorbani†, M. Shakeri, and M.-R. Alam, "An artificial seabed carpet for multidirectional and broadband wave energy extraction: Theory and Experiment."

[21] M. Lehmann, R. Elandt, M. Shakeri, and R. Alam, "TheWave Carpet: Development of a Submerged Pressure DifferentialWave Energy Converter."

[۲۲] م. ج. جهانگیر و ف. حاجی زاده، "مطالعه و ارزیابی تولید انرژی با استفاده از تکنولوژی فرش بستر دریا."

[۲۳] ح. م. عارف، م. ج. کتابداری، و ی. قیطانی فرد، "مدلسازی تحلیلی فرش مصنوعی دریایی انعطاف پذیر جاذب امواج انرژی دریا در شرایط خلیج فارس."

[24] E. Renzi and F. Dias, "Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 41, pp. 1-10, 2013.

آزاد استفاده شود و یا در مقیاس های بزرگ برای محافظت از ساحل و بندر در برابر امواج طوفان قوی استفاده شود.

- ارتفاع موج ثبت شده در خلیج فارس در بازه ۴ تا ۵ متر برآورد می شود و از طرف دیگر به دلیل حضور گسترده شناورهای منطقه ای امکان استفاده امواج بر روی سطح آب امکان پذیر نیست. از این روجاذب فرش بستر دریا با بازدهی بالا در امواج کوتاه و به صورت مغروق عمل می کند میتواند گزینه مناسبی برای تولید توان باشد.

۸- بحث و نتیجه گیری

فرش بستر دریا جاذبی باقابلیت تولید توان بالا، دوست دار محیط زیست است که برخلاف سایر سیستم های تولید توان امواج، در آب های کم عمق عملکرد بهتری دارد. از طرفی دیگر بستری امن برای ساکنان محلی و اکوسیستم است. هدف اصلی مطالعه حاضر، مدل سازی تحلیلی و ارزیابی کیفی فرش بستر امواج در طیف وسیعی از پارامترهای سیستم بود. یکراه حل تحلیلی برای حرکت مبدل انرژی موج اختلاف فشار و توانایی سیستم برای استخراج انرژی موج ارائه شد. فرایند انتقال و بهینه سازی مفهوم اولیه مکانیک به اولین نمونه اولیه و کارآمد بهینه شده نیز مطرح شد. اجزای اصلی سیستم شامل فرش جاذب انرژی، اتصالات، سیستم بالابرنده و سیستم مهارکننده ها می باشد. انرژی ذخیره شده در امواج صاف توسط فرش جذب می شود و به انرژی هیدرولیکی تبدیل می شود با استفاده از پمپ های دوطرفه خطی که به طور مستقیم به فرش جذب متصل می شوند. با توجه به بازده عملکردی جاذب و شرایط جغرافیایی خلیج فارس، مطالعه بیشتر در خصوص پتانسیل استحصال انرژی توصیه می شود.

۹- مراجع

- [1] World Energy Council, "World Energy Resources: Marine Energy 2016," p. 79, 2016.
- [2] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, and Y. Sokona, "Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation." 2012.
- [3] BDrew, A. R. Plummer, and M N Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology." 2009.
- [4] L. Creel, "RIPPLE EFFECTS: POPULATION AND COASTAL REGIONS." 2003.
- [5] António F. O. Falcão, "Modelling of Wave Energy Conversion." 2014.
- [6] M. Takao and T. Setoguchi, "Air Turbines for Wave Energy Conversion." 2012.
- [7] M. J. L. Greenhow, "Efficiency calculations for a Salter's duck on a compliant axis," vol. 3, no. 3, pp. 145-147, 1981.
- [8] M. Prado and H. Polinder, *Case study of the Archimedes Wave Swing (AWS) direct drive wave*

