

## بررسی سیستم‌های مبدل انرژی امواج دریا در بندرانزلی

کامران لاری\*، گیلدا عباسیان و افشین محسنی آراسته

۱- گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۲۶

### چکیده

در این تحقیق نتایج مدلسازی عددی با استفاده از مدول SW Mike 21 برای تخمین چگالی انرژی موج در منطقه ی دور از ساحل بندرانزلی در سال ۲۰۰۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد، میزان چگالی انرژی قابل استحصال از موج  $(\frac{kW}{m^2})$  ۰/۵۸۸، توان موج  $(\frac{kW}{m})$  ۲/۱۸۷، چگالی توان موج  $(\frac{W}{m^2})$  ۱۲۵/۵۳ و چگالی توان باد  $(\frac{W}{m^2})$  ۱۰/۳۹۶ محاسبه گردید. در این تحقیق بعد از بررسی مبدل‌ها و روش‌های مختلف برآورد انرژی قابل استحصال از موج، ضمن محاسبه توان و چگالی انرژی قابل استحصال از موج ماهانه، چگالی انرژی حاصل از باد نیز در این منطقه محاسبه و سپس مقایسه‌ای میان این دو صورت گرفت. بعد از رسم گل موج یکساله بهترین مبدل جهت استحصال انرژی موج با توجه به شرایط بندر انزلی، مجموعه‌ای از شش مبدل پلامیس که توانی حدود ۴/۵ مگاوات دارد پیشنهاد گردید.

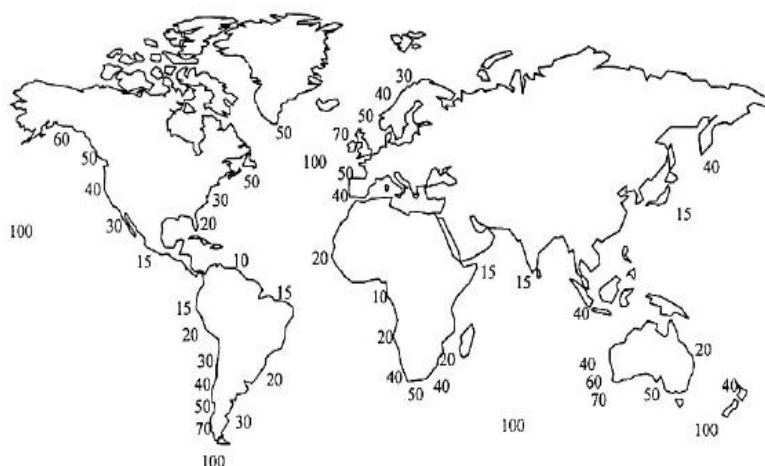
### واژگان کلیدی

چگالی انرژی موج، توان موج، توان باد، بندرانزلی

### مقدمه

تغییر اقلیم از جمله مسائل و مشکلات جهان امروز است. یکی از راه‌حل‌های مطرح شده برای مسأله بحران انرژی در سطح جهان و مشکلات ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی و اتمی، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد که علاوه بر فناناپذیر بودن، با محیط زیست هم سازگاری دارند، یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی نهفته در امواج ناشی از باد است و به همین دلیل بطور غیر مستقیم از انرژی‌های خورشیدی محسوب می‌گردند. یکی از مزایای عمده ی انرژی امواج نسبت به انرژی خورشیدی و باد، مقدار چگالی بالای انرژی بر واحد سطح است. بطور مثال در عرض جغرافیایی ۱۵ درجه شمالی، میانگین چگالی انرژی خورشید  $\frac{kW}{m^2}$  ۰/۱۷، میانگین چگالی انرژی باد در اقیانوس آرام در همین عرض حدود  $\frac{kW}{m^2}$  ۰/۵۸ (باد با سرعت  $\frac{m}{s}$  ۱۰) و چگالی متوسط انرژی امواج  $\frac{kW}{m^2}$  ۸/۴۲ است (رینگ وود، ۲۰۰۸). انرژی امواج حاصله در مناطق ساحلی چیزی حدود ۲ تا ۳ میلیون مگاوات بر آورد شده است و از آنجا که کشور ایران ۱۲۵۹ کیلومتر مرز دریایی با خلیج فارس و ۷۸۴ کیلومتر مرز دریایی با دریای عمان و ۶۵۷ کیلومتر مرز با دریای خزر دارد، بحث استحصال انرژی از امواج از اهمیت ویژه ای برخوردار است (ذبیحیان، ۱۳۸۳).

شکل ۱ توزیع تقریبی سطوح توان موج در سطح جهان بر حسب  $\left(\frac{kW}{m}\right)$  را نشان می‌دهد (Vining, 2007)، که بیشترین مقادیر، مربوط به سواحل غربی اسکاتلند، شمال کانادا، جنوب آفریقا و سواحل شمال شرقی و شمال غربی ایالات متحده آمریکا است.



شکل ۱- توزیع تقریبی سطوح توان موج در سطح جهان بر حسب (کیلو وات بر متر) (Vining, 2007)

لازمه‌ی جذب انرژی امواج، وجود دستگاهی است که بتواند با برخورد صحیح امواج با آن، حداکثر انرژی موجود در آن‌ها را جذب نماید. مبدل انرژی موج شامل بخش‌های متعددی چون ژنراتور و یک سیستم واسطه مانند توربین، پمپ یا موتور برای میرا کردن انرژی موج و تبدیل آن به انرژی مکانیکی جهت به حرکت در آوردن ژنراتور می‌باشد که هریک از این بخش‌ها عهده دار تبدیل یک نوع انرژی به انرژی دیگری است (اینانلو و اژئیان، ۱۳۸۸).

اولین نظریه در راستای استفاده از انرژی امواج در سال ۱۷۹۹ توسط Girard و پسرش در پاریس مطرح گردید (فالنس، ۲۰۱۰) و اولین گام برای استفاده اقتصادی از انرژی امواج در سال ۱۹۴۷ توسط مهندسی ژاپنی بنام Yoshio Masuda برداشته شد (Archie, 1991).

#### طبقه‌بندی مبدل‌ها

##### • بر اساس موقعیت نسبت به ساحل

۱- خط ساحلی: این سیستم‌ها در کنار خط ساحل قرار داده می‌شوند و انرژی امواجی که می‌شکنند را استخراج می‌کنند.

۲- نزدیک ساحل: سیستم‌های نزدیک ساحل در عمق آب حدود ۲۰ متر قرار داده می‌شوند.

۳- دور از ساحل: سیستم‌های دور از ساحل در آب‌های عمیق، معمولاً در عمق بیش از ۴۰ متر (۱۳۱ فوت) قرار داده می‌شوند (Rhinefrank, 2006).

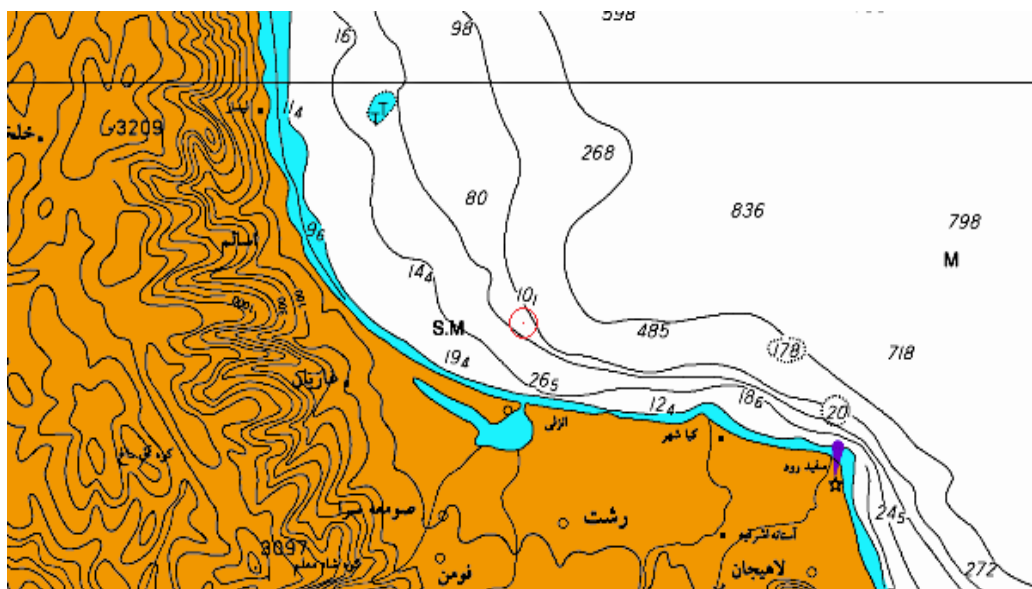
• بر اساس نحوه قرارگیری در برابر جهت حرکت امواج

- ۱- مبدل‌های مستقیم انرژی موج: Active Devices دستگاه‌هایی هستند که در اثر برخورد موج به آن‌ها حرکت کرده و باعث ایجاد کار مکانیکی مفید در برابر یک بدنه ثابت خواهند شد.
- ۲- مبدل‌های غیر مستقیم انرژی موج: Passive Devices: در این مبدل‌ها که بدنه به طور کامل ثابت می‌باشد از حرکت نسبی سطح آب برای انجام کار استفاده می‌کنند، این مبدل‌ها می‌توانند بصورت شناور و یا ثابت در بستر دریا باشند. در این سیستم‌ها از نوسانات آب برای ایجاد نوسان در هوا استفاده می‌شود و با جریان متغیر هوا، توربین به حرکت در آمده و تولید الکتریسته می‌نماید (اینانلو و اژئیان، ۱۳۸۸).
- ۳- مبدل‌های جاذب نقطه‌ای Point absorber: جاذب نقطه‌ای حالت خاصی از قرار گرفتن مبدل است که نه پایان دهنده و نه کاهنده می‌باشد. ابعاد مبدل بسیار کوچکتر از طول موج است که این مساله سبب می‌شود تا مبدل نتواند انرژی امواج بزرگ را جذب نماید. از مبدل‌های جاذب نقطه‌ای می‌توان به ستاره ی موج (Wave star)، شاقول موج (Wave Bob) و دو مبدل ساخته شده در مقیاس واقعی و دور از ساحل، آونگ موج ارشمیدس (AWS) (Wave Swing) (Archimedes) و شناور قدرت (Power Buoy) اشاره کرد. ستاره ی موج از ۴۰ نیمکره فایبرگلاس ساخته شده است که هر کدام به یک سیلندر متصل است. وقتی شناور در اثر دامنه موج بالا می‌آید، سیلندر، روغن را فشرده کرده و این فشار هیدرولیکی به ژنراتور منتقل می‌شود. هر شناور قطری معادل یک متر دارد که قادر به تولید ۵/۵ کیلو وات برق است. شاقول موج که اساساً زیر سطح اقیانوس شناور است شبیه یک بویه متحرک دور از ساحل، حرکت بالا و پایین دارد.
- ۴- مبدل‌های پایان دهنده Terminator: در این نوع، تعداد زیادی از مبدل‌ها که بصورت ردیفی پشت سر یکدیگر نصب شده باید در جهتی عمود بر جهت اصلی حرکت موج قرار گیرند تا با برخورد امواج به دستگاه، امواج انرژی خود را کاملاً از دست داده و حداکثر انرژی ممکن از موج جذب می‌شود.
- ۵- مبدل‌های کاهنده Attenuator: هنگامیکه مبدلی در حالت فوق الذکر در دریای ناآرام قرار بگیرد، بخش قابل ملاحظه‌ای از نیروها به ساختمان آن وارد می‌شود که ممکن است موجب تخریب آن شود. جهت کاهش این نیروها، می‌توان دستگاه را در جهتی موازی با حرکت اصلی موج قرار داد تا قسمت کوچکی از موج با مبدل برخورد کند. یک نمونه از این مبدل، پلامیس (Pelamis) با طول ۱۳۰ متر است که می‌تواند توانی معادل ۷۵۰ کیلو وات تولید کند. بهترین مکان قرارگیری مبدل ۵ تا ۱۰ کیلومتر دور از ساحل است (Carter, 2005).
- ۶- مبدل‌های بالا رونده (Overtopping System (OTS): در این مبدل‌ها از انرژی موج برای انتقال آب دریا به درون کانالی شیب دار و ذخیره آب در یک مخزن استفاده می‌شود. با استفاده از اختلاف ارتفاع ایجاد شده، توربین‌های آبی با ارتفاع کم به حرکت در آمده و انرژی تولید می‌شود. اژدهای موج<sup>۳</sup>، نمونه‌ای از این مبدل است که دور از ساحل، در مقیاس  $\frac{1}{4.5}$  آزمایش شده است (Cruz & Elkinton, 2009).
- ۷- مبدل‌های ستون نوسانی آب (Wave Dragon): در این روش که یک ساختار زیر آبی است، هوای بالای سطح آب بدام می‌افتد و امواج ورودی باعث نوسان ستون آب می‌شود که باعث می‌شود توربین به حرکت درآید (Wacher & Neilsen, 2010). این روش، کارآمدترین روش به حساب می‌آید چرا که با بازدهی حدود ۸۰٪ (بدیعی، ۱۳۷۱)، دارای مکانیزمی نسبتاً ساده بوده و در حالت ساحلی در مقابل طوفان مقاوم است. لیمپت (Limpet) و پیکو (Pico) دو مبدل خط ساحلی و لینکس اقیانوس مبدل نزدیک ساحل، نمونه‌هایی از این نوع هستند (Cruz & Elkinton, 2009).

هدف از این تحقیق، محاسبه میزان چگالی انرژی و توان قابل استحصال از امواج و محاسبه چگالی توان موج و باد در منطقه بندرانزلی و پیشنهاد کارآمدترین مبدل انرژی موج با توجه به پارامترهای موج (ارتفاع موج شاخص و پرپود موج)، میزان توان و شرایط آب در این منطقه است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق داده‌های حاصل از مدلسازی عددی با استفاده از مدول SW نرم افزار Mike 21 که توسط سازمان بنادر و دریانوردی انجام شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. این داده‌ها مربوط به سال ۲۰۰۲ بوده و در ۲۹۲۳ ردیف ثبت شده اند که در هر ردیف اطلاعاتی شامل تاریخ روز، ساعت، ارتفاع موج شاخص  $H_s$ ، دوره تناوب موج  $T_p$ ، دمای هوا  $T_c$  و فشار هوا در فایل‌های Excel ذخیره شده است. لازم به توضیح است که در این تحقیق داده‌های مدلسازی عددی مربوط به منطقه بندرانزلی در نقطه‌ای به مختصات  $49^{\circ}, 30' N$  و  $37^{\circ}, 30' E$  مورد استخراج و تحلیل قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه عمق این نقطه ۱۸ متر می‌باشد و نیز با توجه به رابطه  $l_0 = 1.56T^2$  مقدار  $l_0$ ،  $35/40.5$  و نسبت  $d$  به  $l_0$   $0/508$  بدست آمد، بنابراین نسبت  $d$  به  $l$  با توجه به جدول مقادیر نسبت  $d/l$  به ازای مقادیر نسبت  $d/l_0$  (سی‌ای آر سی، ۱۹۸۴)،  $0/509$  خواهد بود که این مقدار از  $0/5$  بزرگتر بوده و طبق رابطه  $d/l > 0.5$  شرایط آب عمیق بر منطقه حاکم است. در شکل ۲ منطقه مورد مطالعه و موقعیت مکانی نقطه مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه بندرانزلی

### مبانی نظری

انرژی امواج مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی می‌باشد که انرژی پتانسیل ناشی از اختلاف ارتفاع بین فراز و فرود موج و انرژی جنبشی ناشی از حرکت ذرات آب در اثر عبور موج است. انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی یک موج ساده در واحد طول تاج و واحد طول موج از روابط زیر بدست آمده است (Tautra Hoen, 2009):

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (1)$$

$$E_K = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (2)$$

$E_K, E_p$  به ترتیب انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی بر حسب  $H_s, \frac{W_s}{m}$  (ارتفاع موج شاخص): میانگین ارتفاع‌های یک سوم مرتفع‌ترین امواج بر حسب  $m, \rho$ : چگالی آب بر حسب  $\frac{kg}{m^3}$  و  $g$ : ثابت گرانشی و برابر  $\frac{9.81 m}{s^2}$  می‌باشد.

همانطور که از روابط ۱ و ۲ دیده می‌شود، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل در یک موج با هم برابرند، بنابراین انرژی کل یک موج که حاصل جمع این دو انرژی است از رابطه زیر بدست می‌آید (Tautra Hoen, 2009):

$$\Rightarrow E = E_K + E_p = \frac{1}{2} \rho g A^2 = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 \left[ \frac{W_s}{m^2} \right], A = \frac{1}{2} H_s \quad (3)$$

$A$ : دامنه موج بر حسب  $m, E$ : انرژی موج بر حسب  $\frac{W_s}{m^2}$  که به آن چگالی انرژی موج نیز گفته می‌شود (Vining, 2007).  
توان موج عبارت است از میزان انرژی منتقل شده توسط موج که در واقع بیانگر میزان انرژی در دسترس آن می‌باشد. این کمیت معمولاً بر حسب  $kW$  در هر متر از طول تاج موج بیان و با رابطه زیر محاسبه می‌شود (Falnes, 2010):

$$P = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 C_g \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (4)$$

که در آن  $C_g$ : سرعت گروهی موج بر حسب  $\frac{m}{s}$  است.

در شرایط آب عمیق است ( $\frac{d}{l} > 0.5$ )، که در آن  $d$  و  $l$  به ترتیب عمق آب و طول موج بر حسب متر هستند).

ارتباط بین سرعت گروهی و سرعت موج (c) با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_g = \frac{1}{2} c_0, c_0 = \frac{gT}{2\pi}, C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (5)$$

که در آن  $T$  دوره تناوب موج بر حسب ثانیه می‌باشد.

با استفاده از روابط (۴) و (۵) توان موج را می‌توان به صورت زیر نوشت (Boyle, 1996):

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H_s^2 T \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (6)$$

چگالی توان موج یعنی انرژی موج به ازاءپریود موج برابر است با (Vining, 2007):

$$P_{density} = \frac{E_{density}}{T} = \frac{\rho_{water} g H_s^2}{8T} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

چگالی توان باد به صورت توان بر واحد سطح عمود بر جریان باد تعریف می‌شود و برابر است با (Andersson, 2008):

$$P_{density} = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \frac{\rho A v^3}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

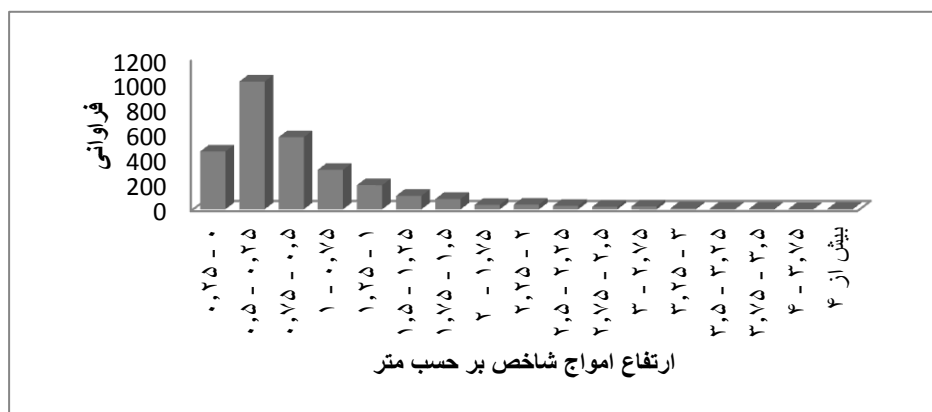
$\rho$ : چگالی هوا برابر با  $\frac{1}{225} \frac{kg}{m^3}$  در فشار سطح دریا و دمای ۱۵ درجه سانتیگراد و  $v$ : سرعت باد بر حسب  $\frac{m}{s}$  خواهد بود.

با توجه به حاکم بودن شرایط آب عمیق بر منطقه مورد مطالعه، با استفاده از رابطه ۶ میانگین توان موج برای سال ۲۰۰۲ و برای فصول مختلف آن سال محاسبه گردید و از آنجا که توان موج رابطه‌ای مستقیم با پریود موج و توان دوم ارتفاع موج شاخص دارد، مقادیر این دو پارامتر موج یعنی پریود موج و ارتفاع موج شاخص نیز بطور میانگین برای فصول مختلف سال تعیین گردید (جدول ۱). همچنین در این تحقیق برای محاسبه مقدار چگالی توان باد و مقایسه آن با چگالی توان موج با استفاده از روابط ۷ و ۸، به منظور نشان دادن مزیت اصلی استفاده از انرژی موج نسبت به انرژی باد، از آمار یکساله باد ایستگاه هواشناسی بندرانزلی مربوط به سازمان هواشناسی کشور استفاده گردید که این داده‌های باد شامل تاریخ روز (بر حسب سال میلادی)، ساعت به وقت گرینویچ و سمت و سرعت باد می‌باشد، که با فاصله زمانی ۳ ساعت ثبت گردیده است، این اطلاعات در ۲۸۶۳ ردیف مفید مربوط به سال ۲۰۰۲ گرد آوری شده است.

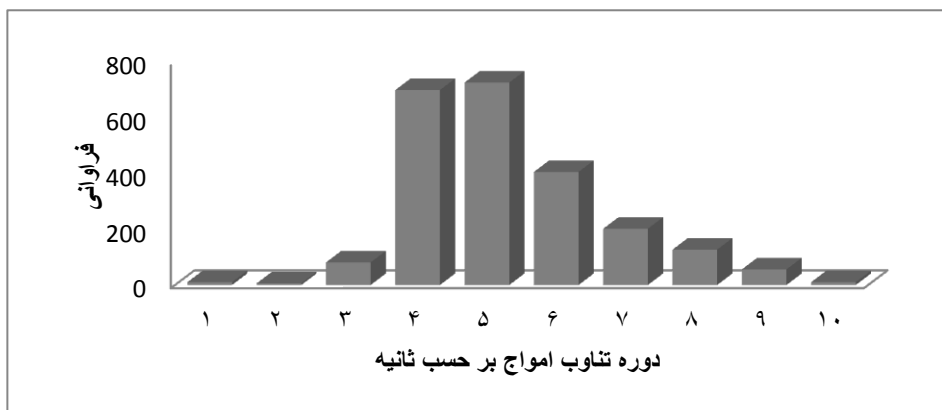
علاوه بر محاسبه چگالی انرژی متوسط موج قابل استحصال برای فصول مختلف سال با استفاده از رابطه ۳ (جدول ۱)، رسم گلموج یکساله نیز، برای تعیین جهت غالب موج در بندرانزلی با استفاده از نرم افزار Windrose (نرم افزار تخصصی رسم گل باد) صورت گرفت، تا بهترین موقعیت برای قرارگیری مبدهای پیشنهادی و بهره‌گیری از بازدهی بالای آنها در منطقه مورد مطالعه، تعیین شده باشد.

## نتایج

بررسی داده‌های امواج در بندر انزلی نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی ارتفاع امواج شاخص در محدوده ۰/۷۵-۰/۲۵ متر و بیشترین فراوانی دوره تناوب امواج ۴ تا ۵ ثانیه می‌باشد (شکل ۳ (الف) و (ب)).



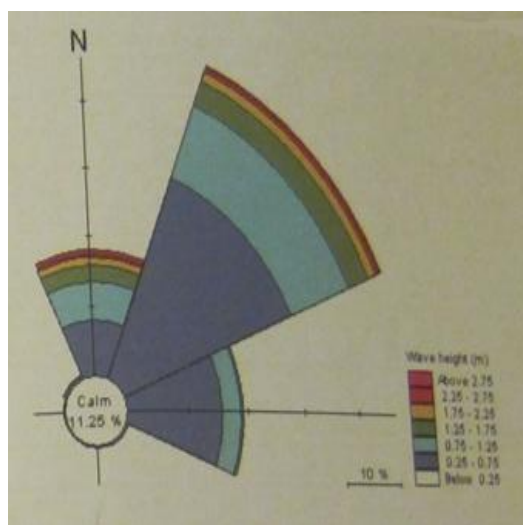
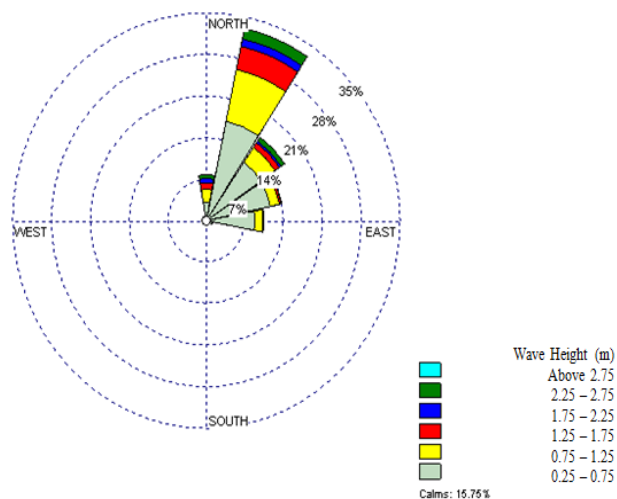
الف



ب

شکل ۳- (الف) فراوانی ارتفاع امواج شاخص و (ب) دوره تناوب امواج در بندرانزلی (۲۰۰۲).

برای تعیین جهت غالب موج در بندرانزلی با استفاده از نرم افزار Windrose (نرم افزار تخصصی رسم گل باد) به منظور انتخاب بهترین موقعیت برای قرارگیری مبدل‌های پیشنهادی و بهره‌گیری از بازدهی بالای آنها در منطقه مورد مطالعه، رسم گل موج یکساله (۲۰۰۲) برای بندرانزلی صورت گرفت. همانطور که از مقایسه گل موج رسم شده یکساله بندرانزلی با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی (شکل ۴ الف) با گل موج حاصل از مدل‌سازی دوازده ساله در محل انزلی توسط سازمان بنادر و دریانوردی (شکل ۴ ب))، دیده می‌شود، در هر دو حالت جهت غالب اصلی موج، شمال شرقی است. همچنین میانگین ارتفاع موج شاخص و پریود موج حاصل از مدل‌سازی دوازده ساله موج در منطقه بندرانزلی به ترتیب ۰/۷۱ متر و ۴/۸۶ ثانیه توسط سازمان بنادر و دریانوردی ثبت گردیده است (مدلسازی امواج دریا‌های ایران، ۱۳۸۷).

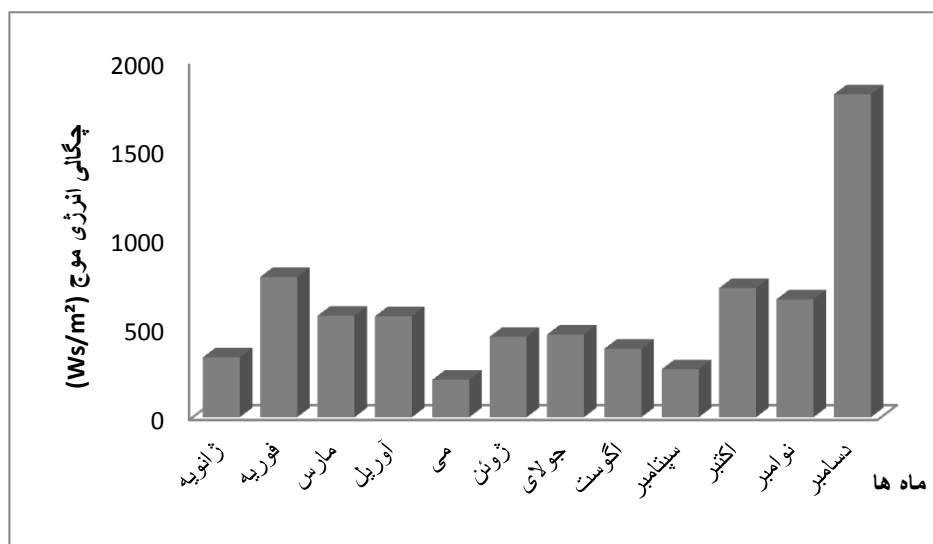


شکل ۴- الف) گل موج یکساله بندرانزلی (۲۰۰۲) شکل ۴- ب) گل موج حاصل از مدل‌سازی دوازده

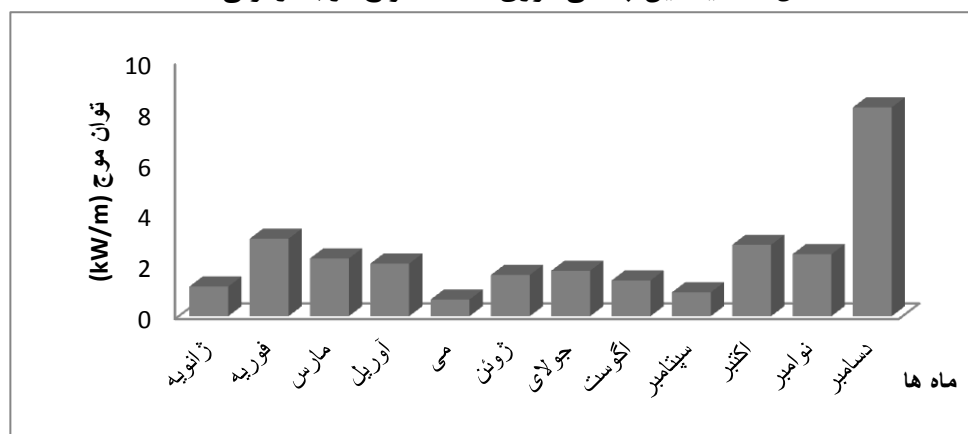
با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی ساله در محل انزلی (مدلسازی امواج دریا‌های ایران، ۳۸۷)

بعد از محاسبه میانگین ارتفاع موج شاخص و پریود موج بطور ماهانه، میانگین چگالی انرژی و توان موج برای ماه‌های سال ۲۰۰۲ در منطقه بندرانزلی محاسبه شد، که با توجه به شکل‌های (۵ و ۶) بیشترین مقادیر چگالی انرژی و توان موج در ماه دسامبر و کمترین مقادیر آنها در ماه می، می‌باشد.





شکل ۵- میانگین چگالی انرژی ماهانه امواج در بندرانزلی ۲۰۰۲

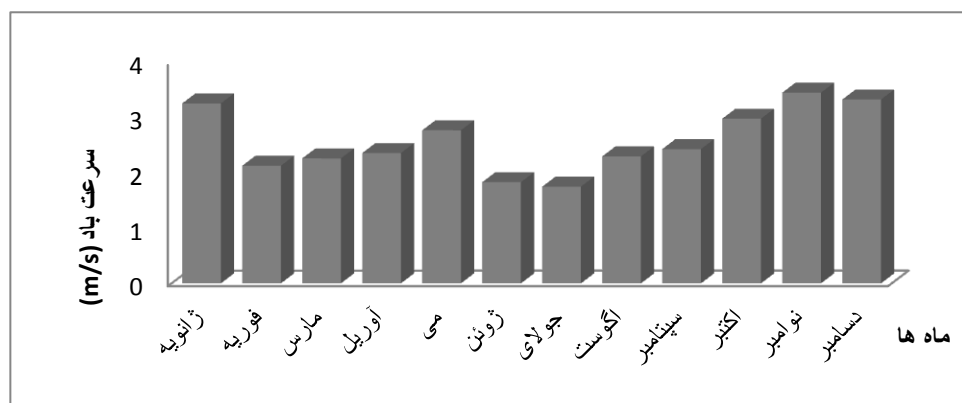


شکل ۶- میانگین توان ماهانه امواج در بندرانزلی ۲۰۰۲

جدول (۱) نشان دهنده میانگین چگالی انرژی و توان موج در فصول مختلف سال ۲۰۰۲ در بندرانزلی و شکل (۷) میانگین ماهانه سرعت باد است که نشان می‌دهد بندرانزلی بیشترین مقدار سرعت باد را در فصل پاییز دارد.

جدول ۱- میانگین چگالی انرژی و توان امواج در فصول مختلف سال ۲۰۰۲ در بندرانزلی

میانگین توان موج قابل استحصال ( $\frac{kW}{m}$ )	میانگین چگالی انرژی موج قابل استحصال ( $\frac{Ws}{m^2}$ )	میانگین پریود موج (s)	میانگین ارتفاع موج شاخص (m)	حداکثر ارتفاع موج شاخص (m)	
۱/۵۴۶	۴۴۵	۴/۴۵	۰/۶	۳/۱۴	بهار
۱/۴۸۰	۴۰۲	۴/۷۲	۰/۵۷	۳/۵۳	تابستان
۳/۴۷۹	۸۹۳	۴/۹۹	۰/۸۵	۵/۹۸	پاییز
۲/۲۵۱	۵۹۶	۴/۸۳	۰/۶۹	۲/۷۸	زمستان



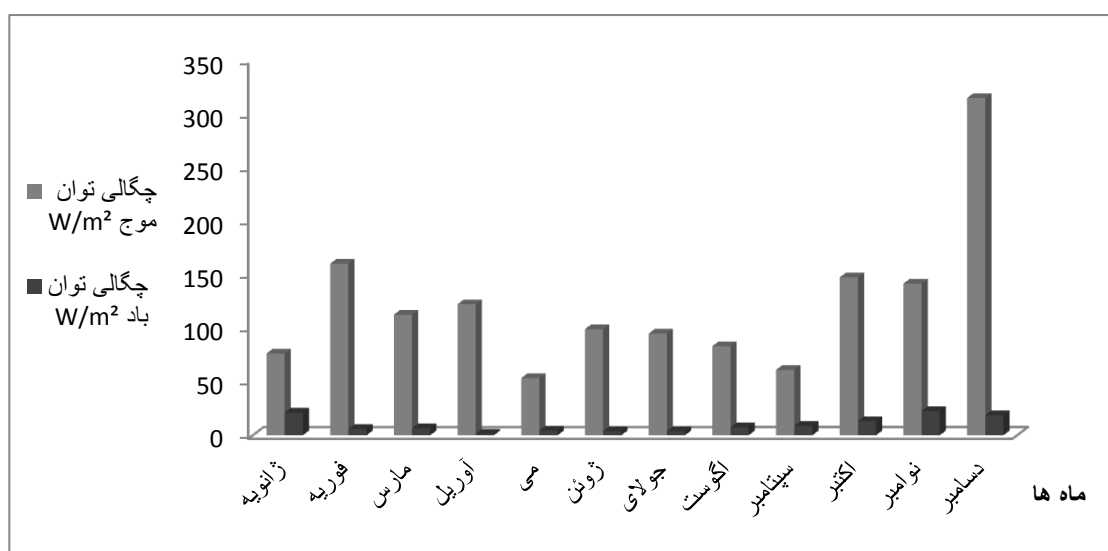
شکل ۷- میانگین سرعت باد در ماه‌های سال ۲۰۰۲ در بندرانزلی

میزان توان متوسط موج شاخص بندرانزلی برابر  $2/187$  کیلو وات بر متر و چگالی انرژی متوسط آن برابر  $0/588$  کیلو وات ثانیه بر متر مربع بدست آمد. انرژی کل سالیانه (میزان انرژی کل قابل استحصال در واحد سطح) بر اساس طول ساحل، همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود،  $2/385$  ترا وات ساعت محاسبه گردید.

جدول ۲- انرژی کل سالیانه در بندرانزلی (۲۰۰۲)

طول ساحل انزلی (کیلومتر)	توان متوسط (کیلو وات بر متر)	توان کل (مگا وات)	انرژی کل سالیانه (ترا وات ساعت)
۱۲۴/۵	۲/۱۸۷	۱۲۴/۲۸۱۵	۲/۳۸۵

چگالی توان موج و چگالی توان باد یکساله در بندرانزلی به ترتیب  $125/53$  و  $10/4$  وات بر متر مربع بدست آمد. بالا بودن مقدار چگالی توان موج نسبت به چگالی توان باد برای منطقه بندر انزلی، یکی از مزایای اصلی استفاده از این انرژی تجدیدپذیر نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر چون انرژی باد است. شکل (۸) مقایسه چگالی توان موج و باد را در منطقه بندر انزلی نشان می‌دهد.



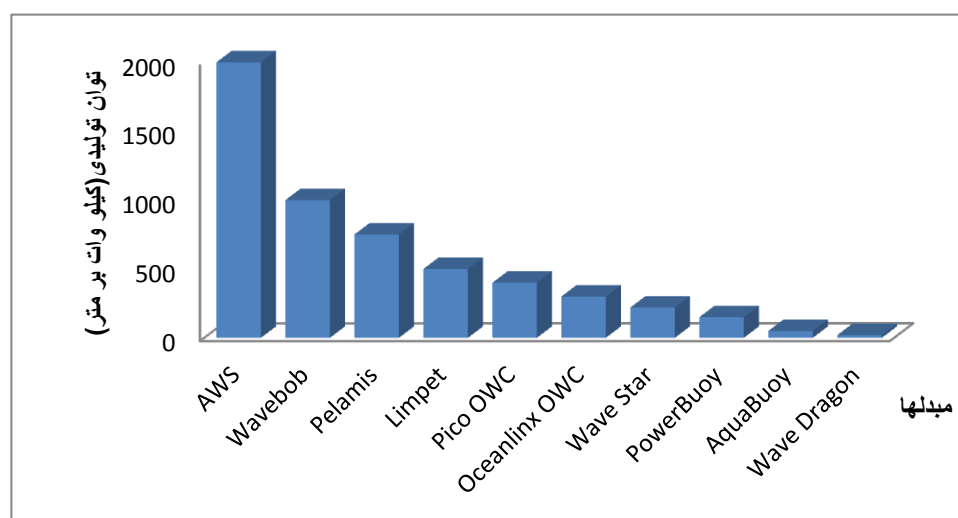
شکل ۸- مقایسه چگالی توان موج و باد مربوط به بندرانزلی ۲۰۰۲-۲۰۰۳

---

از میان مبدل‌های طراحی شده برای انرژی امواج، ده مبدل که در شرایط متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته اند و تعدادی از آنها در حال حاضر برای برق رسانی مورد بهره‌برداری قرار گرفته اند، با ویژگی‌های محل نصب و دیگر جزئیات در جدول ۳ نشان داده شده است (Cruz & Elkinton, 2009).

جدول ۳- مبدل‌های ساخته شده در مقیاس واقعی (Cruz & Elkinton, 2009) و مبدل‌های آزمایش شده  
(; Vining, 2007 Carter, 2005).

مبدل	نوع مبدل	کشور حمایت کننده	محل نصب	شرایط آب (عمق m)	توان تولیدی مبدل (کیلو وات)	شرکت سازنده
AWS	جاذب نقطه‌ای	پرتغال/انگلیس	Pilot Zone Ross-Shire	دور از ساحل (۳۰-۹۰)	۲۰۰۰	AWS Ocean Energy Ltd
Limpet	ستون نوسانی آب	انگلیس/اسکاتلند	Islay Island	خط ساحلی	۵۰۰	Wavegen
Oceanlinx OWC	ستون نوسانی آب	پرتغال	Port kembla	نزدیک ساحل	۳۰۰	Oceanlinx, Ltd
Pelamis	کاهنده	انگلیس اسکاتلند	Montara Edinburgh	دور از ساحل	۷۵۰	Ocean Power delivery, Ltd.
Pico owc	ستون نوسانی آب	پرتغال	Azores	خط ساحلی	۴۰۰	Wave Energy Centre
PowerBuoy	جاذب نقطه‌ای	امریکا/اسپانیا/استرالیا	Hawaii & Newjarsy	دور از ساحل	۱۵۰	Ocean power technologies Inc
WaveBob	جاذب نقطه‌ای	ایرلند	Galway Bay Dublin	نزدیک ساحل (۲۰-۲۵)	۱۰۰۰	Wavebob, Ltd
Wave Dragon, scale $\frac{1}{4.5}$	بالا رونده	دانمارک/UK	Kobenhavn	دور از ساحل	۲۰	Wave Dragon APS
Wave star	جاذب نقطه‌ای	دانمارک	Nissum Bredning	نزدیک ساحل (۵-۸)	۲۲۰	Wave Star Energy
AquaBuoy	جاذب نقطه‌ای	امریکا/اسپانیا	Hawaii	دور از ساحل	۵۰	Aqua Energy Group, Ltd



شکل ۹- ظرفیت مبدل‌های ساخته شده (Cruz & Elkinton, 2009; Vining, 2007).

ظرفیت تولید انرژی هر مبدل به شرایط خاص محل نصب از جمله ارتفاع و پریود موج، عمق آب، نوع بستر و... بستگی دارد. در شکل ۹ ظرفیت تولیدی هر مبدل نشان داده شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق میانگین ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) بر حسب متر و میانگین دوره تناوب موج ( $T_p$ ) بر حسب ثانیه، به ترتیب ۰/۶۹ متر و ۴/۷۶ ثانیه تعیین گردید، همچنین بررسی داده‌های امواج در بندر انزلی نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی ارتفاع امواج شاخص در محدوده ۰/۷۵ - ۰/۲۵ متر و بیشترین فراوانی دوره تناوب امواج ۴ تا ۵ ثانیه می‌باشد.

میانگین سالانه ارتفاع موج شاخص در سال ۲۰۰۲ در منطقه بندر انزلی ۰/۶۹ متر و میانگین پریود موج ۴/۷۶ ثانیه محاسبه گردید همچنین نمودار گلموج منطقه، جهت غالب امواج را شمال شرقی نشان می‌دهد که تقریباً با میانگین ارتفاع موج شاخص، پریود امواج و جهت امواج بر اساس اطلاعات دوازده ساله امواج در منطقه بندر انزلی که در مدلسازی امواج دریاهای ایران توسط سازمان بنادر و دریانوردی منتشر شده همخوانی دارد.

بیشترین چگالی انرژی قابل استحصال در واحد سطح در فصل پاییز  $\frac{kws}{m^2}$  ۰/۸۹۷ و کمترین آن در فصل تابستان  $\frac{kws}{m^2}$  ۰/۴۰۹ بدست آمد. مقدار چگالی انرژی کل حاصل میانگین ارتفاع موج شاخص به ازاء  $H_s = 0.69$  m (یکساله)  $\frac{kws}{m^2}$  ۰/۵۸۸ و به ازاء میانگین ارتفاع موج شاخص دوازده ساله امواج  $H_s = 0.71$  m،  $\frac{kws}{m^2}$  ۰/۶۲۳ بدست آمد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای به نظر نمی‌آید. همچنین انرژی سالیانه معادل ۲/۳۸۵ تراوات ساعت (TWh) محاسبه گردید.

بیشترین توان قابل استحصال در واحد طول در فصل پاییز  $\frac{kw}{m}$  ۳/۴۷۹ و کمترین آن در فصل تابستان  $\frac{kw}{m}$  ۱/۵۰۹ محاسبه گردید. مهمترین عامل ایجاد امواج در منطقه بندر انزلی، سرعت وزش باد بر روی سطح دریا و طول موجگاه است که با توجه به آنکه بیشترین سرعت وزش باد مربوط به فصل پاییز است، بنابراین بیشترین توان قابل استحصال در واحد طول نیز مربوط به فصل پاییز می‌باشد. مقدار توان قابل استحصال در واحد طول بر اساس اطلاعات دوازده ساله  $\frac{kw}{m}$  ۲/۳۶۴ بدست آمد.

میانگین سرعت باد در بندر انزلی در سال ۲۰۰۲،  $\frac{m}{s}$  ۲/۵۷ (۴/۹۹ knots) و چگالی توان موج و چگالی توان باد یکساله در بندر انزلی به ترتیب ۱۲۵/۵۳ و ۱۰/۴ وات بر متر مربع بدست آمد. مقایسه میزان چگالی توان موج و چگالی توان باد در بندر انزلی نشان می‌دهد که یکی از مزایای عمده استفاده از انرژی امواج نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، مقدار چگالی بالای توان آن بر واحد سطح است.

برای انتخاب دستگاه‌های تولید انرژی از امواج در منطقه انزلی بایستی به این نکته توجه داشت که هر مبدل برای شرایط ویژه‌ای طراحی شده و مورد بهره‌برداری است بنابراین با مقایسه منطقه انزلی با دیگر مناطق می‌توان در این منطقه از مبدل‌هایی چون AWS, pelamis, wave dragon, PowerBuoy استفاده نمود. اما بهترین حالت، استفاده از تعدادی مبدل پلامیس در منطقه مورد مطالعه از بین این چهار مبدل می‌باشد، به این ترتیب که اگر مجموعه‌ای از شش پلامیس تشکیل گردد، آنگاه توان تولیدی کل چیزی حدود ۴/۵ مگاوات خواهد بود.

پیشنهاد می‌شود محاسبات انجام شده در این تحقیق برای فواصل زمانی طولانی‌تر انجام شود تا اگر احتمال خطایی در محاسبات انجام شده یکساله وجود داشته باشد، این احتمال خطا به حداقل برسد. همچنین

طرح‌های آزمایشگاهی موفق در ابعاد واقعی بررسی شده و مورد کاربرد قرار داده شود و از تجربه و نتایج فعالیت‌های افراد و موسسه‌هایی که در خارج از کشور، طرح استحصال انرژی از امواج را مورد استفاده و بهره‌برداری قرار داده اند، استفاده و بهره‌گیری بیشتری شود. در کشور ایران که تولید انرژی الکتریسیته، عمدتاً بر سوخت‌های فسیلی استوار است، با توجه به محدود بودن اینگونه سوخت‌ها، لازم است مطالعاتی همه جانبه در زمینه جذب انرژی امواج، صورت پذیرد.

## منابع

اینانلو، م. و اژتیان، م. ۱۳۸۸. سامانه مولد و استحصال انرژی امواج آب، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی.

بدیعی، ر. ۱۳۷۱. جغرافیای ایران، جلد اول، جغرافیای طبیعی. انتشارات اقبال. تهران.

ذبیحیان، ف. ۱۳۸۳. ارزیابی انرژی امواج دریا‌های ایران و ساخت و تست یک مدل برای استخراج این انرژی. نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق.

سازمان بنادر و دریانوردی. ۱۳۸۷. مدلسازی امواج دریا‌های ایران جلد اول (دریای خزر). سازمان بنادر و دریانوردی. ایران.

Andersson, M. 2008. Wave power base load properties. Uppsala University. Sweden.

Archie, W. C. 1991. Principle of energy conversion. McGraw Hill, London, UK.

Boyle, G. 1996. Renewable Energy. Center for Renewable Energy Sources. Oxford University Press. Oxford, UK.

Carter, R. W. 2005. Wave energy converters and a submerged horizontal plate. Master of science Thesis, Ocean and Resources Engineering. University of Hawaii. USA.

Cruz, J. & Elkinton, C. 2009. Oregon Wave Energy. Trust Utility Market Initiative. Oregon, USA.

Falnes, J. 2010. Ocean wave energy fundamentals. NTNU, Trondheim, Norway.

Rhinefrank, K. 2006. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. Renewable Energy, 31: 1279-1298

Ringwood, J. 2008. Practical challenges in harvesting wave energy. Electronic Engineering NUI aynooth, Co. Kildare, Ireland.

Tautra Hoen, M. K. 2009. Modeling and control of wave energy converters. NTNU, Norwegian University of Science and Technology. Norway.

Vining, J. G. 2007. Ocean wave energy converters. Master of Science Thesis, Electrical Engineering, University of Wisconsin, Madison.

Wacher, A. & Neilsen, K. 2010. Mathematical and numerical modeling of the AquaBuoy wave energy converter. Journal MICS, 2: 16-33