

# مقایسه کیفی داده‌های امواج ناشی از باد در سواحل جزیره فارور

حسین پور شیخی<sup>۱</sup>، محمدعلی نجارپور<sup>۲\*</sup> و امیر اشتری لری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر h.pourshikhi@yahoo.com  
<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر mohammadnajarpour@yahoo.com  
<sup>۳</sup> استادیار دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر amir70@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۶

## چکیده

هدف از این تحقیق، مقایسه کیفی داده‌های امواج ناشی از باد در برآورد پارامترهای موج در دهانه تنگه هرمز در منطقه فارور است. بدین منظور ابتدا اطلاعات باد منطقه سازمان هواشناسی و اطلاعات موج اندازه‌گیری شده مربوط به سال ۲۰۱۰ تهیه شد. با استفاده از داده‌های باد؛ پارامترهای ارتفاع و دوره تناوب امواج منطقه را از سه روش تجربی *SMB*، *SPM* و *CEM* پیش‌بینی نموده، سپس مقادیر به دست آمده با ارتفاع و دوره تناوب امواج اندازه‌گیری شده در منطقه مقایسه شد. همچنین داده‌های باد منطقه مورد مطالعه را از مدل *ECMWF* (سایت هواشناسی اروپایی) تهیه نموده و با استفاده از اطلاعات باد حاصل مجدداً ارتفاع و دوره تناوب موج منطقه بر اساس سه روش تجربی یادشده، پیش‌بینی و مقادیر حاصل با ارتفاع و دوره تناوب واقعی منطقه مقایسه شد. با برآورد ارتفاع موج قبل از نقطه شکست بر اساس مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های مختلف، میزان انرژی موج حاصله از آن‌ها برای تبدیل به انرژی الکتریکی با یکدیگر مقایسه شد. در نتیجه‌گیری کلی، کیفیت داده‌های باد سازمان هواشناسی منطقه در برآورد ارتفاع موج از روش تجربی (*SMB*) و دوره تناوب موج با روش (*SPM*) نزدیکی بیشتری با داده‌های واقعی منطقه مورد مطالعه داشته و می‌توان از این داده‌ها در تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی استفاده نمود. بیشترین ارتفاع موج قبل از نقطه شکست در حدود ۰/۷۱ متر و عمق در نقطه شکست در حدود ۰/۹۱ متر به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** امواج ناشی از باد، انرژی موج، مدل *ECMWF*، ارتفاع موج، روش‌های تجربی.

## ۱. مقدمه

تبدیل انرژی موج، به انرژی الکتریکی در مناطق خاصی که دارای موقعیت خوبی از نظر مشخصات امواج هستند، از این انرژی‌ها بهره برد. یکی از مناطق حائز اهمیت در این زمینه، منطقه مورد مطالعه (فارور) است که در تنگه هرمز واقع شده و دارای موقعیت جغرافیایی ۲۶ درجه و ۱۷ دقیقه و ۱۴ ثانیه شمالی و ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه و ۵۵ ثانیه شرقی و در فاصله ۶۶ کیلومتری ابوموسی و در فاصله حدود ۲۶۰ کیلومتری بندرعباس قرار دارد. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مشخصات امواج از جمله مهم‌ترین پارامترهای طراحی اجزای بنادر و شناخت پدیده‌های مناطق ساحلی محسوب می‌شود. اثرات امواج در طراحی سازه‌های ساحلی و فراساحلی مستلزم آمار ثبت شده کافی در طول زمان مناسب است، اما در نبود آمار کافی می‌توان از روش‌های نیمه تجربی <sup>۱</sup>*SMB*، <sup>۲</sup>*SPM*، <sup>۳</sup>*CEM* برای به دست آوردن مشخصات امواج استفاده نمود. در عصر حاضر به علت اثرات زیست محیطی سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی پاک مهم بوده و یکی از روش‌های جذب انرژی پاک، استفاده از انرژی امواج دریاست که می‌توان با قراردادن دستگاه‌های

انجام‌شده، روش SPM، از بین روش‌های نیمه‌تجربی مناسب‌ترین روش برای تعیین مشخصات امواج بندر امیرآباد و روش‌های نیمه‌تجربی SMB و SPM به ترتیب مناسب‌ترین روش‌ها برای تعیین ارتفاع و دوره تناوب امواج بندر بوشهر هستند [۱].

درخشان و همکاران (۱۳۸۳)، در مطالعاتی که در زمینه پیش‌بینی امواج دریا با روش‌های تجربی در منطقه بوشهر انجام دادند و با پردازش داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی ساحلی و بویه شناور منطقه بوشهر با استفاده از روش‌های تجربی برای پیش‌بینی SMB و SPM، جانسواپ<sup>۴</sup>، دونلن<sup>۵</sup> و کریلف<sup>۶</sup>، مشاهده کردند که بهترین روش تجربی برای پیش‌بینی ارتفاع امواج بر اساس داده موجود در منطقه بوشهر، روش SMB و بهترین روش تجربی برای پیش‌بینی پریود امواج، روش‌های SMB و جانسواپ است [۲].

## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق از روش‌های تجربی برای به‌دست آوردن ارتفاع موج و دوره تناوب بر اساس اطلاعات باد سینوپتیک، همچنین اطلاعات باد سایت هواشناسی اروپایی ECMWF<sup>۷</sup> استفاده شده است. در این قسمت روش‌های تجربی معرفی می‌شوند.

یکی از روش‌های تجربی پیش‌بینی امواج ناشی از باد، روش SMB است که این روش ابتدا از سوی سوردراپ و مانک ارائه شد، سپس با استفاده از داده‌های بیشتر توسط برشنايدر اصلاح شد، به همین دلیل این روش، SMB نام گرفت [۳]. یکی از پارامترهای مهم که در استفاده از روابط پیش‌بینی امواج موردنیاز است، طول موجگاہ مؤثر است. طبق این روش برای محاسبه طول موجگاہ در یک جهت خاص باید از دو محدوده  $\pm 45^\circ$  نسبت به جهت اصلی وزش باد، شعاع‌هایی با فواصل ۶ درجه ترسیم نمود. این شعاع‌ها به ساحل مقابل نقطه موردنظر محدود می‌شوند. برای محاسبه طول موجگاہ از میانگین وزنی بین شعاع‌های ترسیمی طبق رابطه زیر استفاده می‌شود.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، با استفاده از دو سری از داده‌های باد که شامل داده‌های باد سینوپتیک و داده‌های باد سایت هواشناسی اروپایی است، ابتدا مشخصات موج منطقه با روش‌های تجربی محاسبه و با مقایسه آن‌ها، مناسب‌ترین روش که همخوانی بیشتری با مشخصات امواج واقعی منطقه داشته به‌دست آمد، در نهایت با استفاده از انواع دستگاه‌های تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی در منطقه، در زمینه جذب انرژی‌های پاک، تحقیق به عمل آمد.

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص مشخصات امواج ناشی از باد انجام‌شده است. چگینی و همکاران (۱۳۷۸)، در مقاله‌ای، دقت روش‌های نیمه‌تجربی و عددی در پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد در بندر امیرآباد و بوشهر مورد مطالعه، ارزیابی و مقایسه قرار دادند. آن‌ها در ابتدا مشخصات امواج با استفاده از داده‌های باد ایستگاه‌های همدیدی بابلسر، بوشهر و به‌کارگیری روش‌های نیمه‌تجربی CEM، SPM، SMB را محاسبه کردند. به‌علاوه، مقادیر ارتفاع و دوره تناوب امواج پیش‌بینی‌شده، با مشخصات ثبت‌شده به‌وسیله بویه‌های موج‌نگار امیرآباد، نکا و بوشهر مقایسه و خطای روش‌های نیمه‌تجربی تعیین شده است. سپس نتایج حاصل از روش‌های نیمه‌تجربی با مشخصات به‌دست‌آمده از پروژه مدل‌سازی امواج دریاهای ایران مقایسه شده است. مدل‌سازی مزبور با استفاده از داده‌های میدان باد، سایت هواشناسی اروپایی اصلاح شده و به‌کارگیری مدل موج نرم‌افزار مایک ۲۱ صورت گرفته است. طبق بررسی‌های

$$\frac{gTs}{U} = 7.54 \tanh[0.077(\frac{gX}{U^2})^{0.25}] \quad (5)$$

که در آن ( $U$ ) سرعت باد، ( $X$ ) طول بادگیر، ( $Hs$ ) ارتفاع موج مشخصه، ( $Ts$ ) پرپود موج مشخصه و ( $g$ ) شتاب ثقل زمین است.

در حالتی که زمان تداوم واقعی باد از زمان تداوم محاسبه شده با رابطه (۲) و (۳) کوچکتر باشد، حالت محدودیت زمان تداوم باد حاکم خواهد بود. در این حالت باید با استفاده از رابطه (۶) و (۷) طول موجگاه معادل را برحسب زمان تداوم و سرعت باد محاسبه کرد.

$$\begin{cases} X = \frac{U^2}{g} \exp\left(\frac{1.76A - 0.369 - \sqrt{0.084A^2 - 1.3A + 6.776}}{1.51}\right) \\ A = \ln t - \ln(6.59 \frac{U}{g}) \end{cases} \quad (6)$$

یکی دیگر از روش‌های تجربی استفاده شده در این تحقیق، روش SPM است که در کتاب راهنمای حفاظت سواحل ارائه شده است و برگرفته از روش طیفی جانسواپ می‌باشد.

در این روش از سرعت باد اندازه‌گیری شده در تراز ۱۰ متری نسبت به سطح دریا استفاده می‌شود. برای اصلاح سرعت‌های اندازه‌گیری شده در سایر ارتفاعات و تبدیل آن به سرعت باد در تراز ۱۰ متری، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

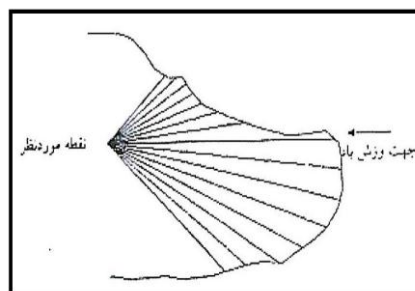
$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z}\right)^{\frac{1}{7}} \quad z < 20m \quad (8)$$

$z$  ارتفاع محل اندازه‌گیری شده سرعت باد نسبت به سطح دریا برحسب متر و  $U_z$  سرعت باد در ارتفاع  $z$  متری از سطح دریا برحسب متر بر ثانیه است.

برای تعیین طول بادگیر در این روش، باید از ۹ شعاع از نقطه موردنظر که باهم زاویه ۳ درجه می‌سازند، استفاده شود و این شعاع‌ها را باید تا نقطه‌ای که خط ساحل را برای نخستین بار قطع کنند، ادامه داد. نقطه شروع این شعاع‌ها محلی است که امواج برای آن نقطه پیش‌بینی می‌شوند و نقطه انتهایی آن روی خط ساحل روبرو قرار می‌گیرد. طول بادگیر

$$X = \frac{\sum X_i \cos \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $X$  طول موجگاه،  $X_i$  طول شعاع‌های ترسیم شده و  $\theta_i$  زاویه هر کدام از شعاع‌های ترسیم شده نسبت به جهت اصلی وزش باد است. شکل (۲) نحوه محاسبه طول موجگاه در روش SMB را نشان می‌دهد.



شکل ۲. طول موجگاه به روش SMB

با روش SMB امواج تولید شده در شرایط محدودیت طول موجگاه و محدودیت زمان تداوم باد را می‌توان پیش‌بینی کرد. برای این کار ابتدا باید زمان تداوم واقعی باد موردنظر را به دست آورد، سپس زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه را محاسبه نمود.

رابطه زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه در مدل SMB به صورت زیر است [۴].

$$\frac{gt_{\min}}{U} = 6.5882 \exp\left\{A^{0.5} + 0.8798 \left(\ln\left(\frac{gX}{U^2}\right)\right)\right\} \quad (3)$$

$$A = 0.0161 \left( \left( \ln\left(\frac{gX}{U^2}\right) \right)^2 - 0.3692 \left( \ln\left(\frac{gX}{U^2}\right) \right) \right) + 2.2024$$

$U$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه،  $t_{\min}$  زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه برحسب ثانیه، و  $X$  طول موجگاه برحسب متر است.

با استفاده از روابط زیر می‌توان ارتفاع و پرپود موج از روش SMB را در آب عمیق محاسبه نمود:

$$\frac{gHs}{U^2} = 0.283 \tanh[0.0125(\frac{gX}{U^2})^{0.42}] \quad (4)$$

از میانگین گیری طول این ۹ شعاع به دست می آید.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^9 X_i}{9} \quad (9)$$

با روش SPM می توان امواج تولید شده در شرایط محدودیت طول موجگاه و محدودیت زمان تداوم باد را پیش بینی کرد. به این منظور ابتدا باید زمان تداوم واقعی باد مورد نظر را به دست آورد، سپس طبق رابطه (۱۰) زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه را محاسبه نمود [۵]:

$$t_{\min} = 6.88 \times 10 \left( \frac{U_A}{g} \right) \left( \frac{gX}{U_A^2} \right)^{\frac{z}{s}} \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $t_{\min}$  زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه برحسب ثانیه،  $U_A$  عامل تنش باد برحسب متر بر ثانیه،  $X$  طول بادگیر برحسب متر و  $g$  برابر است با ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است.

در صورتی که زمان تداوم واقعی باد، از مقدار به دست آمده از رابطه (۱۰) بیشتر باشد، با استفاده از رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) می توان ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب چکادی را محاسبه نمود [۶].

$$\frac{gHm_0}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-2} \left( \frac{gX}{U_A^2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$\frac{gTp}{U_A} = 2.857 \times 10^{-1} \left( \frac{gX}{U_A^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

اگر زمان تداوم واقعی باد از زمان تداوم محاسبه شده با رابطه (۱۰) کمتر باشد، حالت مدت وزش محدود حاکم شده که در این شرایط باید با استفاده از زمان تداوم واقعی باد، طول موجگاه فرضی را از رابطه بالا به دست آورده و به جای طول موجگاه اصلی، در روابط بعدی قرار داد تا بتوان ارتفاع و پیوند موج را در شرایط محدودیت زمان تداوم باد محاسبه کرد.

در این رابطه  $U_A$  عامل تنش باد برحسب متر بر ثانیه است و طبق رابطه (۱۳) محاسبه می شود:

$$U_A = 0.71U^{1.23} \quad (13)$$

روش CEM - که جدیدترین روش پیش بینی امواج در کتاب

راهنمای مهندسی ساحل است - طبق روابط زیر می توان ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب را به دست آورد [۷].

در روابطی که روش CEM برای پیش بینی ارتفاع موج شاخص  $\hat{u}$  و دوره تناوب چکادی ارائه کرده است، از سرعت برشی،  $u_*$  استفاده می شود. برای محاسبه  $u_*$  روابط زیر پیشنهاد شده است.

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035U_{10}) \quad (14)$$

$$u_* = U_{10}(C_D)^{0.5} \quad (15)$$

به طوری که  $C_D$  ضریب مقاومت  $\hat{u}$  و  $u_*$  سرعت باد در تراز ۱۰ متری برحسب متر بر ثانیه است.

با استفاده از روش CEM می توان امواج تولید شده در شرایط محدودیت طول موجگاه، محدودیت زمان تداوم باد و امواج کاملاً رشد یافته را پیش بینی کرد. برای این کار ابتدا باید زمان تداوم واقعی باد مورد نظر را به دست آورد، سپس با استفاده از رابطه (۱۶)، زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه را محاسبه کرد.

$$t_{\min} = 77.23 \frac{X^{0.67}}{U_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (16)$$

اگر زمان تداوم واقعی بزرگتر از  $t_{\min}$  باشد، رشد موج با طول موجگاه محدود می شود و طبق روابط (۱۷) و (۱۸) می توان ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب چکادی را محاسبه کرد:

$$Hm_0 = 4.13 \times 10^{-2} \left( \frac{u_*^2}{g} \right) \left( \frac{gF}{u_*^2} \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$Tp = \frac{1}{2.727} \left( \frac{u_*}{g} \right) \left( \frac{gF}{u_*^2} \right)^{1/3} \quad (18)$$

در این تحقیق برای بررسی شرایط آب عمیق از رابطه:

$L_0 = 1.56T^2$  استفاده می شود، در این رابطه  $L_0$  طول موج و  $T$  میانگین پیوند بلندترین امواج روش های نیمه تجربی است. اگر  $\frac{h}{L_0} > 0.5$  باشد، آب عمیق و اگر  $\frac{h}{L_0} < 0.05$  باشد، آب کم عمق محسوب می شود، و چون بویه موج نگار در منطقه مورد مطالعه در عمق ۲۵ متری نصب شده است، مقدار



شکل ۴. دستگاه جذب نقطه‌ای انرژی موج

یکی دیگر از دستگاه‌های تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی دستگاهی است که بر اساس اختلاف فشار کار می‌کند و از دو بخش اصلی تشکیل شده است. در قسمت فوقانی این دستگاه دو تاج متوالی وجود دارد که یکی پیستونی شکل و دیگری که در بالای آن قرار گرفته است، به صورت یک سیلندر پنوماتیکی است و دارای فرورفتگی خاصی است و قسمت پایه آن به بستر دریا ثابت و محفظه سیلندری شکل آن که از هوا پر است در بالا نصب شده و بر اثر عبور موج در بالای آن، سیلندر دستگاه قابلیت جابه‌جایی را دارد. حجم آب عبوری ناشی از امواج، در بالای دستگاه فشاری ایجاد نموده و باعث فشردن هوا در سیلندر می‌شود. حرکت سیلندر از قسمت بالا به پایین باعث تولید انرژی الکتریکی و انتقال آن به ایستگاه برق که در ساحل قرار گرفته است، می‌شود. پس از شکست موج در اثر کاهش حجم آب عبوری از بالای دستگاه اختلاف فشاری کاهش یافته و سیلندر دستگاه به سمت بالا، یعنی به حالت اولیه خود برمی‌گردد. این دستگاه در نزدیکی ساحل در محدوده مشخص و معینی نصب می‌شود، تعمیر و نگهداری این دستگاه به صورت دوره‌ای صورت می‌پذیرد. یکی از مسائل مهمی که برای این نوع دستگاه‌ها باید در نظر داشت این است که عبور شناورها، یدک‌کش‌ها و کشتی‌ها از بالای این دستگاه باعث وارد شدن خسارت به آن‌ها می‌شود. این دستگاه تبدیل انرژی الکتریکی باید در محدوده و فاصله‌ای نسبت به ساحل قرار گیرد که دور از آسیب باشد، شکل (۵).

به دست آمده از  $\frac{h}{L_0}$  برابر ۰/۸۱ است، و شرایط آب عمیق برقرار است. برای تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی، انواع دستگاه‌های تبدیل انرژی استفاده می‌شود، یکی از این دستگاه‌ها که بسیار پرکاربرد بوده، دارای یک لوله استوانه‌ای شکل درازی است که به موازات جهت موج غالب و "سوار" بر امواج می‌شود. نمونه‌ای از این دستگاه در منطقه محدود و در فاصله مشخصی از ساحل نصب می‌شود که انرژی موج را جذب نموده و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند به عنوان پلامیس<sup>۱</sup> شناخته می‌شود [۸]، در شکل (۳) نشان داده شده است. تعداد زیادی از این لوله‌های استوانه‌ای را در جهت موج غالب، قبل از نقطه شکست موج قرار می‌دهند که انرژی موج را جذب نموده و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند.



شکل ۳. میدان استقرار دستگاه پلامیس

یکی دیگر از دستگاه‌های تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی، دستگاه جذب نقطه‌ای است که همانند یک بویه موج‌نگار بوده و دارای ساختار شناور است؛ این دستگاه به وسیله امواج در سطح آب بالا و پایین شده انرژی موج را از طریق فنرهایی که در بالای این دستگاه نصب شده، جذب نموده و بعد از پایین رفتن موج، این فنر به حالت اولیه خود برمی‌گردد و انرژی موج را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. از آنجاکه این دستگاه اندازه کوچکی دارد تعدادی از آن‌ها در یک محل قرار می‌گیرند تا انرژی قابل ملاحظه‌ای از جبهه موج را جذب نماید، شکل (۴).

دستگاه روگذر، یکی دیگر از دستگاه‌های تبدیل انرژی است که به صورت دو بازوی مورب با یک زاویه مشخص و توربینی که در مرکز این دستگاه قرار گرفته طراحی شده و بدین صورت عمل می‌کند که موج، با قدرت زیاد وارد این دو بازو شده و با زاویه‌ای که دارد آب را به سمت توربین هدایت می‌کند و باعث چرخش آن می‌شود. از طریق ژنراتوری که روی این دستگاه نصب شده انرژی الکتریکی تولید می‌شود. در شکل (۷)، نمونه‌ای از این دستگاه دیده می‌شود. این دستگاه از ساختمانی بزرگ تشکیل شده و دارای وزن زیادی است، و باید در مناطقی استفاده شود، که دارای امواج با ارتفاع موج و دوره تناوب زیادی باشد تا بتواند انرژی الکتریکی تولید کند [۹].



(الف)



(ب)

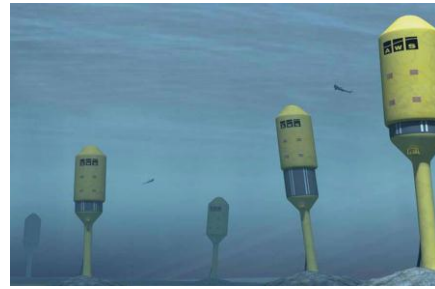
شکل ۷. دستگاه روگذر موج

اما برای نصب دستگاه‌های تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی باید نقطه شکست موج را به دست آورد، که بینیم در چه نقطه‌ای بیشترین ارتفاع موج را داریم و در چه عمقی موج شکسته می‌شود. که از روابط زیر استفاده می‌کنیم.

برای تعیین مشخصات شکست موج، باید از روابط زیر استفاده نمود. چراکه ارتفاع موج شاخص قبل از نقطه شکست در منطقه مورد مطالعه دارای اهمیت زیادی است.

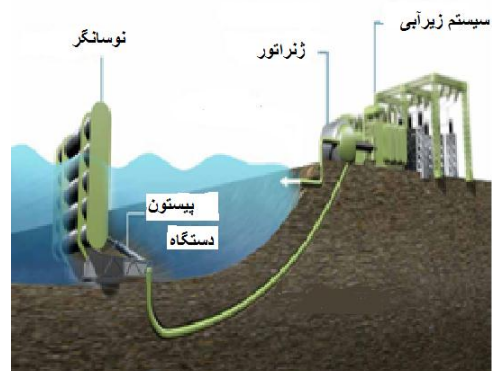
$$k = 0.78$$

$$H_b = kh_b \quad (19)$$

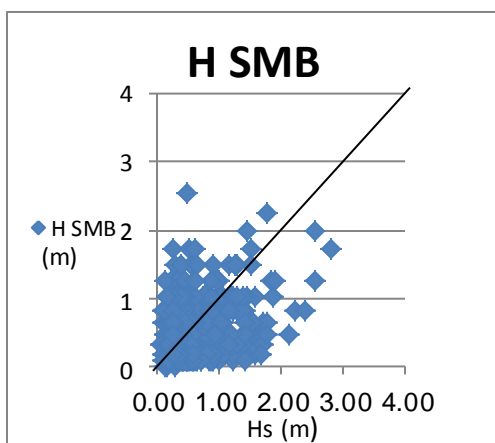


شکل ۵. دستگاه جذب انرژی حاصل از اختلاف فشار در زیر آب

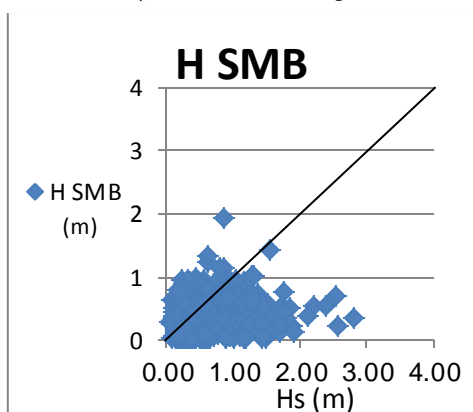
یک نمونه دیگر از این دستگاه‌های تبدیل انرژی، با یک تکیه‌گاه مستحکم به بستر نصب می‌شود. از طریق یک صفحه متحرک، با حرکت موج، انرژی آن را جذب نموده از طریق پیستونی هیدرولیکی و یک لوله فشارقوی هیدرولیکی آب دریا را پمپ نموده و به ایستگاه برق در ساحل انتقال می‌دهد. در ایستگاه یک ژنراتور برق وجود دارد که انرژی آب پمپاژ شده را جذب نموده و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید و آب منتقل شده دوباره به دریا برمی‌گردد. قسمت نوسان‌کننده دستگاه در جهت موج غالب قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود امواج به دستگاه برخورد کرده، اعمال فشار باعث حرکت افقی و پمپ نمودن آب از طریق پیستون هیدرولیکی می‌شود. پس از عبور موج این ستون نوسانی به حالت اولیه خود برمی‌گردد. در این دستگاه تبدیل انرژی، نکته حائز اهمیت این است که باید دستگاه در فاصله و محدوده مشخص در نزدیکی ساحل و ایستگاه برق مجهز نصب شود. این دستگاه معمولاً در مناطق نزدیک ساحل که انرژی زیادی از امواج می‌توان جذب نمود، نصب می‌شود، شکل (۶).



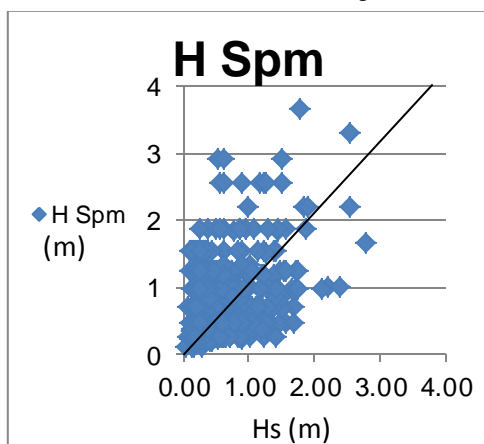
شکل ۶. دستگاه تبدیل انرژی نوسانی موج



شکل ۸. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش SMB از داده‌های سینوپتیک



شکل ۹. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش SMB از داده‌های (ECMWF)



شکل ۱۰. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش SPM از داده‌های سینوپتیک

$$H_b = kmx_b = \left(\frac{k}{g}\right)^{1/5} \left(\frac{H_0^2 C_0 \cos \theta_0}{2}\right)^{2/5} \quad (20)$$

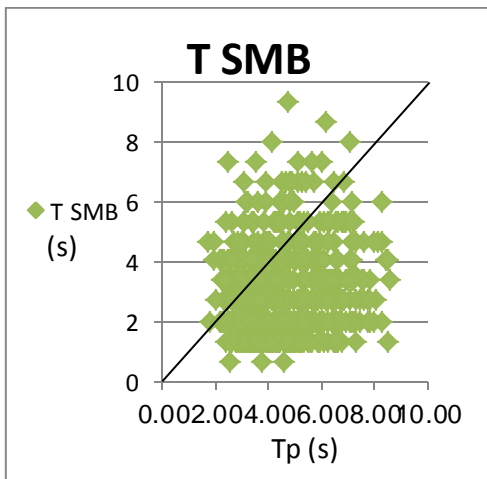
$$kh_b = H_0 \left[ \frac{C_0}{2\sqrt{gh_b}} (\cos \theta_0) \right]^{1/2} \quad (21)$$

$$L_0 = 1.56T^2 \quad (22)$$

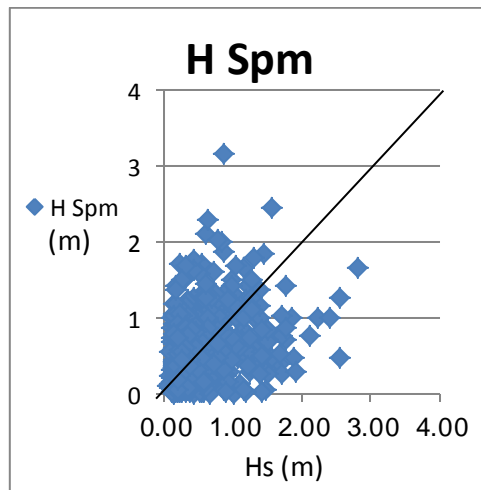
نخستین معیار برای شکست این است که امواج وقتی می‌شکنند ارتفاع آن‌ها مساوی کسری از عمق آب شود. در این روابط  $H_b$  ارتفاع موج در نقطه شکست و  $h_b$  عمق نقطه شکست است و  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  است.

### ۳. نتایج تحقیق

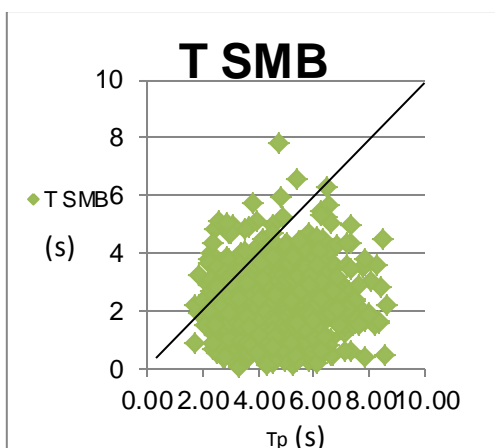
در این بخش به منظور بررسی نتایج به دست آمده، با استفاده از داده‌های باد سینوپتیک منطقه (فارور) و داده‌های باد سایت هواشناسی اروپایی، از سه روش تجربی SMB، SPM و CEM ارتفاع موج و دوره تناوب به دست آمد. مقایسه مقادیر ارتفاع موج حاصل از هر یک از سه روش تجربی مزبور با مقادیر واقعی در نمودارهای (۸) تا (۱۳) و مقایسه مقادیر دوره تناوب امواج با استفاده از سه روش یادشده با مقادیر اندازه‌گیری شده منطقه در شکل‌های (۱۴) تا (۱۹) نشان داده شده است. برای بررسی دقت هر یک از روش‌ها در برآورد مقادیر ارتفاع و پریود امواج شاخص‌های آماری مربوطه محاسبه شد، که نتایج بررسی در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. بر اساس مقادیر مندرج در جدول‌ها روش (SMB) از نظر ارتفاع امواج منطقه و روش (SPM) از نظر دوره تناوب مناسب‌ترین روش براساس داده‌های باد اندازه‌گیری (سینوپتیک) می‌باشد.



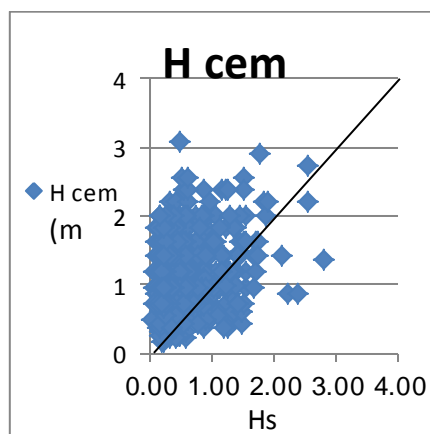
شکل ۱۴. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش SMB با داده‌های سینوپتیک



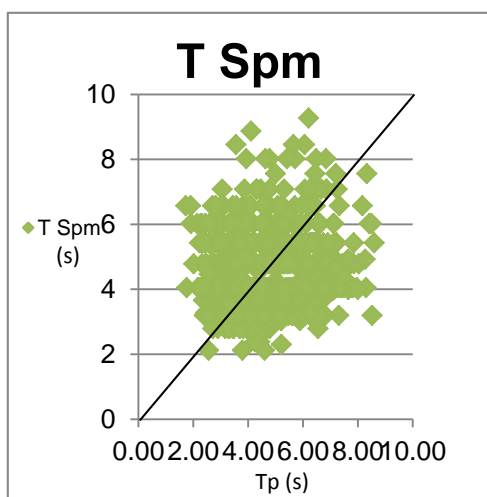
شکل ۱۱. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش SPM از داده‌های (ECMWF)



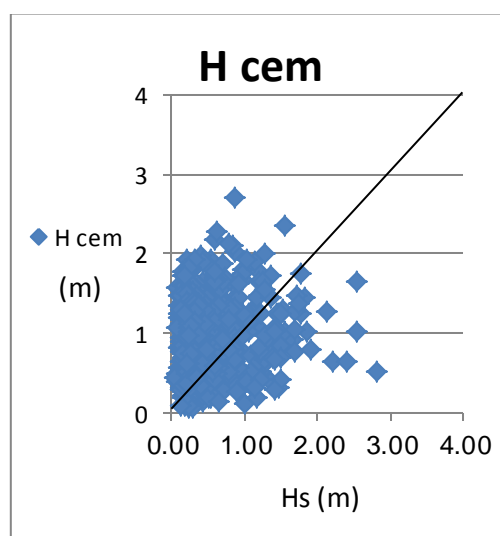
شکل ۱۵. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش SMB با داده‌های (ECMWF)



شکل ۱۲. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش CEM از داده‌های سینوپتیک



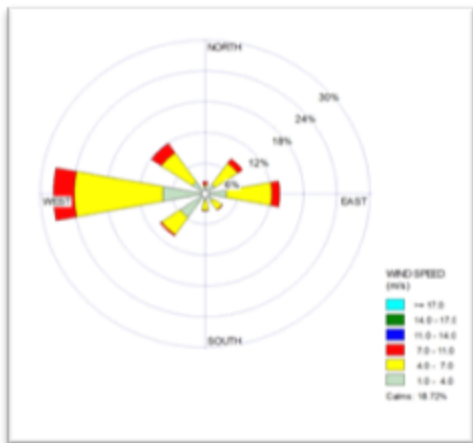
شکل ۱۶. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش SPM با داده‌های سینوپتیک



شکل ۱۳. مقایسه ارتفاع موج واقعی با ارتفاع موج به دست آمده از روش CEM از داده‌های (ECMWF)

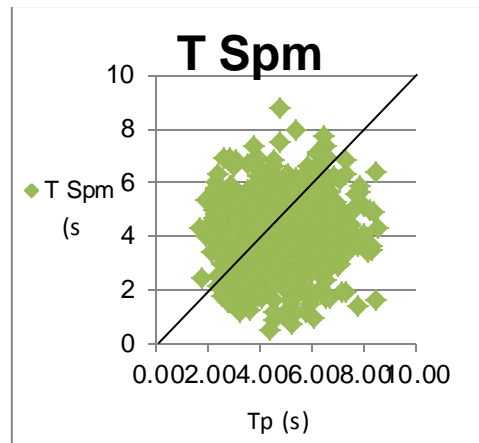


شکل (۲۰) گلباد<sup>۱</sup> منطقه با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه همدیدی (سینوپتیک) و شکل (۲۱) گلموج<sup>۲</sup> منطقه برحسب ارتفاع موج واقعی رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ باد و موج غالب در جهت سمت غرب می‌باشد که می‌توان برای به دست آوردن انرژی الکتریکی از امواج دستگاه‌های موردنظر را در جهت موج غالب قرار داد. اهمیت موضوع در آن است که بتوان بیشترین انرژی موج حاصله را جذب و به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. در گلباد ترسیم‌شده بیشترین سرعت باد، مربوط به سرعت بین ۷ تا ۱۱ متر بر ثانیه، و بیشترین درصد باد مربوط به سرعت باد بین ۴ تا ۷ متر بر ثانیه است.

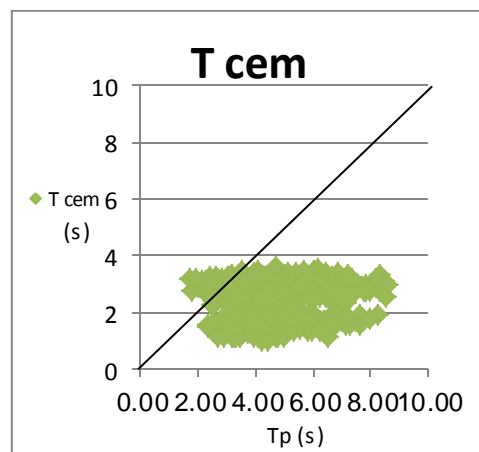


شکل ۲۰. ترسیم گلباد منطقه با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک منطقه

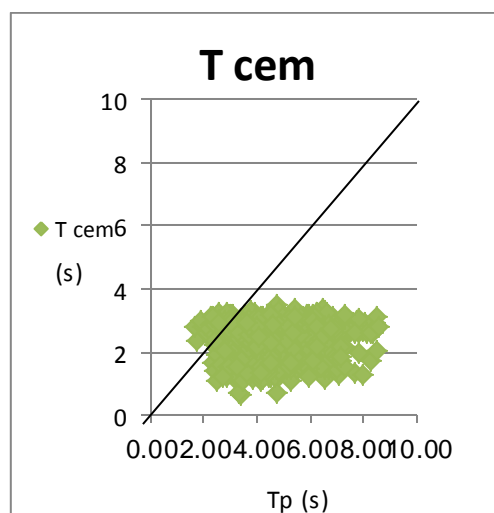
همان‌طور که از گلموج ترسیم‌شده مشخص است، بیشترین ارتفاع موج به دست آمده مربوط به سمت غرب منطقه مورد مطالعه است. بین امواج تولیدشده، امواج با ارتفاع بیشتر از (۱/۱) متر هم وجود داشته است.



شکل ۱۷. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش SPM با داده‌های (ECMWF)



شکل ۱۸. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش CEM با داده‌های سینوپتیک

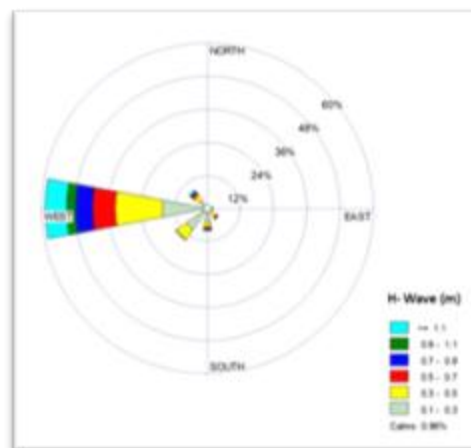


شکل ۱۹. مقایسه دوره تناوب واقعی با دوره تناوب روش CEM با داده‌های (ECMWF)

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد از روش‌های تجربی به منظور به دست آوردن مشخصات امواج منطقه استفاده شد و برای دو سری از داده‌های باد نتایج به دست آمده همراه با نمودارهای مربوطه در بخش نتایج ارائه شد. برای تعیین دقت روش‌های مزبور برخی اطلاعات آماری در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است، در اصل باید عنوان نمود که کدام یک از داده‌های باد ایستگاه سینوپتیک یا ECMWF اهمیت بیشتری دارد و خروجی کدام روش با ارتفاع موج واقعی منطقه تطابق بیشتری دارد، که بتوان در نهایت از آن داده‌ها برای پیش‌بینی مشخصات موج استفاده نمود. طبق نتایج حاصل از روش SMB با داده‌های سینوپتیک منطقه در محاسبه ارتفاع امواج منطقه با ضریب پراکندگی ۵۲ درصد، جذر متوسط مربع خطاهای ۰/۴۲ و همبستگی داده‌های ۶۷ درصد به عنوان بهترین و مناسب‌ترین روش برای ارتفاع امواج منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. همچنین روش SPM با داده‌های سینوپتیک منطقه دارای ضریب پراکندگی ۳۷ درصد و جذر متوسط مربع خطایی ۱/۶۸ ثانیه و ضریب همبستگی ۲۵ درصد به عنوان مناسب‌ترین روش برای به دست آوردن دوره تناوب منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن ارتفاع امواج با روش‌های تجربی، روش SMB با داده‌های باد سینوپتیک، بیشترین نزدیکی ارتفاع موج، با ارتفاع موج واقعی منطقه دارد.

$H_s = 0.6$  m که میانگین ارتفاع موج شاخص در یک سال محاسبه شده است و جهت موج غالب (غرب) و جهت باد با بیشترین داده بر اساس گلباد و گلموج منطقه مشخص است، که در این جهت است. برای تعیین ارتفاع موج و عمق در نقطه شکست از روابط (۱۹)(۲۰)(۲۱)(۲۲) استفاده شد و با توجه به مقدار دوره تناوب میانگین موج واقعی منطقه بوده که  $T_p = 4.61$  (s) همچنین  $C_s = 33.19$ ، در نهایت بیشترین ارتفاع موج قبل از نقطه شکست در حدود ۰/۷۱ متر و عمق در نقطه شکست در حدود ۰/۹۱ متر محاسبه شد و می‌توان انرژی موج را از طریق دستگاه‌های تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی جذب نمود.



شکل ۲۱. گلموج ترسیم شده بر حسب ارتفاع موج واقعی منطقه  
جدول ۱. خطاهای روش‌های تجربی از نظر داده‌های سینوپتیک منطقه (فارور)

SMB	SPM	CEM	ارتفاع موج
۰/۴۲	۰/۵۱	۰/۹	جذر متوسط مربع خطاها (متر)
۵۲	۶۴	۷۹	ضریب پراکندگی (درصد)
۶۷	۵۹	۵۷	ضریب همبستگی (درصد)
SMB	SPM	CEM	دوره تناوب
۲/۴۳	۱/۶۸	۲/۴۹	جذر متوسط مربع خطاها (ثانیه)
۴۰	۳۷	۳۳	ضریب پراکندگی (درصد)
۳۹	۲۵	۲۳	ضریب همبستگی (درصد)

جدول (۲) خطای روش‌های تجربی از داده‌های مدل ECMWF منطقه (فارور)

SMB	SPM	CEM	ارتفاع موج
۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۷۴	جذر متوسط مربع خطاها (متر)
۵۵	۶۶	۸۱	ضریب پراکندگی (درصد)
۵۲	۴۶	۴۴	ضریب همبستگی (درصد)
SMB	SPM	CEM	دوره تناوب
۲/۸۴	۱/۸۷	۲/۵۷	جذر متوسط مربع خطاها (ثانیه)
۳۸	۴۰	۳۳	ضریب پراکندگی (درصد)
۲۱	۱۶	۱۵	ضریب همبستگی (درصد)

[5] Manual SP. Coastal Engineering Research Center. Department of the Army, Waterways Experiment Station. 1984;1.

[۶] لیو زو، فریگارد پیتز. تولید و تحلیل امواج تصادفی. ترجمه وحید چگینی. تهران: انتشارات مرکز ملی اقیانوس‌شناسی؛ ۱۳۸۵.

[7] Engineers UA. Coastal engineering manual. Engineer Manual. 2002;1110:2-1100.

[8] Jin S, Yan X, Zhang H, Fan W. Weight-length relationships and Fulton's condition factors of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the western and central Pacific Ocean. PeerJ. 2015 Feb 12;3:e758.

## ۶. پی نوشت

<sup>1</sup> Sverdrup Munck Bretschneider

<sup>2</sup> shore protection manual

<sup>3</sup> coastal engineering manual

<sup>4</sup> Jonswap

<sup>5</sup> Donelan

<sup>6</sup> Krylov

<sup>7</sup> European Centre for Meteorological Weather Forecasting

<sup>8</sup> significant wave height

<sup>9</sup> drag coefficient

<sup>10</sup> Pelamis

<sup>11</sup> wind rose

<sup>12</sup> wave rose

در نتیجه گیری کلی، کیفیت داده‌های باد سازمان هواشناسی منطقه در برآورد ارتفاع موج از روش تجربی SMB و دوره تناوب موج با روش SPM نزدیکی بیشتری با داده‌های واقعی منطقه مورد مطالعه داشته، و می‌توان از این داده‌ها در تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی استفاده نمود.

## ۵. مراجع

[۱] چگینی وحید، چگینی فاطمه، تائبی سهیلا. ارزیابی و مقایسه روش‌های نیمه تجربی و عددی در پیش‌بینی مشخصات امواج بنادر امیرآباد و بوشهر. مهندسی دریا. ۱۳۷۸؛ ۴(۷): ۴۱-۵۷.

[۲] درخشان شاهرخ، مصطفی قره‌باغی احمد رضا، چناقلو محمدرضا. پیش‌بینی مشخصات امواج دریا در منطقه بوشهر. اولین کنگره ملی مهندسی عمران؛ ۱۳۸۳ اردیبهشت ماه ۲۲-۲۴؛ تهران، ایران.

[۳] چگینی وحید، چگینی فاطمه، گلشنی علی اصغر، تائبی سهیلا. امواج ناشی از باد و پیش‌بینی آن‌ها در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر. تهران: انتشارات مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی؛ ۱۳۹۱.

[4] Lazarus SM, Wilson ST, Splitt ME, Zarillo GA. Evaluation of a wind-wave system for ensemble tropical cyclone wave forecasting. part II: Waves. Weather and Forecasting. 2013 Apr;28(2):316-30.