

ارزیابی مدل‌های مختلف در تخمین طیف امواج بندر امیرآباد

یاسر دهقان^{۱*}، وحید چگینی^۲، محمدعلی نجارپور^۳، محمود اخیانی^۴

ydg.man@gmail.com

^{۱*} نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

vahid.chegini@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

mohammadnajarpour@yahoo.com

^۳ استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

akhyani@live.com

^۴ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر، قائم شهر

تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۶

چکیده

در این تحقیق تابع چگالی طیفی مربوط به امواج دریای خزر در بندر امیرآباد با استفاده از داده‌های بویه موج‌نگار بررسی شده است. این بویه در عمق ۲۵ متری مستقر شده و نوسانات سطح دریا را با فرکانس ۴ هرتز ثبت می‌کند. در ابتدا طیف انرژی موج با استفاده از تبدیل فوری سریع استخراج شد، سپس دقت مدل‌های جانسواپ، نیومن و کرلیف در تخمین طیف مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که این مدل‌ها با ضرایب پیش‌فرض عملکرد مطلوبی در تخمین طیف امواج منطقه ندارد؛ بنابراین با به‌کارگیری روش کمترین مربعات در برازش منحنی، ضرایب بهینه برای این مدل‌ها استخراج شد. در ادامه اثر پهنای طیف (v) مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در طیف‌های باریک ($v < 0.4$) مدل کرلیف و در طیف‌های پهن ($v > 0.45$) مدل نیومن بهترین عملکرد را داشته است و برای طیف‌هایی که بین این دو بازه قرار دارد مدل جانسواپ دقیق‌ترین نتایج را داشته است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که طیف موج در جنوب دریای خزر با در نظر گرفتن پهنای طیف برازش خوبی با مدل‌های رایج دارد.

واژه‌های کلیدی: دریای خزر جنوبی، طیف امواج دریا، جانسواپ، پهنای طیفی

۱. مقدمه

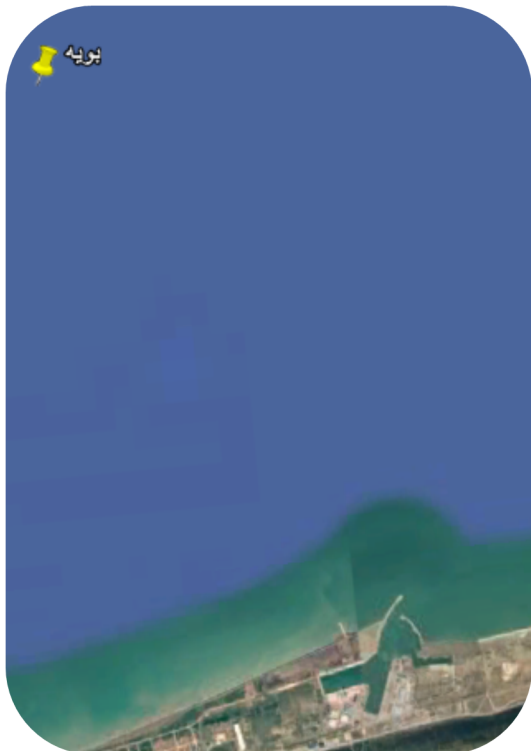
اقیانوس‌ها اطلاعات مورد نیاز در خصوص طراحی و اجرای پروژه‌های دریایی مانند کشتی‌سازی، سازه‌های ساحلی و فراساحلی را فراهم می‌کنند [۲]. با توجه به بهره‌مندی ایران از چند هزار کیلومتر خط ساحلی در شمال و جنوب کشور و روند رو به رشد پروژه‌های دریایی در این مناطق، ضرورت

امواج سطحی آب یکی از مشهورترین پدیده‌هاست که همواره در تمامی توده‌های آبی مانند تالاب‌ها، برکه‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، سدها، دریاها و اقیانوس‌ها مشاهده می‌شوند [۱]. توصیف و ارزیابی امواج ناشی از باد در

شبه‌سازی مطالعات متعددی در خصوص شبیه‌سازی امواج دریای خزر صورت گرفته است. در نرم‌افزارهای مدل‌سازی امواج دریا مانند SWAN و Mike21 برای رسیدن به نتایج دقیق، تعیین شرط مرزی اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به اینکه مشخصات امواج در نواحی مرزی با استفاده از مدل‌های طیفی استاندارد مانند پیرسون مسکوویچ (PM)^۱ و جانسواپ^۲ بیان می‌شود، استفاده از مدل‌های طیفی با بیشترین سازگاری با اقلیم موج، اهمیت زیادی دارد؛ بنابراین در این تحقیق قابلیت مدل‌های طیفی استاندارد در تخمین طیف امواج در محدوده بندر امیرآباد بررسی شد و ضرایب بهینه مربوطه محاسبه و با مقادیر پیش فرض آن مقایسه شد.

۲. مواد و روش‌ها

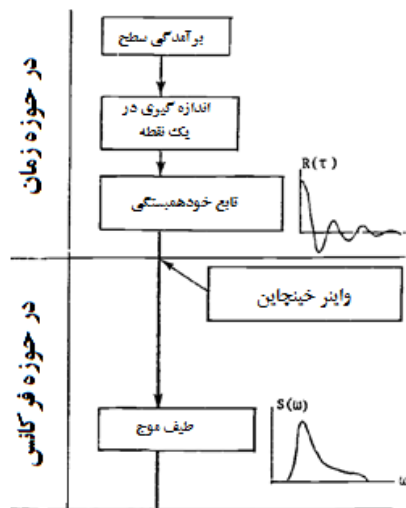
داده‌های مورد استفاده در این تحقیق توسط بویه موج نگار ملی فراهم شده است. این بویه در مختصات جغرافیایی $36,93452^{\circ}$ شمالی و $53,323^{\circ}$ شرقی و در عمق ۲۵ متری و در فاصله حدود ۱۰ کیلومتری از بندر امیرآباد (شکل ۱) مستقر بوده و نوسان‌های سطح دریا^۳ را با فرکانس ۴ هرتز ثبت می‌کند.



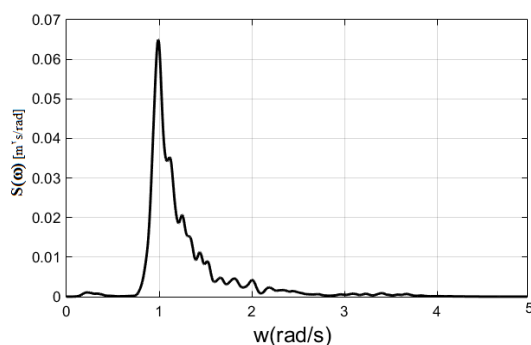
شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای بندر امیرآباد و موقعیت استقرار بویه

انجام مطالعات بنیادی و مستمر برای شناخت طیف امواج تعیین دقت به‌روزرسانی مطالعات پیشین فراهم می‌شود. دریای خزر به دلیل شکل هندسی خاص و گستردگی عرض جغرافیای از نظر شکل‌گیری امواج بادرانده از وضعیت خاصی برخوردار است، به طوری که بلندترین امواج ایران در سواحل جنوبی دریای خزر به ثبت رسیده است. با توجه به موقعیت گردشگری این منطقه و احداث هتل‌ها و سایر بناهای ساحلی، دقت و حساسیت لازم در خصوص تخمین دقیق امواج در این منطقه اهمیت بسیار زیادی دارد. چگینی و همکاران (۱۳۷۸)، دقت روش‌های نیمه‌تجربی و عددی را در پیش‌بینی امواج بادرانده در بندرهای امیرآباد و نوشهر مقایسه کردند. آن‌ها در ابتدا به کمک روش‌های نیمه‌تجربی و با استفاده از داده‌های باد ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی، امواج منطقه را شبیه‌سازی کردند و نتایج را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط بویه و نتایج پروژه شبیه‌سازی امواج دریاهای ایران مقایسه کردند و مشخص شد که روش نیمه-تجربی SPM، در تعیین مشخصه‌های امواج بندر امیرآباد دقیق‌تر است و روش‌های SMB و SPM برای تخمین ارتفاع و پرریود امواج بندر نوشهر توانمندتر است [۳]. دردی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل طیفی SWAN مشخصات امواج در محدوده بندر امیرآباد را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها ابتدا با استفاده از یک مدل کلی امواج منطقه را در مقیاس بزرگ شبیه‌سازی کرده و نتایج آن را به‌عنوان شرط مرزی برای مدل‌سازی در مقیاس کوچک‌تر در اطراف بندر استفاده کردند. نتایج حاصل با استفاده از داده‌های بویه موج‌نگار مستقر در این بندر صحت‌سنجی شد. مقایسه نتایج نشان داد که مدل‌سازی امواج در این منطقه دقت مطلوبی داشته است [۴].

با توجه به اینکه در دهه اخیر اندازه‌گیری‌های میدانی وسیع و جامعی از سوی نهادهای مختلف دریایی کشور در دریای خزر جنوبی صورت گرفته و تعداد زیادی تجهیزات اندازه‌گیری در نواحی عمیق و ساحلی نصب و راه‌اندازی شده است، بانک اطلاعاتی مناسب و مفیدی برای بررسی اقلیم و مطالعات هیدرودینامیک دریای خزر ایجاد شده است؛ بنابراین در این مقاله با بهره‌گیری از داده‌های ثبت‌شده در بندر امیرآباد طیف انرژی امواج این منطقه مطالعه شده است. در چند سال اخیر با توجه به توسعه مدل‌ها و نرم‌افزارهای



شکل ۳: طرح‌واره محاسبه طیف موج [۲]



شکل ۴: نمونه‌ای از طیف موج استخراج‌شده به روش FFT

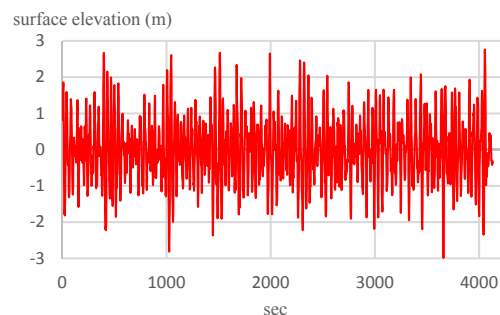
۲-۲. تئوری و محاسبات

معادله عمومی طیف امواج دریا که به‌عنوان شکل پایه‌ی مدل‌های طیفی مورد استفاده قرار گرفته، عبارت است از [۵]:

$$S(\omega) = a\omega^{-p} \exp(b\omega^{-q}) \quad (۳)$$

رابطه بالا به ازای $p=5$ و $q=4$ شکل کلی طیف پیرسون-موسکوویچ است که به ازای مقادیر مختلف برای ضرایب a و b به‌عنوان مبنای بسیاری از روابط طیفی است [۵]. ضرایب a و b پارامترهای تنظیم‌کننده شکل و مقیاس طیف هستند که به عوامل مؤثر در تولید امواج ناشی از باد مانند سرعت باد، طول حوزه بادخیز، زمان تداوم باد و ... بستگی دارند و می‌توانند به‌صورت توابعی از این عوامل، یا به‌صورت توابعی از پرورد و ارتفاع مؤثر موج بیان شوند [۲]. مدل پیرسون-موسکوویچ انرژی موج را برحسب فرکانس و سرعت باد به‌صورت زیر معرفی می‌کند [۶ و ۵].

در شکل ۲ نمونه‌ای از سری زمانی نوسانات سطح دریا آورده شده است.



شکل ۲: نمونه‌ای از سری زمانی نوسانات سطح

۲-۱. تابع خودهمبستگی

نوسانات عمودی سطح آب نسبت به سطح متوسط دریا در $\eta(t)$ در یک نقطه مشخص رفتاری تصادفی دارد و با $\eta(t)$ نمایش داده می‌شود. روند تغییرات η ایستا بوده و تابع خودهمبستگی آن به‌صورت زیر است [۲]:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \eta(t)\eta(t+\tau) dt \quad (۱)$$

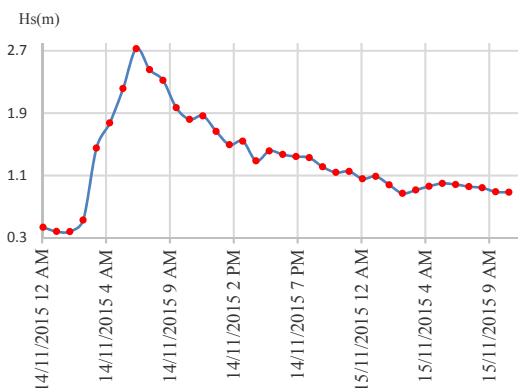
نظریه واینر خینچاین^۵ نقش بسزایی در تحلیل امواج تصادفی دریا ایفا می‌کند. در این نظریه رابطه بین تابع خودهمبستگی در حوزه زمان با رابطه طیف انرژی در حوزه فرکانس بیان شده است. بر اساس این نظریه با فرض ایستا بودن نوسانات دریا چگالی طیفی موج به‌صورت تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی بیان می‌شود [۲]:

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (۲)$$

در شکل ۳ طرح‌واره استخراج طیف موج از سری زمانی مشخص شده است. با توجه به اینکه پردازش بر روی سری زمانی گسسته انجام می‌شود، برای استخراج طیف از روش تبدیلات فوریه سریع^۶ در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در شکل ۴ نمونه‌ای از طیف استخراج‌شده نمایش داده شده است. پس از استخراج طیف در مرحله بعد دقت مدل طیفی جانسواپ در تخمین طیف انرژی موج بررسی شد.

چنانچه سایر عوامل محیطی مانند تردد شناورها، امواج انعکاسی از سازه‌ها و تأسیسات ساحلی و هر عامل تأثیرگذار دیگر وجود داشته باشد، اندازه‌گیری‌های انجام شده برای مطالعه طیفی مناسب نخواهد بود. با بررسی‌های انجام شده روی داده‌های موجود، طوفانی که در خردادماه ۹۵ رخ داده است، برای انجام محاسبات، مطلوب شناخته شده است. سری زمانی ارتفاع موج این طوفان در شکل ۵ آورده شده است.

با بررسی سری زمانی این طوفان مشاهده می‌شود که ارتفاع موج با سرعت بالایی افزایش یافته است به طوری که در ابتدا با شیب تند در یک ساعت از حدود ۰/۵ متر به ۱/۵ متر رسیده و با شیب کمتر طی سه ساعت به ارتفاع ۲/۷ رسیده است. از آنجا که در این مرحله افزایش ارتفاع با سرعت بالایی صورت گرفته است، طیف موج مدت‌زمان لازم برای رسیدن به حالت نمو کامل را نداشته است. چنین شرایطی اغلب در اثر وزش بادهای شدید با عمر کوتاه روی می‌دهد.



شکل ۵: نمونه‌ای از سری زمانی ارتفاع موج

در شکل ۶ سه طیف از این طوفان ترسیم شده است. یک طیف مربوط به زمان اوج طوفان با ارتفاع موج حدود ۲/۷ متر بوده و دو طیف دیگر با ارتفاع ۱/۷ و ۱/۵ متر مربوط به وضعیت رو به رشد و وضعیت روبه‌زوال طوفان است.

مقایسه طیف‌ها نشان می‌دهد که پریود بیشینه در حین اوج گیری موج، افزایش پیدا کرده است (از ۵/۶ ثانیه به ۷/۷ ثانیه در طی ۳ ساعت)؛ اما در حین زوال تغییر چندانی نداشته است (از ۷/۷ ثانیه به ۸ ثانیه طی ۷ ساعت). همچنین اگرچه

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\beta \left(\frac{g}{U}\right)^4 \omega^{-4}\right] \quad (4)$$

که در آن $\beta=0.75$ ، $\alpha=0.081$ و U سرعت باد در ارتفاع ۱۹/۵ متر بالاتر از سطح آب است. در رابطه بالا فرکانس زاویه‌ای پیک برابر است با:

$$\omega_p = \left[\beta \left(\frac{g}{U}\right)^4 \frac{4}{5}\right]^{1/4} \quad (5)$$

و گشتاور صفرمین مرتبه برابر است با [۷].

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \frac{\alpha g^2}{5\omega_p^4} \quad (6)$$

بنابراین رابطه (۴) را می‌توان برحسب گشتاور مرتبه صفرم و فرکانس پیک به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$S(\omega) = 5 \left(\frac{m_0}{\omega_p}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-5} \times \exp\left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \quad (7)$$

رابطه فوق طیف موج دو پارامتری^۷ نامیده می‌شود که به‌طور گسترده‌ای در پروژه‌های دریایی استفاده می‌شود [۸].

مدل طیفی دیگری که با استفاده از معادله کلی (۳) به‌ازای مقادیر مختلف پارامترهای p و q به دست می‌آید، مدل نیومن^۸ است که به‌صورت زیر معرفی شد [۹]:

$$S(\omega) = 23.4 \left(\frac{m_0}{\omega_p}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-6} \times \exp\left[-3 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-2}\right] \quad (8)$$

همچنین کریلف^۹ و همکاران با استفاده از رابطه کلی (۳) مدل طیفی زیر را ارائه داد [۱]:

$$S(\omega) = 10.5 \left(\frac{m_0}{\omega_p}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-7} \times \exp\left[-1.75 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \quad (9)$$

۳-۲. تخمین طیف موج با استفاده از مدل‌های

پیرسون مسکوویچ و جانسواپ

با توجه به این که در محاسبه طیف امواج دریا، فرض بر این است که طیف موج فقط به‌وسیله باد ایجاد شده است، باید اندازه‌گیری در مکان و زمان‌هایی انجام شده باشد که موج به‌دوراز هر نوع عاملی به‌غیراز وزش باد باشد؛ بنابراین؛

مسئله اساسی این است که اصلاح ضرایب معادله‌های بالا با چه سازوکاری صورت گیرد. هدف، دستیابی به رابطه‌ای است که با دریافت H_s و ω_p و اختصاص مقادیر مناسب به پارامترهای A و B معادله طیف انرژی با بیشترین انطباق حاصل شود.

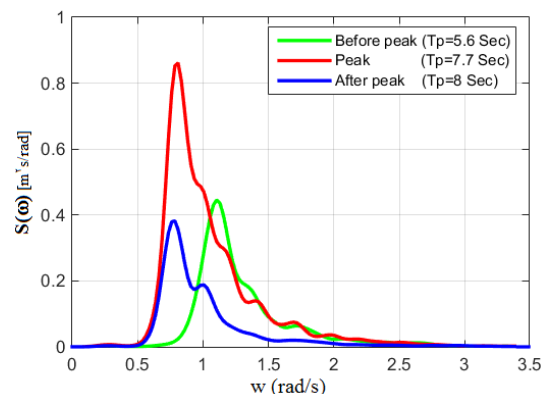
۴-۲. انتخاب رگرسیون و روش تخمین مناسب

در تحلیل‌های طیفی به منظور یافتن رابطه بین فرکانس و انرژی امواج از روش تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. تحلیل رگرسیون، تکنیکی آماری است که برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیرها به کار گرفته می‌شود. روش‌های مختلف تحلیل رگرسیونی وجود دارد که به کمک آن می‌توان انواع سیستم‌های خطی و غیرخطی را تحلیل نمود. الگوی رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق رابطه (۱۰) است که در آن ω متغیر مستقل، $S(\omega)$ متغیر وابسته و A و B ضرایب متغیر هستند. برای محاسبه این ضرایب روش کمترین مربعات^{۱۰} به کار گرفته شده است. در این روش متغیرها با شرط خطای حداقل که به صورت زیر است به دست می‌آیند:

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 = e_i^2 \quad (11)$$

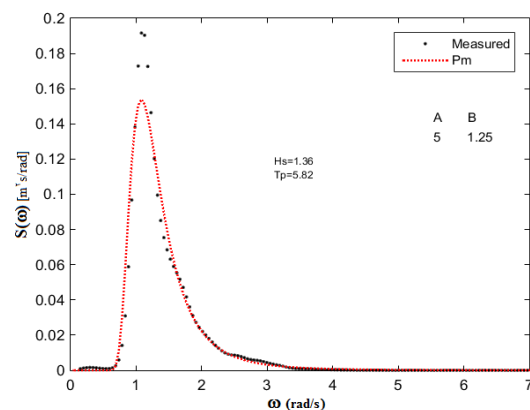
که در آن y_i مقدار مشاهده شده و y'_i مقدار تخمین زده شده با مدل است. تمامی این محاسبات با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. در ابتدای فرایند اصلاح ضرایب، مشاهده شد که بین طیف تخمینی و شکل طیف اصلی خطای بسیار زیادی وجود دارد و یا در مواردی امکان تخمین ضرایب طیفی برای داده‌های مفروض وجود ندارد. این مشکلات به این دلیل به وجود آمد که همه بازه فرکانسی در تحلیل رگرسیون در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقدار انرژی در فرکانس‌های بالا و پایین به صفر نزدیک می‌شود، در نظر گرفتن داده‌های این محدوده در محاسبات باعث می‌شود که تخمین طیف در بازه فرکانسی میانی که در بردارنده سهم بالای انرژی است کاهش یابد؛ بنابراین باید برای هر طیف، بازه‌ای وارد محاسبات شود که مقادیر انرژی در آن از صفر فاصله می‌گیرد (این بازه در همسایگی فرکانس بیشینه قرار دارد). طیف اصلاح شده برای یکی از

مقدار ارتفاع موج در زمان قبل و بعد از اوج به هم نزدیک است ولی پریودهای متناظر آن‌ها تفاوت بالایی دارند.



شکل ۶: طیف موج در مراحل مختلف طوفان

در ادامه قابلیت مدل پرسون-مسکوویچ (PM) در تخمین طیف امواج بررسی شده است. در شکل ۷ مقایسه یک نمونه از طیف‌های اندازه‌گیری شده با منحنی برازش داده شده با مدل PM ارائه شده است.



شکل ۷: تخمین طیف موج با استفاده از ضرایب پیش فرض مدل PM

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که خطای مدل در همسایگی فرکانس بیشینه بسیار بالا است ولی با دور شدن از قله طیف میزان خطا کمتر می‌شود؛ بنابراین به منظور انطباق بیشتر طیف تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده، مدل طیفی با ضرایب A و B به شکل زیر باید بهینه شود:

$$S(\omega) = A \left(\frac{m_0}{\omega_p} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-5} \times \exp \left[-B \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (10)$$

دارای پنج ضریب A ، B ، γ ، σ_a و σ_b به صورت زیر است که عملیات برازش باید روی آن‌ها انجام شود [۱۱]:

$$S(\omega) = A \left(\frac{m_0}{\omega_p} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-5} \times \exp \left[-B \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (13)$$

رابطه گفته شده مدل طیفی جانسواپ است.

به طریق مشابه مدل طیفی نیومن در رابطه (۸) در محاسبات مربوط به برازش منحنی به صورت زیر به کار گرفته شده است.

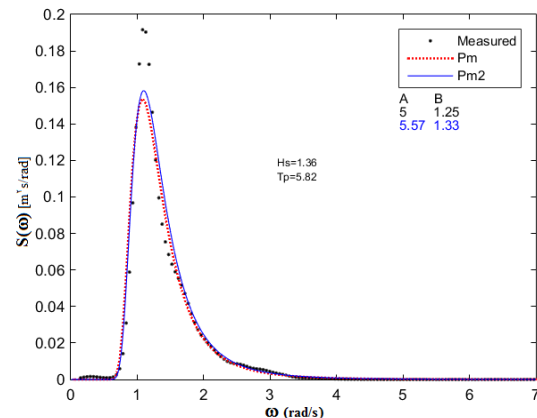
$$S(\omega) = A \left(\frac{m_0}{\omega_p} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-6} \times \exp \left[-B \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-2} \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (14)$$

همچنین مدل کریلف در رابطه (۹) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$S(\omega) = A \left(\frac{m_0}{\omega_p} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-7} \times \exp \left[-B \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (15)$$

لازم به یادآوری است که شاخص γ در دو حالت محاسبه شده است. در حالت اول به تبعیت از مدل جانسواپ مقادیر σ_a و σ_b ثابت در نظر گرفته می شوند، ($\sigma_a=0.07$ و $\sigma_b=0.09$) ولی در حالت دوم متغیر فرض شده اند. در شکل ۹ تأثیر γ در طیف انرژی در حالتی که پارامترهای σ_a و σ_b ثابت در نظر گرفته شده اند نمایش داده شده است و همان طور که مشاهده می شود طیف برازش داده شده در همسایگی فرکانس پیک در مقایسه با حالت قبل افزایش قابل توجهی داشته است و تقریباً بر داده های اندازه گیری منطبق گردیده است ولی در نقطه مربوط به قله، کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. در این شکل منحنی نقطه چین قرمز رنگ بیانگر مقدار طیف با ضرایب پیش فرض A و B است، منحنی آبی رنگ بیانگر مقدار طیف با ضرایب اصلاح شده و منحنی قرمز مربوط به زمانی است که ضریب γ اضافه شده است [۱۱].

رویدادها با منحنی آبی رنگ در شکل ۸ مشخص شده است. در شکل مقدار پیش فرض ضرایب A و B با رنگ مشکی و مقادیر بهینه شده با رنگ آبی مشخص شده است. همان طور که ملاحظه می شود در محدوده فرکانس بیشینه طیف برازش در مقایسه با حالت قبل اندکی افزایش یافته است ولی با مقدار اندازه گیری شده اختلاف زیادی دارد. برای حل این مشکل می توان از دو روش استفاده نمود. روش اول اعمال ضریب وزنی به مقدار خطاهای نقاط مختلف طیف است. به طوری که ضریب وزنی در همسایگی قله بیشترین مقدار را داشته باشد و با دور شدن از آن مقدار وزن اختصاص یافته به خطاها با نرخ مشخصی کم شود. توجه به این نکته ضروری است که این یک روش صرفاً ریاضی است.



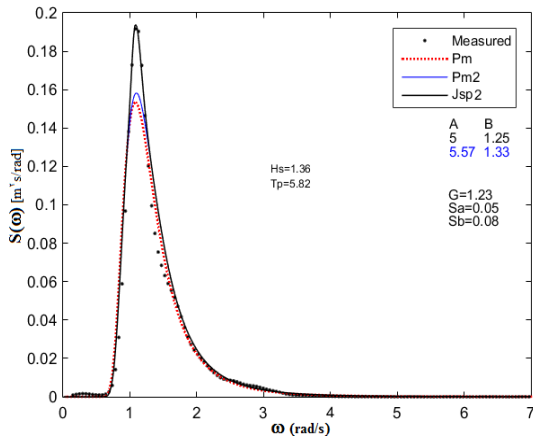
شکل ۸: تخمین طیف موج با استفاده از ضرایب بهینه شده در مدل PM

روش دو مضربی که تابع وزنی به صورت $\gamma \delta$ در معادله طیف است. این کار دقیقاً همان کاری است که در مدل طیف جانسواپ انجام شده است. δ تابعی از ω_p و σ به صورت زیر است [۱۰]:

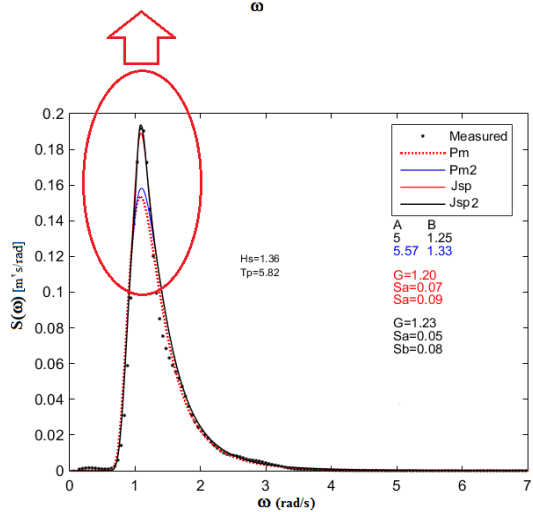
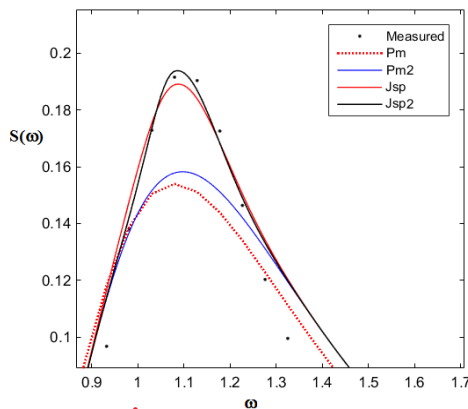
$$\delta = \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (12)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 \rightarrow \omega < \omega_p \\ \sigma_b = 0.09 \rightarrow \omega > \omega_p \end{cases}$$

پارامتر γ در ارتفاع قله طیف تأثیر می گذارد و پارامتر σ متشکل از دو پارامتر σ_a و σ_b (به ترتیب برای فرکانس های پایین تر و بالاتر از فرکانس بیشینه) است و ضخامت قسمت های چپ و راست طیف را کنترل می کند؛ بنابراین با توجه به توضیحات مطرح شده شکل نهایی معادله طیف



شکل ۱۰: تأثیر ضریب γ در تقویت قله (σ_a و σ_b متغیر)



شکل ۱۱: مقایسه دو حالت در محاسبه γ

۵-۲. نیکویی برازش

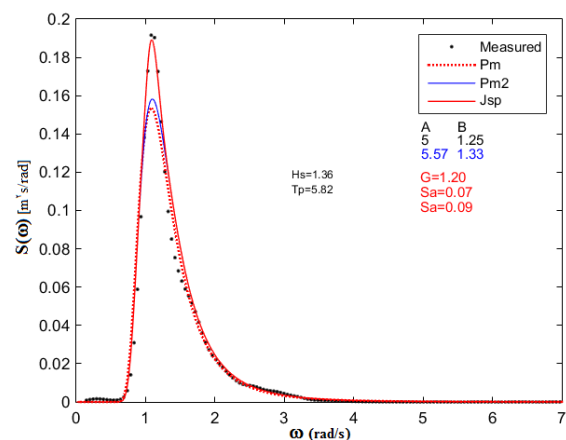
جهت ارزیابی عملکرد مدل طیفی شاخص‌های نیکویی برازش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها طوری انتخاب شده است که اطلاعات آماری در خصوص همخوانی داده‌های میدانی با مدل‌های طیفی را با ارائه میزان خطا و انطباق بین آن‌ها ارائه می‌دهد که عبارت‌اند از [۱۲]:

$$S_{se} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (16)$$

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص شده است به ازای $\gamma=1.2$ بیشترین برازش در ناحیه قله طیف حاصل شده است.

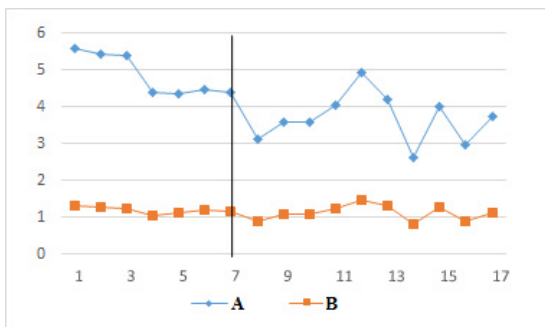
به منظور کنترل خطای ایجاد شده در قله طیف، شاخص‌های σ_a و σ_b به طور هم‌زمان با شاخص γ بهینه‌سازی شده‌اند، مشاهده شد که با به کارگیری این روش نتایج مطلوب‌تری به دست می‌آید، به طوری که، میزان خطا در قله طیف کاهش یافته است. این منحنی در شکل ۱۰ با رنگ مشکی نمایش داده شده است. همچنین مقادیر جدید γ ، σ_a و σ_b در شکل آورده شده است و مشاهده می‌شود که با مقادیر پیش فرض تفاوت دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بهینه‌سازی مقادیر σ_a و σ_b ، منحنی برازش داده شده در قله طیف انطباق بیشتری دارد.

در شکل ۱۱ دو حالت گفته شده در قسمت قبل مقایسه شده است. منحنی قرمز مربوط به زمانی است که σ_a و σ_b ثابت هستند و با شاخص Jsp نمایش داده شده‌اند و منحنی مشکی مربوط به زمانی است که این دو پارامتر متغیر فرض شده‌اند و با شاخص Jsp2 مشخص شده است. به منظور مقایسه دقیق‌تر دو منحنی، ناحیه مربوط به قله طیف در نمای بزرگ‌تر نمایش داده شده است، مشاهده می‌شود که با بهینه‌سازی پارامترهای σ_a و σ_b دقت مدل فقط در ناحیه قله طیف به میزان اندکی تغییر می‌کند و در سایر فرکانس‌ها بی‌تأثیر است؛ بنابراین استفاده از مقادیر پیش فرض این دو پارامتر دقت لازم برای انجام محاسبات را خواهد داشت.

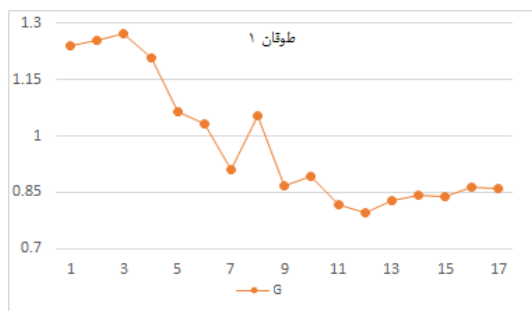


شکل ۹: تأثیر ضریب γ در تقویت قله (σ_a و σ_b ثابت)

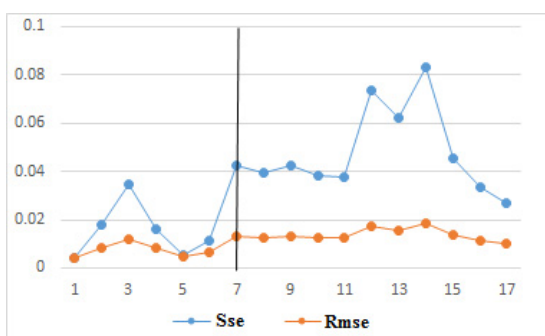
صفر میل می کند و مدل طیفی در تخمین این پدیده موفق بوده است، ولی در مرحله زوال طوفان برای این محدوده فرکانسی رفتار متفاوتی مشاهده می شود. این بازه فرکانسی با خط چین جدا شده است. همان طور که ملاحظه می شود، سهم انرژی طیف در این بازه در مقایسه با حالت های قبل بیشتر است. این پدیده ممکن است در اثر عوامل محیطی یا هر پدیده دیگر، که به نوعی نقش تأمین انرژی و یا انتقال انرژی به فرکانس های دیگر را داشته است رخ دهد و باعث تمرکز انرژی موج در فرکانس های بالاتر شود. این رفتارها با مدل های طیفی استاندارد که برای شرایط آرمانی معرفی شده اند قابل پیش بینی نخواهد بود بنابراین به خطا در محاسبات می انجامد. همچنین در جدول یک ضرایب طیفی به دست آمده با مقادیر پیش فرض آن مقایسه شده است.



شکل ۱۲: منحنی تغییرات ضرایب A و B



شکل ۱۳: منحنی تغییرات ضریب G



شکل ۱۴: منحنی شاخص های Sse و Rmse

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

$$R_{mse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (18)$$

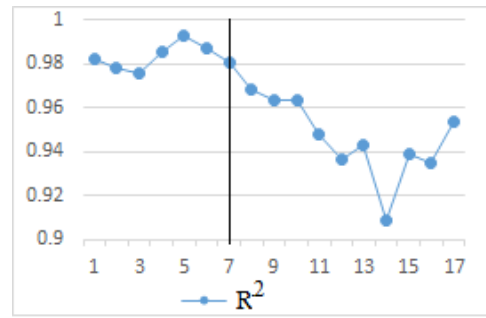
که در آن \hat{y}_i ، y_i و \bar{y} به ترتیب مقادیر تخمینی، مشاهده شده و میانگین است. در استفاده از این شاخص ها توجه به این نکته ضروری است که شاخص های S_{se} و R_{mse} بیانگر میزان خطای برازش است؛ بنابراین هر چه به صفر نزدیک تر باشد دقت برازش بالاتر خواهد بود. شاخص R^2 مقادیر بین صفر و یک را اختیار می کند و هر چه به یک نزدیک تر باشد، میزان برازش بیشتر است.

۳. نتایج

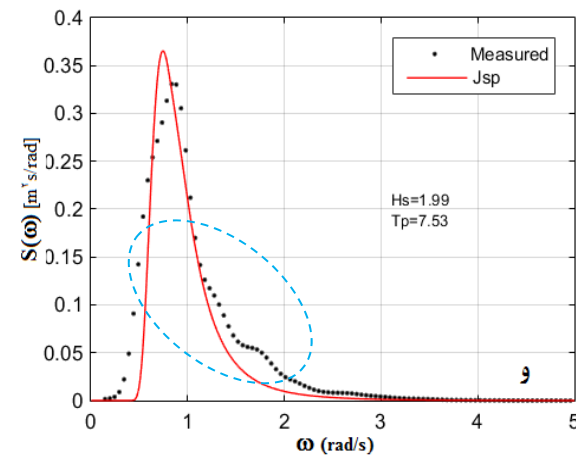
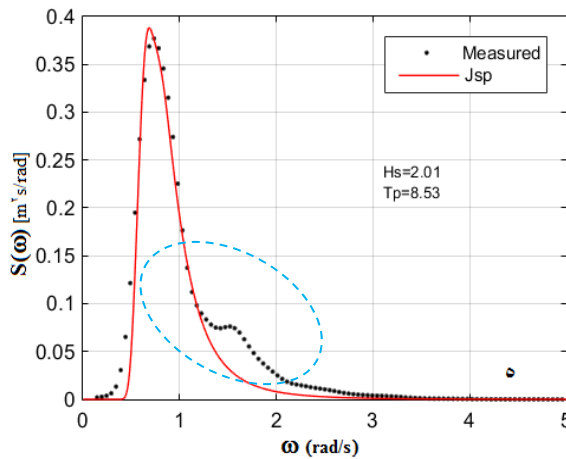
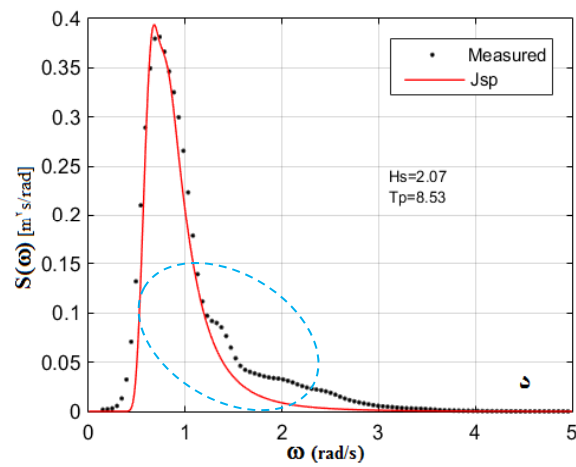
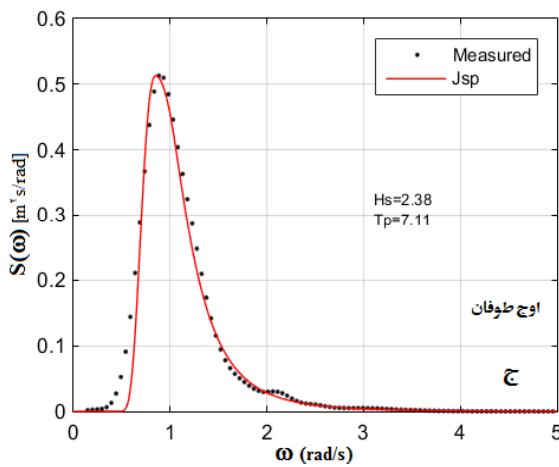
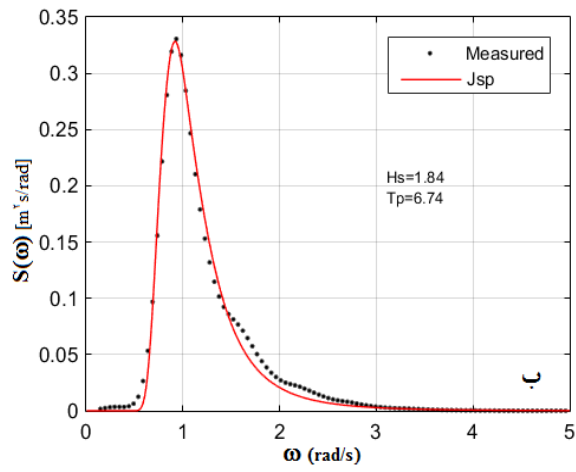
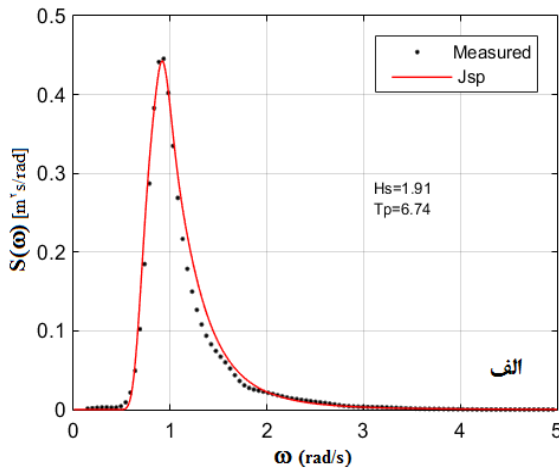
پس از انجام محاسبات طبق دستورالعمل گفته شده ضرایب مدل طیفی جانسواپ، معادله (۱۳)، با بیشترین برازش بر طیف اندازه گیری شده به همراه شاخص های آماری در ساعت های مختلف طوفان محاسبه شد و نتایج در شکل های ۱۲ تا ۱۵ ارائه شده است. در این شکل ها مرحله قبل و بعد از اوج طوفان با خط عمودی از هم تفکیک شده است. اگر به منحنی ضرایب A و B توجه کنیم مشاهده می شود که ضریب B در مقایسه با A نوسانات کمتری داشته است، همچنین اگر مقادیر این دو ضریب در قبل و بعد از اوج طوفان مقایسه شود، مشاهده می شود که نوسانات آن ها در قبل از اوج طوفان کمتر است. شاخص های خطا، S_{se} و R_{mse} ، بعد از اوج گیری به طور کلی افزایش یافته است؛ بنابراین با افزایش خطا همان طور که انتظار می رود شاخص R^2 کاهش می یابد. برای یافتن دلیل این پدیده لازم است رفتار طیف ها را در حین شکل گیری طوفان تا رسیدن به اوج و در نهایت زمانی که روبه زوال می رود بررسی شود. در شکل ۱۶ طیف موج در مراحل مختلف طوفان نمایش داده شده است. شکل ۱۶- الف و شکل ۱۶- ب مربوط به مرحله شکل گیری و رشد طوفان است. شکل ۱۶ ج مربوط به لحظه اوج طوفان و شکل ۱۶- د تا شکل ۱۶- و مربوط به زمانی است که طوفان رو به افول نهاده است. همان طور که مشاهده می شود در شکل های الف تا ج طیف اندازه گیری شده کاملاً تک قله ای است و در فرکانس های بیشتر از فرکانس پیک انرژی طیف با نرخ بالا به

جدول ۱: مقایسه ضرایب به دست آمده (فونت درشت) با مقادیر پیش فرض (فونت ریز)

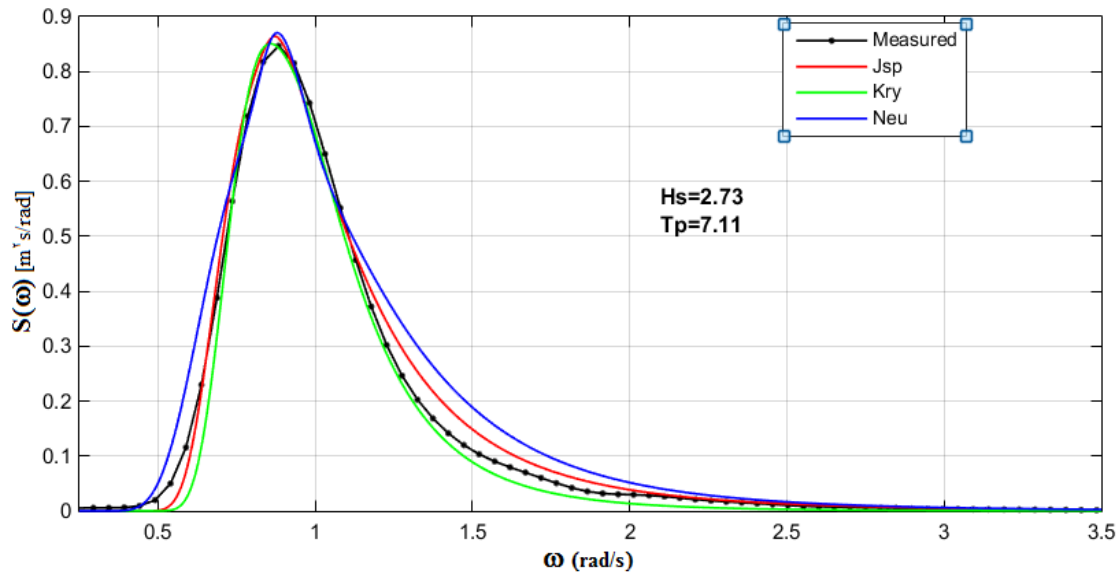
	Jsp	Kry	Neu
A	5 4.16	10.4 7.9	23.4 22.4
B	1.25 1.16	1.75 1.72	3 2.9



شکل ۱۵: منحنی شاخص R^2



شکل ۱۶: برازش طیف موج در مراحل مختلف طوفان



شکل ۱۷: مقایسه مدل‌های جانسواپ، کریلف و نیومن با طیف اندازه‌گیری شده

۳-۱. بررسی اثر پهنای طیف در نتایج

از شاخص‌های مهم طیف امواج دریا پهنای طیفی^{۱۲} آن است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (19)$$

این شاخص به عنوان معیاری از بی‌نظمی امواج بوده و تأثیر زیادی در رفتار و ویژگی‌های آن دارد؛ بنابراین بررسی نقش این پارامتر در نتایج مطالعات حائز اهمیت است. اثر پهنای طیف در محاسبات بیش از هر چیز در مساحت در منحنی ظاهر می‌شود، پس بدین منظور اختلاف مساحت بین طیف تخمینی و طیف اندازه‌گیری شده به صورت شاخص زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

$$\frac{\Delta A}{A_1} = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \quad (20)$$

که در آن A_1 مساحت زیر منحنی طیف مشاهده شده و A_2 مساحت در منحنی طیف مدل شده است. در شکل ۱۸ این شاخص برحسب پهنای طیف برای یکی از رویدادها به عنوان نمونه نمایش داده شده است. برای بررسی دقیق‌تر اثر پهنای طیف در دقت مدل‌ها، مقدار متوسط خطای مساحت تحت منحنی در بازه‌های $(\nu < 0.4)$ ، $(0.4 < \nu < 0.45)$ و $(\nu > 0.45)$

لازم به یادآوری است که به منظور مقایسه مدل جانسواپ با مدل‌های نیومن و کریلف محاسبات مشابهی برای معادله‌های (۱۴) و (۱۵) انجام شد. در شکل ۱۷ برآزش سه مدل جانسواپ، کریلف و نیومن با منحنی طیف اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان انطباق مدل‌ها در فرکانس‌های مختلف با هم تفاوت دارد. به طور کلی میزان خطای مدل‌ها در نیمه سمت راست طیف بیشتر از نیمه سمت چپ است. به عبارت دیگر، با مقایسه‌ی نیمه سمت راست و چپ طیف مشاهده می‌شود که در سمت چپ، مدل‌ها بر طیف اندازه‌گیری منطبق‌تر هستند. از طرفی در نیمه سمت راست بیشترین خطا مربوط به مدل نیومن و کمترین خطا مربوط به مدل کریلف است. نکته دیگری که در شکل مشاهده می‌شود این است که طیف‌های جانسواپ و نیومن در مقایسه با طیف اندازه‌گیری شده پهن‌تر هستند ولی طیف مربوط به مدل کریلف باریک‌تر است. بررسی سایر نتایج نشان داد که در بسیاری از مواقع خطای محاسبات به دلیل اختلاف پهنای بین طیف اندازه‌گیری با طیف مدل‌سازی شده است. به طوری که، در بعضی مواقع طیف مدل‌سازی شده پهن‌تر از طیف اندازه‌گیری و در مواقع دیگر باریک‌تر است؛ بنابراین شاخص پهنای طیف تأثیر زیادی در میزان دقت محاسبات دارد، بنابراین بررسی اثر آن بسیار مهم است.

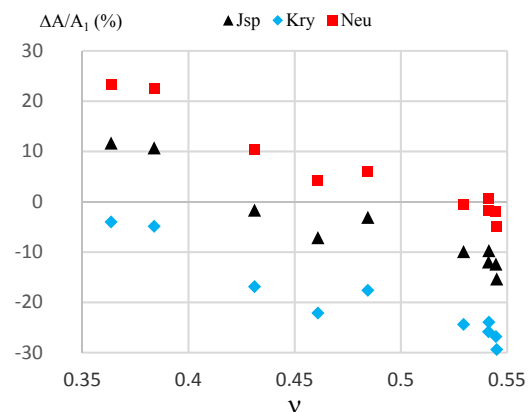
در مجاورت قله طیف همچنان خطا وجود دارد. به منظور رفع این مشکل از مدل طیفی جانسواپ استفاده شد و مشاهده شد که با ضرب پارامتر γ در مدل پیرسون-مسکوویچ دقت آن در نواحی قله افزایش یافته است. به منظور بررسی عملکرد سایر مدل‌های طیفی محاسبات مشابهی برای دو مدل نیومن و کریلف انجام و ضرایب بهینه‌ی آن استخراج شد. در مقایسه-ی ضرایب طیفی بهینه با مقادیر به دست آمده در مطالعات پیشین، نتایج زیر به دست آمد:

۱. در مدل جانسواپ متوسط ضرایب A و B به ترتیب ۴/۱۶ و ۱/۱۶ بوده است در حالی که مقادیر پیش فرض آن ۵ و ۱/۲۵ بوده است [۲]؛
۲. در مدل کریلف متوسط ضرایب A و B به ترتیب ۷/۹ و ۱/۷۲ بوده است در حالی که مقادیر پیش فرض آن ۱۰/۴ و ۱/۷۵ بوده است [۱]؛
۳. در مدل نیومن متوسط ضرایب A و B به ترتیب ۲۲/۴ و ۲/۹ بوده است در حالی که مقادیر پیش فرض آن ۲۳/۴ و ۳ بوده است [۹].

با توجه به نتایج یادشده کمترین اختلاف مربوط به ضرایب مدل نیومن بوده است و ضریب A در مدل کریلف بیشترین اختلاف را داشته است.

با بررسی نتایج و رفتار طیف‌های ثبت شده در فرکانس‌های مختلف، خطای ایجادشده در مدل‌های طیفی را به دودسته می‌توان تقسیم کرد که عبارت‌اند از: خطاهای ایجادشده در فرکانس‌های بالا و خطای ناشی از پهنای طیف. خطاهای فرکانس بالا به دلیل تمرکز انرژی در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس بیشینه، رخ می‌دهد. این رفتار در طیف چگالی انرژی امواج به صورت قله‌های کوچک در سمت راست قله اصلی دیده می‌شود و باعث می‌شود که شکل طیف از حالت تک قله‌ای خالص خارج شود. چنین پدیده‌هایی ممکن است در اثر عوامل محیطی یا هر عامل دیگری که نقش تقویت انرژی در فرکانس‌های بالا را دارد، رخ دهد. همچنین ممکن است عامل خارجی در کار نبوده باشد و در اثر فرایند داخلی مانند برهم کنش امواج، انرژی از فرکانسی به فرکانس دیگر

در جدول ۲ آورده شده است. با بررسی این جدول نتایج زیر حاصل می‌شود:



شکل ۱۸: خطای مساحت تحت منحنی طیف بر حسب پهنای آن

۱. در بازه $\nu < 0.4$ کمترین خطا به میزان ۴٪ متعلق به مدل کریلف است. در حالی که، مدل جانسواپ با خطای ۱۴٪ درصد در جایگاه دوم و مدل نیومن با خطای ۲۶٪ ضعیف‌ترین عملکرد را دارد؛
۲. در بازه $0.4 < \nu < 0.45$ کمترین خطا به میزان ۲٪ متعلق به مدل جانسواپ است؛
۳. در بازه $\nu > 0.45$ کمترین خطا به میزان ۴٪ متعلق به مدل نیومن است.

جدول ۲: متوسط خطای مساحت تحت منحنی در بازه‌های مختلف

طیف	$\nu < 0.4$	$0.4 < \nu < 0.45$	$\nu > 0.45$
Jsp	٪۱۴	٪۲	٪۱۰
Kry	٪۴	٪۱۷	٪۲۵
Neu	٪۲۶	٪۱۰	٪۴

۴. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا طیف امواج بندر امیرآباد با استفاده از مدل پیرسون-مسکوویچ تخمین زده و مشخص شد که این مدل طیفی دقت مطلوبی در پیش‌بینی طیف موج این منطقه ندارد بنابراین با استفاده از روش کمترین خطای مربعات ضرایب آن را بهینه‌سازی کرده و مشاهده شد که با این روش دقت مدل در نواحی فرکانس بالا و پایین افزایش یافته است ولی

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در خصوص عملکرد مدل جانسواپ در تخمین طیف موج بندر امیرآباد مشخص شد که بخشی از خطاهای ایجاد شده در فرکانس‌های بالا بوده است که در اثر تمرکز انرژی در این فرکانس‌ها رخ می‌دهد و از آنجا که مدل قابلیت پیش‌بینی چنین رفتارهایی در طیف امواج را ندارد، اجتناب‌ناپذیر است. همچنین پهنای طیف در عملکرد مدل‌ها بسیار مؤثر است، به طوری که دقیق‌ترین نتایج مدل جانسواپ برای طیف‌هایی مشاهده شد که پهنای آن در بازه $(0/4 < \nu < 0/45)$ قرار دارد. برای خارج از این بازه مدل جانسواپ عملکرد مطلوبی ندارد. برای طیف‌هایی که پهنای آن کمتر از $0/4$ است مدل کرلیف و برای طیف‌هایی که پهنای آن بیشتر از $0/45$ است، مدل نیومن بهترین عملکرد را دارد.

مراجع

- [1] Massel R. Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. 3rd ed. World Scientific Publishing; 2017.
- [2] Ochi MK. Ocean waves: the stochastic approach. Cambridge University Press; 2005 Jul 21.
- [۳] چگینی وحید، چگینی فاطمه، تائبی سهیلا. ارزیابی و مقایسه روش‌های نیمه تجربی و عددی در پیش‌بینی مشخصات امواج بندر امیرآباد و بوشهر. مهندسی دریا. ۱۳۷۸؛ ۴(۷): ۴۱-۵۷.
- [۴] دردی‌زاده بصیرآباد احمد، چگینی وحید، مهدی‌زاده، مهدی محمد، کامران‌زاد بهاره. بررسی انرژی امواج در بندر امیرآباد دریای خزر با استفاده از نتایج مدل SWAN. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۳؛ ۲(۱۳).
- [5] Olagnon M, Kpogo-Nuwoklo KA, Guédé Z. Statistical processing of West Africa wave directional spectra time-series into climatology of swell events. Journal of Marine Systems. 2014 Feb 1;130:101-8.
- [6] Pierson Jr WJ, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. Journal of geophysical research. 1964 Dec 15;69(24):5181-90.
- [7] Garcia-Gabin W. Wave bimodal spectrum based on swell and wind-sea components. IFAC-PapersOnLine. 2015 Jan 1;48(16):223-8.

منتقل شود. چنین رفتارهایی با مدل‌های طیفی استاندارد قابل پیش‌بینی نیست و باعث می‌شود که نتایج مدل‌ها در این فرکانس‌ها با خطا همراه باشد. اگر به طیف‌های انرژی در مرحله زوال طوفان دقت شود، مشاهده می‌شود که سهم انرژی امواج در فرکانس‌های بالا بیشتر از زمان قبل از اوج است. قبل از اوج طوفان انرژی امواج در این فرکانس‌ها با میزان بالایی کاهش می‌یابد و به صفر میل می‌کند ولی بعد از لحظه اوج طوفان، سطح انرژی در این فرکانس‌ها تقویت می‌شود و انرژی با میزان کمتری کاهش می‌یابد. چنانچه به سری زمانی ارتفاع موج در این طوفان دقت شود، مشاهده می‌شود که بعد از لحظه اوج، افزایش ارتفاع موج در بازه‌های زمانی کوتاه مدت رخ داده است که این پدیده می‌تواند عامل تقویت انرژی در فرکانس بالا باشد.

با مقایسه طیف‌ها و منحنی‌های برازش داده شده مشاهده شد که در بعضی از مدل‌ها طیف تخمین زده شده به طور کلی باریک‌تر یا پهن‌تر از طیف اندازه‌گیری شده است. خطاهای ناشی از اختلاف پهنای طیف به این معناست که در همه فرکانس‌ها خطا وجود دارد. با دقت به منحنی‌های برازش داده شده مشاهده شد که خطای مدل‌ها در نیمه سمت راست طیف در مقایسه با نیمه چپ بیشتر است. در مدل‌های استاندارد رفتار طیف در نیمه سمت راست یا محدوده تعادل^۳ با عبارت (ω^{-p}) که تأثیر زیادی در پهنای طیف نیز دارد کنترل می‌شود. درصد کاهش انرژی در ناحیه تعادل همواره از موضوعات قابل بحث بین محققان است. با توجه به نتایج مدل‌های جانسواپ و کرلیف طیف‌های پهن $(\nu > 0/45)$ را باریک‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند زیرا درصد اختلاف مساحت‌ها در رابطه ۱۶ منفی است، در حالی که خطای مدل نیومن در این بازه نزدیک به صفر است. از طرف دیگر مدل‌های جانسواپ و نیومن طیف‌های باریک $(\nu < 0/4)$ را پهن‌تر از مقدار واقعی آن تخمین می‌زند زیرا درصد اختلاف مساحت‌ها مثبت است. در حالی که خطای مدل کرلیف در این بازه حداقل مقدار است و در بازه‌های میانی $(0/4 < \nu < 0/45)$ کمترین درصد خطا مربوط به مدل جانسواپ است.

علائم اختصاری

جدول ۳: علائم و اختصارات

علامت اختصاری	کمیت
R	تابع خودهمبستگی
τ	لگ (تأخیر)
S	چگالی طیفی
ω	فرکانس زاویه‌ای
T_p	پیک پر بود
m_0	گشتاور صفرا
g	شتاب گرانش زمین
v	پهنای طیف
γ	شاخص تقویت قله طیف

- [8] Martzikos NT, Soukissian TH. Modelling of the sea surface elevation based on a data analysis in the Greek seas. Applied Ocean Research. 2017 Dec 31;69:76-86.
- [9] Hudspeth RT. Waves and wave forces on coastal and ocean structures: World Scientific; 2006.
- [10] Calini A, Schober CM. Characterizing JONSWAP rogue waves and their statistics via inverse spectral data. Wave Motion. 2017 Jun 30;71:5-17.
- [11] Myrhaug D. Some probabilistic properties of deep water wave steepness. Oceanologia. 2018 Apr 1;60(2):187-92.
- [12] Akdağ SA, Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. Energy conversion and management. 2009 Jul 1;50(7):1761-6.
- [13] Kumar VS, Singh J, Pednekar P, Gowthaman R. Waves in the nearshore waters of northern Arabian Sea during the summer monsoon. Ocean Engineering. 2011 Feb 1;38(2-3):382-8.

پی‌نوشت

- Pierson–Moskowitz spectrum
- Janswap spectrum
- SeaSurface elevation
- Auto-correlation function
- Wiener-Khintchine theorem
- Fast Fourier Analysis
- Tow parameter spectrum
- Naumann
- krylov
- Least Squares
۱۱. مقادیر مربوط به γ ، σ_a و σ_b در شکل‌ها به ترتیب با G ، S_a و S_b مشخص شده است.
- Spectral width
- Equilibrium range