روش مناسب جداسازی انرژی امواج محلی از امواج دورآ در طیف فرکانسی موج

زبیده علیاری [۱]، سید مصطفی سیادت موسوی [۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، zobeideh.aliyari@yahoo.com
[۲] استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، siadatmousavi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
موج محلی
موج دورآ
فرکانس پیک
فرکانس جداسازی
بویه

چکیده

مدل‌های طیفی امواج و یا اندازه‌گیری‌های دو بعدی طیف موج، توزیع انرژی امواج را در فرکانس‌ها و جهات مختلف مشخص می‌کند، در حالی که بیش‌تر اندازه‌گیری‌های طیف موج، غیر جهتی است. در این پژوهش، تفکیک انرژی امواج به دو بخش دورآ و محلی مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این روش‌ها برای طیف فرکانسی بدون جهت، و برخی برای طیف جهت‌دار موج قابل استفاده هستند. در این پژوهش، پس از معرفی روش‌های مختلف جداسازی، این روش‌ها برای یک سری داده‌ی اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض بر این است که روش دوبعدی، اطلاعات دقیق‌تری دارد و روش یک بعدی در بهترین صورت، می‌تواند نتایجی شبیه به آن را داشته باشد. بر اساس نتایج، روش‌های ارل و هوانگ فرکانس جداسازی را کم‌تر از واقع انتخاب می‌کنند. روش پرتیلا با وجودی که این مزیت را دارد که فرکانس جداسازی حتما یکی از مینیمم‌های طیف اصلی است، اما به نوسانات طیف وابستگی زیادی دارد.

Partitioning the Wave Spectrum into Wind Sea and Swell Components

Zobeideh Aliyari[1], Mostafa Siadatmousavi[2*]

[1] Master of Science Student, Civil Engineering School, Iran University of Science and Technology; zobeideh.aliyari@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Civil Engineering School, Iran University of Science and Technology; siadatmousavi@iust.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Feb. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Sea
Swell
Peak frequency
Separation frequency
Buoy

ABSTRACT

Wave models or two-dimensional measurements of wave spectrum, determine the distribution of wave energy over frequency and different directions. However most of spectrum measurements are not directional. In this study, we are planning to determine how much energy in waves comes from storms taken place in distant areas and old waves have reached the study areas (swells), and how much energy is from the transfer of energy from the local wind to the waves near the measuring device (wind sea). For separating wave spectrum into wind sea and swell components, several methods have been proposed. In this article, first we reviewed different methods of separation, and then all methods were evaluated for a set of measured data. Based on comparisons done in this study, we concluded that the Earle and Hwang methods underestimate separation frequency. As a result, swell wave height is underestimated and mean period of swell components is over-estimated by these methods. Although the method of Portilla intrinsically chooses one one of local minimum of spectrum as separation frequency, it seems that the method is highly dependent on spectrum noise.

۱ - مقدمه

از آنجا که طیف موج دریا از امواج محلی و دورآ تشکیل شده است، طیف انرژی موج اغلب دو یا چند حداکثر محلی (پیک طیفی) متناظر با منابع تولید مختلف را نشان می‌دهد. احتمال وقوع طیف با دو پیک در محدوده‌ی ۱۰٪-۳۰٪ است. بسته به شرایط دریا و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

محل‌های اندازه‌گیری، وقوع طیف دو پیک می‌تواند حتی بیشتر باشد [۱].

وجود همزمان امواج محلی و دورآ می‌تواند به طور قابل توجهی بر طراحی‌های سازه فراساحلی، عملکرد قایق‌های کوچک و عبور کشتی از ورودی به بندر، و پیش بینی شکست موج اثر بگذارد. شناسایی و جداسازی اجزای موجِ محلی و دورآ تصویر واقع‌بینانه‌تری از وضعیت دریا فراهم می‌کند و از اهمیت زیادی برای کاربردهای علمی و مهندسی برخوردار است. به طور خاص، در فرآیند کالیبراسیون مدل‌های موج، این مدل‌ها نوعاً امواج دورآ را کمتر از واقع و امواج محلی را بیشتر از واقع تخمین می‌زنند و بنابراین دوره‌ی تناوب پیک و متوسط به درستی برآورد نمی‌شوند [۲]. اگر کالیبراسیون براساس ارتفاع مشخصه‌ی حاصل از بخش موج محلی طیف و ارتفاع مشخصه‌ی حاصل از بخش موج دورآ انجام شود، این مشکل حل خواهد شد. بنابراین جداسازی طیف حاصل از مدل به دورآ و محلی برای مدل و داده‌های اندازه گیری، امکان کالیبراسیون دقیقتر مدل را فراهم می‌آورد. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌ها در هر یک از سیستم‌های موج، یکی از کاربردهای اصلی جداسازی طیف است که به صورت روزانه انجام می‌شود [۳]. همچنین نوعا امواج دورآ با انرژی به مراتب کمتر از امواج محلی، ممکن است دارای فرکانسی شبیه به فرکانس طبیعی سازه‌های نیمه شناور باشند و بنابراین اگر طراحی تنها بر اساس فرکانس غالب باشد، اثر امواج دورآ در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی که این امواج دورآ ممکن است موجب تشدید دینامیکی سازه شوند. همچنین بخش امواج ناشی از باد می‌تواند در تشدید سازه هایی از نوع سکو ثابت دریایی فعال باشد، و بنابراین معرفی دو دسته‌ی داده به عنوان ارتفاع موج و دوره‌ی تناوب برای امواج محلی و دورآ، دیدی واقعی‌تر برای طراحان چنین سکوهایی ایجاد خواهد کرد [۱]. در مطالعات اخیر هیدرودینامیکی موج مناطق متعددی از دنیا از این روش استفاده شده است. برای مثال مشخص کردن زمان‌هایی که امواج دورآ از محلی در هند قوی‌تر هستند [۴,۵]، یا تعیین رشد امواج ناشی از باد [۶]، یا استفاده از هم‌جوشی داده‌ها برای بهبود کیفیت پیش‌بینی مدل‌سازی‌های موج [۷] و شرایط هیدرودینامیکی اقیانوس آرام در نزدیکی کلمبیا [۸] اشاره کرد.

الگوریتم‌های جداسازی، یا بر روی طیف یک بعدی انرژی (طیف فرکانس و بدون اطلاعات جهت) و یا بر طیف دوبعدی (طیف جهت‌دار) اعمال می‌شوند. اگرچه روش دوبعدی اطلاعات بیش‌تری دارد و قاعدتاً مناسب‌تر است، اما معمولا داده‌های مورد نیاز آن‌ها در دسترس نبوده و بنابراین یافتن روش جداسازی یک‌بعدی مناسب در کاربردهای عملی بسیار راه‌گشا خواهد بود. در ادامه مروری بر الگوریتم‌های جداسازی یک بعدی و دو بعدی در بخش دوم و سوم ارائه می‌شود، و سپس داده‌های میدانی برای مقایسه‌ی روش‌های مختلف در بخش چهارم مورد استفاده قرار می‌گیرد، و جمع‌بندی مقایسه‌ها در فصل پنجم ارائه خواهد شد.

۲-روش جداسازی موج محلی و دورآ از طیف یک بعدی موج

الف) روش ارل [۹]

در این روش از این موضوع استفاده می‌شود که طیف پیرسون-مسکویچ بیانگر موج کاملا توسعه یافته‌ی موج است. فرکانس پیک، f_p، در این طیف بر حسب سرعت باد محلی، U_{10}، برابر است با:

$$f_p = \frac{1.25}{U_{10}} \qquad (۱)$$

فرکانس جداسازی امواج دورآ از امواج محلی که با f_s نشان داده می‌شود، اندکی کم‌تر از فرکانس پیک معرفی می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل شکل طیف که در فرکانس‌های قبل از پیک دارای شیب زیاد و در فرکانس‌های بعد از فرکانس پیک، دارای شیب کم است، نیازی به کاهش زیاد مقدار فرکانس پیک برای یافتن فرکانس جداسازی نیست. در این پژوهش مقدار آن را به شکل رابطه‌ی (۲) در نظر گرفتند که در آن C=0.8 پیشنهاد شده است.

$$f_s = C\, f_p \qquad (۲)$$

ب) روش مبتنی بر تابع تیزی ونگ و گیلهوسن [۹]

برای جداسازی موج محلی و دورآ با استفاده از طیف یک بعدی موج می‌توان طبق روش تیزی موج عمل کرد. ایده‌ی اساسی این است که تیزی موج محصول عدد موج و ارتفاع موج است، بنابراین سهم مولفه‌های موج دورآ به دلیل طول موج‌های بلندشان (اعداد موج کوچک) در تیزی موج تقریبا ناچیز است. برای جداسازی موج محلی-دورآ، تابع تیزی موج به عنوان نسبت ارتفاع موج H و طول موج L، انتگرال‌گیری شده از یک فرکانس اولیه‌ی انتخاب شده، تا حداکثر فرکانس طیف موج تعریف می‌شود. نشان داده می‌شود که پیک تابع تیزی موج بسیار نزدیک به پیک بخش موج محلی طیف است. با این تفاوت که تابع تیزی، بر خلاف تابع طیف انرژی موج، بسیار ملایم و فاقد نوسانات شدید است. با توجه به مطالب فوق، تابع تیزی به شکل زیر است:

$$\alpha(f) = \frac{H_S(f)}{L(f)} = \frac{2\pi H_S(f)}{g T_Z^2(f)} = \frac{8\pi m_2(f)}{g\sqrt{m_0(f)}} \qquad (۳)$$

که در آن فرض آب عمیق برای یافتن طول موج استفاده شده، و در ضمن:

$$m_n(f) = \int_{f_l}^{f_u} f'^n S(f')\, df' \qquad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

در رابطه‌ی (۴) منظور از f_l و f_u به ترتیب فرکانس حداقل و حداکثری است که طیف برای آن تعریف شده است. روابط ارتفاع موج در هر فرکانس $H_s(f) = 4\sqrt{m_0(f)}$ و پریود متوسط $T_{m02}(f) = \sqrt{m_0(f)/m_2(f)}$ در رابطه‌ی (۳) استفاده شده‌اند.

فرکانسی را که تابع تیزی در آن حداکثر می‌شود f_{m0} نامیده می‌شود. حالا فرکانس جداسازی بر اساس f_{m0} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_s = C\, f_{m0} \qquad (۵)$$

که پیشنهاد مولفان مقاله، استفاده از C=0.95 است.

جذابیت این روش به این دلیل است که تابع تیزی به مراتب آرامتر از طیف انرژی موج تغییر می‌کند و می‌تواند به راحتی برای یافتن ماکزیمم و مینیمم آن اقدام کرد.

ج) روش مبتنی بر تابع تیزی ونگ و هوانگ [۱]

در روش پیشنهادی ارل فرکانس جداسازی با سرعت باد به طور معکوس وابسته است [۹]، و رابطه بر اساس طیف پیرسون-مسکویچ است. در روش ونگ و گیلهوسن نیز تابع تیزی تعریف شد و فرکانس پیک آن به صورت f_{m0} معرفی گردید که بر اساس آن فرکانس جداسازی تعریف گردید. در این پژوهش، ابتدا تابع تیزی برای طیف پیرسون-مسکویچ به کار برده شد، و مقدار فرکانس پیک آن تعیین شد. در ادامه برای سرعت باد و فرکانس f_{m0} به دست آمده برای طیف پیرسون-مسکویچ رابطه‌ای رگرسیونی به شکل $U_{10} = a f_{m0}^b$ برازش داده شد. پس فرض شد مرز بین امواج محلی و دورآ جایی است که سرعت باد با سرعت فاز موج (C_s) برابر شود، زیرا امواج محلی با سرعتی کم‌تر از باد بوده و تحت اثر آن هستند، پس $C_s = U_{10}$. از طرفی در آب عمیق نیز مقدار $C_s = \frac{g}{2\pi f_s}$ است. با ترکیب این روابط خواهیم داشت:

$$f_s = A\, f_{m0}^B \qquad (۶)$$

که بر اساس رگرسیون انجام شده، مقادیر A=4.112 و B=1.746 به دست آمده است. مزیت این روش این است که برای یافتن فرکانس جداسازی، نیازی به دانستن سرعت باد نیست.

د) روش مبتنی بر تابع تیزی گیلهوسن و هروی [۱۱]

در این پژوهش، فرکانس جداسازی به صورت زیر تغییر داده شد

$$f_s = \max(0.75 f_{m0}, 0.9 f_{p_{PM}}) \qquad (۷)$$

که در آن مقدار f_{m0} پیک تابع تیزی است و f_{pPM} در رابطه‌ی (۱) معرفی گردید.

ه) روش انتگرالگیری طیفی هوانگ و همکاران [۱۲]

روش معرفی شده در بخش(ج) در سرعت‌های باد کم چندان خوب جواب نمی‌دهد [۱۳]. برای رفع این مشکل، ابتدا این روش مورد تحلیل قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که فرض $\frac{C_s}{U_{10}} = 1$ برای امواج جوان مناسب نیست و این عدد می‌تواند تا حدود ۰/۳کاهش یابد. همچنین طیف مورد استفاده برای آن، در بخش فرکانس‌های زیاد (بخش تعادلی طیف) به فرم f^{-5} کاهش می‌یابد در حالی که تحقیقات جدید نشان داده است که فرم f^{-4} شکل طیف را بهتر توصیف می‌کند [۱۴] (رابطه‌ی۱۳را ببینید). برای چنین توابعی از طیف، تابع تیزی ممکن است بیش از یک پیک داشته باشد.

بنابراین برای رفع مشکل، تابعی به فرم زیر تعریف گردید

$$I_b = \frac{\int f'^2 \frac{S(f')}{f'^b} df'}{\sqrt{\int \frac{S(f')}{f'^b} df'}} \qquad (۸)$$

توجه کنید که تابع معرفی شده در رابطه‌ی بالا به نوعی تعمیم یافته‌ی تابع تیزی است، و به ازای b=0 شکل تعریف شده تنها ضریب عددی با تابع تیزی تفاوت دارد. فرکانس پیک تابع معرفی شده در رابطه‌ی بالا به صورت f_{mb} معرفی گردید. سپس با استفاده از طیف دانلن و همکاران [۱۵] و یک مولفه‌ی موج دورآ با تابع گوسی، مشخص شد برای جداسازی، استفاده از b=1 بهترین نتیجه را می‌دهد و با استفاده از رگرسیون، رابطه‌ی فرکانس جداسازی مناسب به صورت زیر به دست آمد:

$$f_s = 24.2084\, f_{m1}^3 - 9.2021\, f_{m1}^2 + 1.8906\, f_{m1} - 0.0486 \qquad (۹)$$

و) روش جداسازی مبتنی بر حذف پیک‌های غیراصلی پرتیلا [۱۳]

در این روش چهار شرط مشخص می‌شود تا پیک‌های غیراصلی حذف شود:

۱) همه‌ی پیک‌هایی که در بخش فرکانس بالای طیف هستند به حساب نویز در بخش امواج محلی گذاشته می‌شود. برای این منظور پیک‌ها از فرکانس مشخصی (در محدوده‌ی ۰/۳۵-۰/۴ هرتز به بالا در نظر گرفته نمی‌شوند)

۲) بخش‌هایی با انرژی کم حذف می‌شوند. برای این منظور اگر انرژی اختصاص یافته به یک پیک بین ۵ تا ۸ درصد انرژی کل باشد، این پیک نویز تلقی می‌شود.

۳) همچنین اگر در گسسته‌سازی فرکانسی طیف، فقط تعداد محدودی بازه‌ی فرکانس به یک پیک اختصاص یابد این پیک نویز محسوب می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

۴) چون حداکثرهای اصلی قرار است باقی بماند، بنابراین اگر یک حداکثر بین دو حداکثر دیگر قرار گیرد و مقدار آن از هر دو همسایه‌اش کمتر باشد، این پیک حذف می‌شود.

به نظر می‌رسد اگر طیف دچار نویز زیادی باشد، شرط ۲ سبب شود که سیستم موجی که طیف پهنی داشته باشد و دارای نوسان زیادی باشد و هر بخش آن چند درصد باشد کلاً حذف شود هر چند در مجموع بیش از حتی ۱۰ درصد انرژی را نیز داشته باشد. بنابراین در این شرایط باید شرط ۲ را با حداقل انرژی کمتری به کار برد.

برای شناسایی امواج محلی یا دورآ از پیک‌های نهایی نیز یک روش پیشنهاد شده است که در آن مقدار انرژی طیف متناظر با فرکانس‌های حداکثری محاسبه می‌شود (با قرار دادن α_{PM}=0.0081 و f=f_p و γ=1 در رابطه‌ی طیف جانسواپ). بنابراین مقدار انرژی طیف پیرسون–مسکویچ برابر خواهد بود با:

$$S_{PM}(f_p) = \alpha_{PM}\frac{g^2}{(2\pi)^4}f_p^{-5} \qquad (۱۰)$$

اکنون ضریب تیز شدگی پیک به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\gamma = \frac{S(f_p)}{S_{PM}(f_p)} \qquad (۱۱)$$

انتظار این است که این ضریب برای امواج دورآ خیلی کمتر از یک و برای امواج محلی بزرگتر از یک باشد.

۳–روش جداسازی موج محلی و دورآ از طیف دوبعدی موج

الف) روش جداسازی طیف به روش هنسن و فیلیپس[۶]

وقتی باد برای مدتی در یک جهت تقریباً ثابت بوزد، به تدریج امواج بلندتری توسط این باد ایجاد می‌شود. بر اساس رابطه‌ی پراکنش خطی می‌توان نتیجه گرفت که سرعت فاز امواج در حال افزایش است. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که سرعت فاز به سرعت باد برسد، و در این شرایط دیگر باد به افزایش سرعت فاز کمکی نمی‌کند.

در صورتی که باد و موج هم جهت نباشند و با هم زاویه‌یδ بسازند، مولفه‌ی باد در جهت موج موجب رشد موج خواهد بود و بنابراین سرعت فاز موج با مولفه‌ی باد در جهت موج باید مقایسه گردد. بر طبق پیشنهاد پژوهشگران این مقاله، پیک طیف در بخش امواج محلی در محدوده‌ای از طیف فرکانس–جهت برقرار است که رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$C_p = 1.5\ U_{10}\cos\delta \qquad (۱۲)$$

ضریب ۱/۵ در رابطه‌ی (۱۲) در واقع برای اطمینان از لحاظ شدن همه‌ی امواج محلی است.

اشکال رابطه‌ی فوق این است که برای امواج دورآی جوان، که تازه از تاثیر باد رها شده‌اند (برای مثال به خاطر تغییر جهت باد)، این رابطه برقرار است و این امواج جزء امواج محلی شمرده می‌شوند.

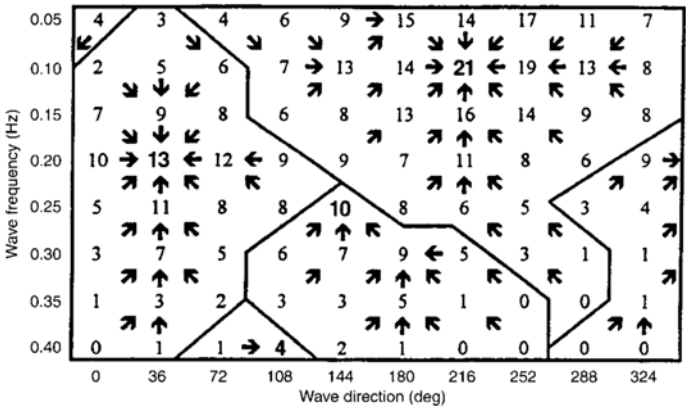
برای رفع این مشکل، و جداسازی امواج دورآی جوان و امواج محلی، پیشنهاد این پژوهشگران استفاده از رابطه‌ی تعادل دینامیکی طیف در فرکانس‌های زیاد است که توسط فیلیپس بیان شد [۱۴]. بر طبق این رابطه، در فرکانس‌های بین f_p تا $3f_p$ فرآیند انتقال انرژی از باد به موج، اندرکنش غیرخطی امواج و زوال انرژی در تعادل بوده و طیف به شکل تعادلی زیر می‌رسد:

$$S(\omega) = \alpha u_* g \omega^{-4} \qquad (۱۳)$$

که در آن، α مقادیری بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۱۱ دارد، و سرعت اصطکاکی u_* از ضرب ضریب پسا (Drag) در U_{10} به دست می‌آید. برای ضریب پسا می‌توان از رابطه‌ی وو استفاده کرد [۱۶]. در این صورت، موج دورآی جوان دارای مقدار انرژی طیفی کمتری از رابطه‌ی فوق خواهد بود.

ب) روش جداسازی طیف به روش جدید هنسن و فیلیپس [۱۷]

برای جداسازی، ابتدا طیف به بخش‌های مجزا تقسیم می‌شود. برای این کار ابتدا مشخص می‌شود که شیب صعودی حداکثر برای هر نقطه در فضای فرکانس–جهت به کدام سمت است. این نقطه به آن جهت متمایل خواهد شد. به این ترتیب مجموعه‌ای از نقاط به هر پیک محلی متمایل می‌شوند. شکل زیر این بخش را که در واقع جداسازی پیک‌ها و حوزه‌ی هر یک است نشان می‌دهد.



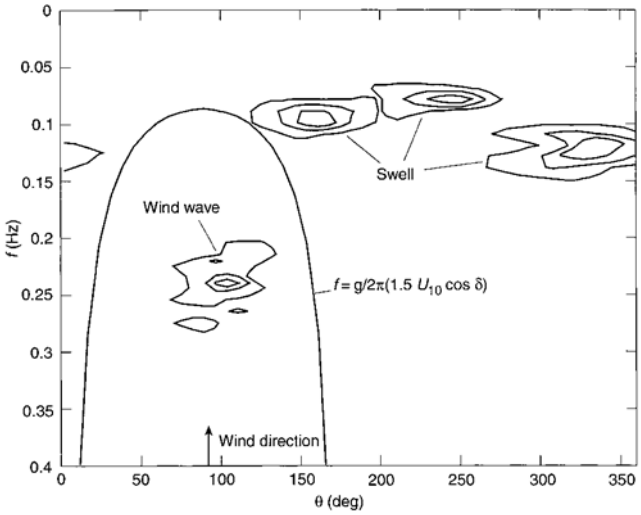
شکل ۱- توزیع انرژی در طیف موج جهت‌دار، افرازهای آن و نیز محل ماکزیمم‌های نسبی [۱۷]

گام دوم شناسایی مولفه‌های امواج محلی است (با همان رابطه‌ی ۱۲). البته یک شرط نیز اعمال شده است که زاویه‌ی باد و موج بین صفر و نود درجه است. سپس همه‌ی مولفه‌های موج محلی با هم ترکیب می‌شود زیرا بیش از یک موج محلی در هر لحظه وجود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

ندارد. شکل ۲ یک نمونه طیف با پیک‌های متعدد را نشان می‌دهد، و بخش مربوط به امواج محلی با یک سهمی مشخص شده است.



شکل۲- توزیع انرژی در طیف موج جهت دار، افرازهای آن و منطقه‌ی مشخص شده برای امواج محلی [۱۷]

گام سوم در مورد ترکیب امواج دورآ با هم است. در صورتی که بیش از یک سیستم دورآ وجود داشته باشد، لازم است پیک آن‌ها به اندازه‌ی کافی از هم متفاوت باشد تا دو سیستم متفاوت شناخته شوند. از آن‌جا که در این پژوهش، شناسایی سیستم‌های امواج دورآ مد نظر نیست، بنابراین شروط ادغام امواج دورآ در این‌جا ارائه نشده، و خواننده برای اطلاعات بیش‌تر می‌تواند به مرجع [۱۷] مراجعه کند.

ج) روش جداسازی طیف به روش هنسن و ینسن [۱۸]

تفاوت‌های این روش با روش معرفی شده در بخش قبلی اندک بوده و شامل موارد زیر می‌شود:

ابتدا برای افزایش سرعت الگوریتم، با استفاده از یک فیلتر ۸نقطه‌ای به نام hmaxima در MATLAB، حداقل نوسانات مشخص شده از کل طیف از بین می‌رود. همچنین برای یافتن نقاط حداکثر، از الگوریتم‌های توسعه یافته و بهینه برای یافتن حوزه‌ی آبریز استفاده می‌شود. برای این کار، کل طیف در منهای یک ضرب شده و اکنون مهم این است که نقاط حداقل، که همان جایی است که در مسئله‌ی حوزه‌ی آبریز، آب در آن جمع می‌شود پیدا شود.

همچنین شرایط ادغام امواج دورآ اندکی تغییر کرده است که برای مطالعه‌ی حاضر اهمیتی ندارد.

۴-بررسی روش‌ها و اعمال آنها بر چند طیف

در مطالعه‌ی حاضر جداسازی موج محلی و دورآ مد نظر است، بنابراین طیف دوبعدی توسط روش ج بخش دوبعدی جداسازی می‌شود و مقادیر ارتفاع موج و دوره‌ی تناوب را برای هر بخش طیف تعیین می‌شود. سپس با روش‌های یک بعدی نیز طیف را تحلیل شده و بررسی می‌شود که کدام روش جواب نزدیک‌تری به جواب حاصل از طیف دوبعدی می‌دهند.

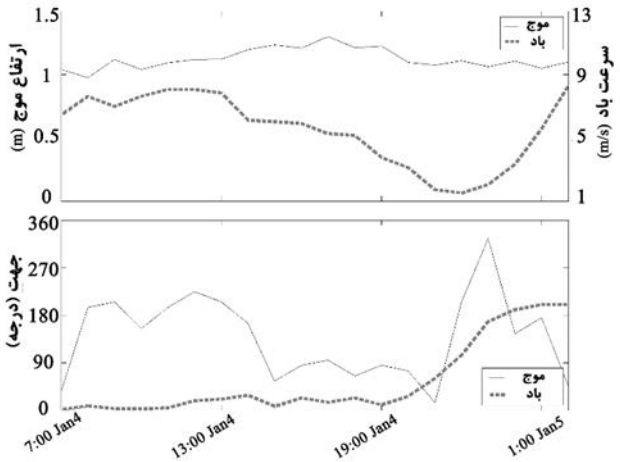
داده‌های مورد استفاده

داده‌های برداشت شده مربوط به بویه‌ی ۴۱۰۱۳ است و داده‌ها از سایت NDBC دانلود شده است. مشخصات این بویه مطابق جدول ۱ است:

جدول ۱-مشخصات بویه ۴۱۰۱۳ برای برداشت داده‌ی طیفی موج

موقعیت	۷۷°۴۴'۳۵'' غربی، ۳۳°۲۶'۱۱'' شمالی
ارتفاع بادسنج	۵ متر بالاتر از تراز محل
عمق آب	۲۳متر

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است ارتفاع موج در طول مدت مورد مطالعه حدود ۱ متر باقی مانده است. البته سرعت باد در ابتدا کاهش یافته و از حدود ۷ متر بر ثانیه به کم‌تر از ۲ متر بر ثانیه می‌رسد. بنابراین با گذشت زمان، انتظار داریم نقش موج محلی در این مدت کاهش یابد. از ساعت ۲۱:۰۰ روز چهارم ژانویه به ناگاه سرعت باد افزایش می‌یابد و به نظر می‌رسد باید موج محلی نیز شروع به رشد کند. این امر از نزدیک شدن جهت موج غالب به جهت باد در بخش پایینی شکل نیز مشخص می‌شود.

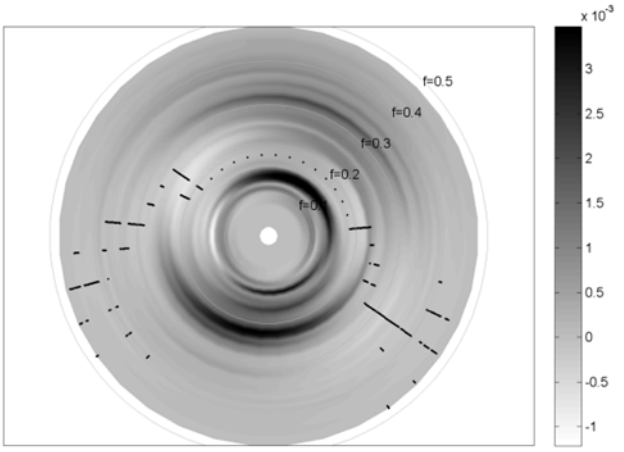


شکل۳- بخش بالایی سرعت باد و ارتفاع مشخصه ی موج و شکل پایینی سری زمانی جهت باد و جهت موج غالب را برای بازه‌ی زمانی ساعت ۷:۰۰ چهارم ژانویه تا ۲:۰۰ پنجم ژانویه سال ۲۰۰۶ نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

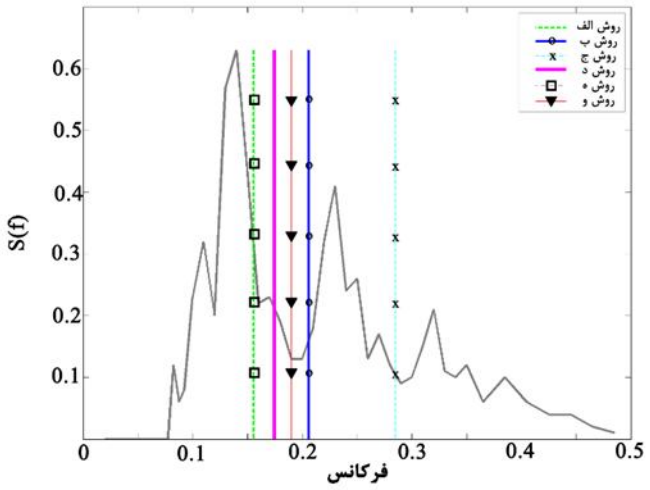
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

شکل ۴ طیف دوبعدی جداسازی شده توسط روش دوبعدی را برای ساعت ۷:۰۰ چهارم ژانویه سال ۲۰۰۶ برای بویه‌ی ۴۱۰۱۳ نشان می‌دهد. مشخص است که یک سیستم موج شمالی با فرکانسی حدود ۰/۱۲ هرتز و یک سیستم موج جنوبی با فرکانسی حدود ۰/۲۲ هرتز در بخش امواج دورآ قرار گرفته‌اند. باد محلی که از جهت شمال می‌وزد نیز موجی با فرکانس حدود ۰/۳۲ هرتز تولید کرده است.



شکل۴-طیف دوبعدی انرژی موج بر حسب m^2s. نقطه‌چین‌ها جداسازی دو سیستم موج به روش دوبعدی است

در شکل ۵ فرکانس جداسازی در همین ساعت ۷:۰۰ روز چهارم ژانویه توسط هر یک از روش‌های یک بعدی ارائه شده در بخش ۲ را می‌بینید. همانطور که مشخص است طیف دارای دو بخش است، یکی محدوده‌ی حدود ۰/۱۳ هرتز که معرف امواج دورآ است که از تحت تاثیر باد رها شده‌اند و یکی محدوده‌ی فرکانسی حدود ۰/۲۲ هرتز که از تحلیل شکل ۴ می‌دانیم معرف سیستم دورآی دیگری است، و محدوده‌ی طیفی پهن‌تری که حدود فرکانس ۰/۳۲ هرتز است و مربوط به امواج محلی تحت تاثیر مستقیم باد هستند. به نظر می‌رسد روش ونگ و هوانگ (روش ج) بهترین نتیجه را در این شرایط دارد ولی سایر روش‌ها فرکانس جداسازی را بین دو سیستم دورآ پیش‌بینی کرده‌اند.

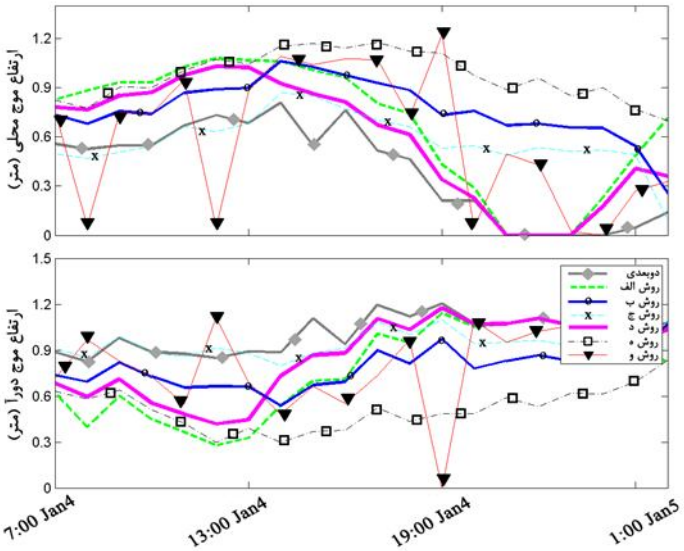


شکل۵- طیف یک بعدی انرژی موج در ساعت ۷:۰۰ روز چهارم ژانویه ۲۰۰۶، و فرکانس جداسازی به شش روش معرفی شده‌ی یک بعدی

در شکل‌های۶ تا ۸، سری زمانی ارتفاع موج، دوره‌ی تناوب غالب، و دوره‌ی تناوب میانگین هر یک از بخش‌های موج دورآ و محلی از روش‌های یک بعدی و دوبعدی مقایسه شده است. در شکل ۶ مشخص است که روش هوانگ و همکاران (روش ه) ارتفاع موج مشخصه‌ی بخش محلی را زیاد و دورآ را کم برآورد کرده است. روش پرتیلا (روش و) بسیار پرنوسان بوده و همانند اکثر روش‌ها، ارتفاع موج محلی را بیش از اندازه برآورد کرده است. روش ونگ و هوانگ (روش ج) نتایج مناسبی برای ساعات ابتدایی این سری از داده‌ها دارد ولی ساعات انتهایی که سرعت باد کاهش یافته، انتظار می‌رفت ارتفاع موج محلی کاهش بیش‌تری داشته باشد ولی این کاهش در این روش دیده نشده است. روش ونگ و گیلهوسن (روش ب) نیز ارتفاع موج محلی را بیش از اندازه برآورد کرده است. در دو روش ارل (روش الف) و گیلهوسن و هروی (روش د) دینامیک امواج محلی، به خصوص کاهش موج محلی با کاهش سرعت باد در ساعات انتهایی دوره، به خوبی دیده شده، ولی به طور کلی اندکی ارتفاع موج محلی را بیش از اندازه برآورد کرده‌اند. بنابراین از میان این روش‌ها، به نظر روش گیلهوسن و هروی سری زمانی ارتفاع موج را شبیه‌تر از سایر روش‌ها به روش دوبعدی تخمین شده است.

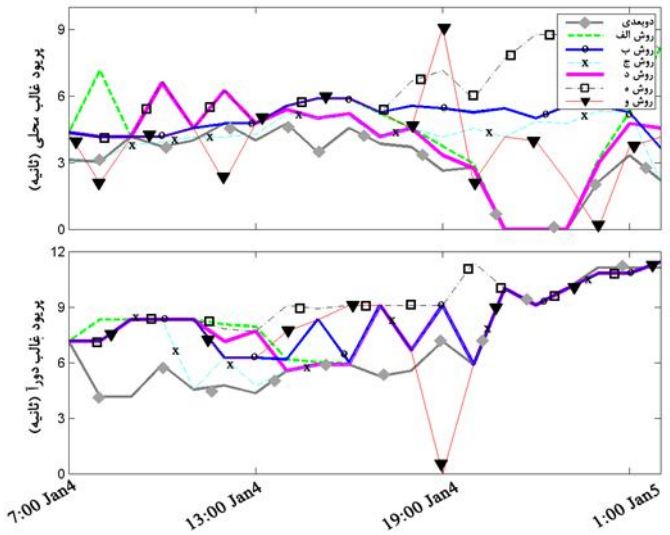
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]



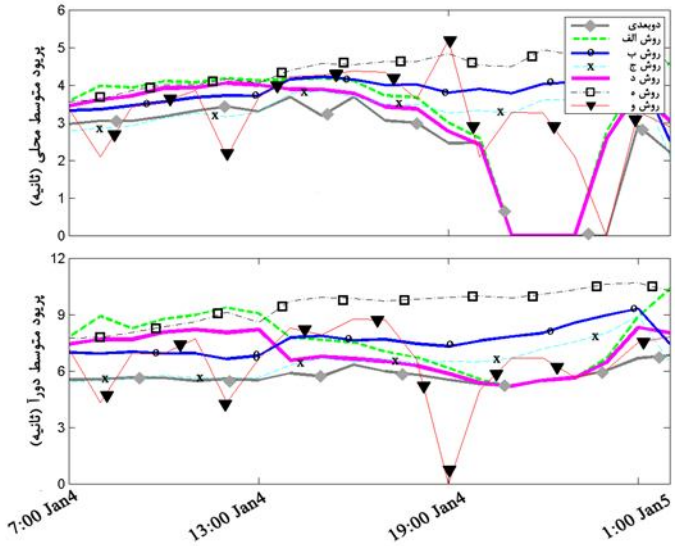
شکل۶- ارتفاع موج محلی (بخش بالایی) و دورآ (بخش پایینی) از روش‌های مختلف برای بویه‌ی ۴۱۰۱۳ و ۲۰ ساعت مورد مطالعه در ژانویه‌ی ۲۰۰۶

در شکل ۷ مشخص است که در بخش ابتدایی دوره، روش ونگ و هوانگ و روش ونگ و گیلهوسن برای بخش محلی خوب کار کرده است ولی تقریبا هیچ روشی در بخش دورآ موفق نبوده است. در بخش دوم، روش ارل و روش گیلهوسن و هروی برای موج محلی موفق بوده‌اند و کمابیش همه‌ی روش‌ها به خوبی پریود بخش دورآ را برآورد کرده‌اند.



شکل۷- پریود غالب محلی (بخش بالایی) و دورآ (بخش پایینی) از روش‌های مختلف برای بویه‌ی ۴۱۰۱۳ و ۲۰ ساعت مورد مطالعه در ژانویه ۲۰۰۶

در شکل ۸ مشخص است که در بخش ابتدایی دوره، تقریبا تمامی روش ها برای بخش محلی خوب کار کرده است و در بخش دورآ روش ونگ و هوانگ موفق بوده است. در بخش دوم، روش ارل و روش گیلهوسن و هروی برای موج محلی و دورآ موفق بوده‌اند و به خوبی پریود متوسط را برآورد کرده‌اند.



شکل۸- پریود متوسط محلی (بخش بالایی) و دورآ (بخش پایینی) از روش‌های مختلف برای بویه‌ی ۴۱۰۱۳ و ۲۰ ساعت مورد مطالعه در ژانویه ۲۰۰۶

لازم به ذکر است روش پرتیلا تنها روش از این میان است که با مقادیر پیشنهادی خود مقاله انجام نشده و اندکی تغییر در پارامترهای کالیبره کردن آن لازم بود تا برای این داده‌ها قابل استفاده باشد. باز به نظر می‌رسد با وجود تمام تغییرات، مانند کاهش عدد گامای جداسازی از ۱ تا حدود ۰/۳، مینیمم انرژی قابل قبول برای افرازها از ۰/۰۵ تا ۰/۰۳ انرژی کل، باز هم به نظر می‌رسد نوسانات این روش زیاد است.

۵-نتیجه‌گیری

اگرچه برای ابراز نتیجه‌ی قطعی، نیاز به داده‌های بسیار بیشتری است، اما بر اساس مقایسه‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که روش ارل و روش هوانگ و همکاران فرکانس جداسازی را کم انتخاب می‌کند و بنابراین موجب می‌شود ارتفاع امواج دورآ کم و زمان تناوب مولفه‌ی دورآ زیادتر از واقع باشد. روش پرتیلا به نظر می‌رسد این مزیت را دارد که فرکانس جداسازی حتما یکی از مینیمم‌های طیف اصلی است، اما به نظر می‌رسد به نوسانات خود طیف وابستگی زیادی دارد و بنابراین پارامترهای موج نظیر ارتفاع موج و دوره‌ی تناوب غالب و میانگینی که از این روش به دست می‌آید نوسانات زیادی دارد. همچنین شرط $\gamma=1$ برای جداسازی امواج محلی و دورآ به نظر چندان شرط دقیقی به حساب نمی‌آید. ضمن اینکه انرژی حداقل مولفه‌ها گاهی تا حدود ۳ درصد انرژی کل لازم است کم شود تا فرکانس جداسازی مناسبی به دست آید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]

به طور کلی در بین روش‌های مورد بررسی، روش ونگ و هوانگ برای زمانی که سرعت باد بیش از پنج متر بر ثانیه باشد، بسیار خوب کار می‌کند اما در سرعت‌های باد کم‌تر از آن دچار خطا می‌شود و موج محلی را بیش از حد برآورد می‌کند. در این شرایط روش گیلهوسن و هروی و در رتبه‌ی بعد روش ارل تخمین‌های مناسبی از فرکانس جداسازی دارند.

۶ - مراجع

1-Wang, D.W. and Hwang, P.A., (2001), *An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 18, p. 2052–2062

2- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J.F., Magne, R., Roland, A., Van der Westhuysen, A., Queffeulou, P., Lefevre, J.M. and Aouf, L., (2010), *Semi empirical dissipation source functions for ocean waves. PartI: definition, calibration and validation*, Journal of Physical Oceanography, Vol. 40, p. 1917–1941

3-Hanson, J.L. Tracy, B.A., Tolman, H.L., and Scott, R.D., (2009), *Pacific hindcast performance of three numerical wave models*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol 26, p. 1614-1633

4-Aboobacker, V.M., Rashmi, R., Vethamony, P. and Menon, H.B., (2011), *On the dominance of pre-existing swells over wind seas along the west coast of India*, Journal of Continental Shelf Research, Vol. 31, p. 1701-1712

5-Vethamony, P., Aboobacker, V.M., Menon, H.B., Kumar, K.A. and Cavaleri, L, (2011), *Superimposition of wind seas on pre-existing swells off Goa coast*, Journal of Marine Systems, Vol. 87, pp. 47-54

6-Hanson, J.L. and Phillips, O.M., (1999), *Wind sea growth and dissipation in the open ocean*, Journal of Physical Oceanography, Vol. 29, p. 1633-1648

7-Hasselmann, S., Lionello, P. and Hasselmann, K., (1997), *An optimal interpolation scheme for the assimilation of spectral wave data*, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 102, p. 15823-15836

8-Portilla, J., Caicedo, A. L., Padilla-Hernández, R. and Cavaleri, L., (2015), *Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean*, Journal of Ocean Modelling, Vol. 92, p. 149-168

9-Earle, M., (1984), *Development of algorithms for separation of sea and swell*. National Data Buoy Centre Report, MEC-87-1

10-Wang, D.W. and Gilhousen D., (1998), *Separation of seas and swells from NDBC buoy wave data*, 5th International workshop on wave hindcasting and forecasting, p. 155-162

11-Gilhousen, D.B. and Hervey, R., (2001), *Improved estimates of swell from moored buoys*. Proceedings of the Fourth International symposium on waves, p. 387-393

12-Hwang, P.A., Ocampo-Torres, F.J. and García-Nava, H., (2012), *Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 29, p. 116-128

13-Portilla, J., Ocampo-Torres, F.J. and Monbaliu, J., (2009), *Spectral partitioning and identification of wind sea and swell*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 26, p. 107-122

14- Phillips, O.M., (1985), *Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 156, p. 505-531

15- Donelan, M.A., Hamilton, J. and Hui. W.H., (1985), *Directional spectra of wind-generated waves*, Journal of Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol 315, p. 509-562.

16-Wu, J., (1980), *Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions-A revisit*, Journal of Physical Oceanography, Vol. 10, p. 727-740

17-Hanson, J.L. and Phillips, O.M., (2001), *Automated analysis of ocean surface directional wave spectra*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol 18, p. 277-293

18-Hanson, J.L. and Jensen, R.E., (2004), *Wave system diagnostics for numerical wave models*, 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, p. 1-19

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.6.2]