

## مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1402.9.1.3.8](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1402.9.1.3.8)

درصد همانندی: ۰٪

## تحلیل امواج سواحل مکران با استفاده از پارامترهای بدون بعد تیزی و سن موج

همایون کلانتری<sup>۱</sup>، کامران لاری<sup>۲</sup>، افشین محسنی آراسته<sup>۳</sup>، مسعود ترابی آزاد<sup>۴</sup>

- <sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. kalantari.homayun@gmail.com
- <sup>۲</sup> دانشیار گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. k\_lari@iau-tnb.ac.ir
- <sup>۳</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. am.arasteh@gmail.com
- <sup>۴</sup> استاد گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. m\_azad@iau-tnb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

## چکیده

امواج در سطح دریا آشکارترین پدیده هوا-دریاست. این امواج تأثیر قابل توجهی بر زیرساخت‌های ساحلی، فرسایش ساحلی و انتقال رسوب دارند. شناسایی امواج حاکم بر منطقه و حالت دریا با تمرکز بر تغییرپذیری فصلی آن و پارامترهای بی‌بعد مانند تیزی موج و سن موج اهمیت زیادی دارد. با توجه به تفاوت جزئیات میدان موج، برای بررسی دقیق و تحلیل کیفی و توسعه سیستم پیش‌بینی امواج ناشی از باد و ارزیابی عملکرد آن در سواحل شمالی دریای عمان، از داده‌های شبیه‌سازی شده و قابل اعتماد، مدل نسل سوم Mike 21 - SW، واداشته شده توسط نیروی باد استفاده شده است. ضمن رسیدن به ارزش مطلوب داده‌ها توسط ضرایب قابل تنظیم سفیدک موج و کالیبراسیون با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADCP، واقع در ایستگاه‌های معینی از این مناطق، در سال ۲۰۱۶، تغییرات فصلی و سالانه داده‌های امواج ناشی از باد در سواحل شمالی دریای عمان مورد مطالعه قرار گرفته است. می‌توان گفت اقلیم منطقه تحت تأثیر امواج ناشی از باد شمال غربی، موسمی و همچنین امواج اقیانوس هند قرار دارد. ضمن همبستگی بسیار خوب پارامترهای خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری، نتایج حکایت از تغییرات فصلی و مکانی امواج از شرق به غرب دارد. در توزیع توأم داده‌های عکس سن موج-تیزی موج، عکس سن موج بیشتر از ۱/۵ به دلیل عدم توسعه یافتگی کامل حالت دریا به ندرت اتفاق می‌افتد و در تیزی کمتر از ۰/۱ گسستگی دیده می‌شود. که می‌تواند باعث شناسایی امواج حاکم بر منطقه شود. عمده امواج در دوره مونسون ناشی از بادهای موسمی با محدوده تغییرات عکس سن موج ۰/۸۳ - ۰/۲ و تیزی حداکثر ۰/۰۲ است. در دوره غیر مونسون امواج زیادی دارای عکس سن موج بیشتر از ۰/۸۳ هستند.

واژه‌های کلیدی: مدل عددی Mike 21 - SW، سواحل مکران، پارامترهای بی‌بعد تیزی موج و سن موج

## ۱. مقدمه

خطوط ساحلی در سراسر جهان در معرض تهدیدهای بسیاری همچون فرسایش، رسوب گذاری، افزایش سطح دریا و سیل های ناشی از طوفان است، از این رو داشتن داده های جامع، قابل اعتماد و طولانی مدت در مورد شرایط محیطی مانند امواج دریا برای محافظت، نگهداری و مدیریت خطوط ساحلی و توسعه پایدار فعالیت های اقتصادی در محیط دریایی بسیار مهم است. در سطح دریا، انرژی منتقل شده از باد به تولید امواج منجر می شود. امواج ناشی از باد به دو صورت محلی یا دورا هستند که ویژگی های متفاوتی دارند. وجود هم زمان امواج ناشی از باد و دورا می تواند به سازه های ساحلی آسیب برساند. مدل های طیفی زیادی برای مطالعات پیش بینی موج در اقیانوس باز و ساحلی وجود دارد. یکی از مدل های موج طیفی، مدل نسل سوم Mike21\_SW است، که برای تولید و تغییر شکل امواج ناشی از باد استفاده می شود [۱]. در سال های اخیر، محققان از تکنیک ها و روش های مختلفی برای مطالعه توزیع فضایی و فصلی انرژی امواج ناشی از باد محلی و دورا استفاده کرده اند. بیشتر الگوریتم تقسیم بندی در شناسایی فرکانس جداسازی  $f_s$  قرار دارد. فرکانس جداسازی امواج محلی و دورا مربوط به فرکانس پیک مدل طیف پیرسون - مسکوویچ است. این رویکرد از نظر مفهومی بیان کننده این واقعیت است، بخشی از طیف موج که سرعت فاز آن برای انتشار موج کمتر از سرعت باد است. ناشی از باد محلی است [۲]. امواج ناشی از باد محلی، امواجی آشفته با طول موج کوتاه هستند که با سرعت فاز  $C_p$  کمتر از سرعت باد حمل می شوند. آن ها برای رشد نیاز به ممنتوم و انرژی از باد دارند به طور قوی با میدان موج محلی همراه می شوند، انرژی را از باد پوشاننده دریافت می کنند. برعکس موج هایی که از منطقه تولید خود دور می شوند و ظاهر صاف تری دارند؛ دیگر از باد محلی انرژی ورودی دریافت نمی کنند، می توانند هزاران کیلومتر بدون نیاز به ممنتوم از طرف باد در سطح اقیانوس منتشر شوند، امواج دورا نامیده می شوند. مشاهدات وضعیت دریا تحت تأثیر باد در طول پروژه موج مشترک دریای شمال در سال ۱۹۷۳ میلادی توسط جان سوپ به دست آمد، نشان داد که شکل طیف موج

اقیانوس به مرحله توسعه حالت دریا یا به اصطلاح سن موج بستگی دارد. سن موج می تواند علاوه بر تشخیص جهت موج نسبت به باد، عامل تعیین کننده امواج محلی و دورا باشد. تحقیقات نشان می دهد که سن موج برای امواج ناشی از باد که با استفاده از پیش بینی باد در جهت انتشار موج محاسبه می شود، باید کمتر از ۱/۲ باشد [۳]. فرکانس جداسازی امواج ناشی از باد و دورا ۰/۱ هرتز اتخاذ شد، این فرکانس تنها زمانی استفاده می شود که امواج ناشی از باد و دورا در حوزه فرکانس از هم جدا شده باشند [۴]. آلوز در سال ۲۰۰۳، ضمن مطالعه حد دریای کاملاً توسعه یافته برای امواج ناشی از باد محلی و دورا به کمک سن موج بیان داشت که امواج ناشی از باد محلی به وسیله ممنتوم ناشی از باد رشد می کنند. در مراحل اولیه توسعه امواج با فرکانس بالا، به نام امواج ناشی از باد «جوان»، شناخته می شوند، که طیف موج، قله با تیزی زیاد را نشان می دهند [۵]. در مطالعه ای با عنوان پایش و تجزیه و تحلیل میدان های دورای اقیانوس بر اساس روش های جدید نشان داده شد که امواج دورا متشکل از امواج با قله های بلند، منظم و طولانی هستند، رشد و تکامل آن تحت تأثیر شدت وزش باد قرار ندارد. از نظر علمی تر، انرژی امواج ناشی از باد محلی در فرکانس های بالاتر بین ۴ - ۰/۱ هرتز است در حالی که امواج دورا فرکانس های کمتری بین ۰/۲ - ۰/۰۳ هرتز دارند. مدل های موج که معیار سن موج را برای تقسیم بندی امواج در دریا تطبیق می دهند، آستانه ای برای سن موج تعریف می کنند که دورا برای مقادیر بالاتر از آن غالب می شود [۶]. تیزی موج، که به عنوان نسبت بین ارتفاع موج (H) و طول موج (L) برای یک موج تعریف می شود، پارامتری ضروری برای طراحی سازه های فراساحلی و ساحلی است. می توان گفت تیزی امواج فراساحلی توصیفی ضروری برای مطالعات مورفولوژی ساحلی است. به علت بستگی برخی فرایندهای فیزیکی به تیزی موج، چندین فرمول برای طراحی سازه های ساحلی و فراساحلی به طور مستقیم به تیزی موج یا به طور غیرمستقیم از طریق پارامترها بستگی دارد [۷]. انتقال انرژی از باد به امواج به افزایش دامنه آن منجر می شود. این فرایند تا آنجا ادامه می یابد که موج به دلیل تیزی بیش از حد، ناپایدار شده و بشکند. این شکل از شکست موج معمولاً سفیدک موج نامیده می شود

توصیف رشد امواج ناشی از باد مورد نیاز است. این مطالعه از داده‌های شبیه‌سازی شده Mike21- SW کالیبره شده با داده‌های جمع‌آوری شده توسط شناورهای موجی ADCP واقع در امتداد نوار ساحلی جنوب شرقی ایران در آب‌های عمیق در سال ۲۰۱۶ برای بهبود دانش فعلی این منطقه استفاده می‌کند [۱۵]. این پژوهش امکان شناسایی و تحلیل امواج حاکم بر منطقه مطالعاتی با استفاده از پارامترهای بی‌بعد عکس سن موج و تیزی موج در سواحل جنوب شرقی ایران را فراهم می‌آورد. ضمن ضرورت آگاهی از ویژگی‌های امواج در فصل‌های مختلف، مطالعه‌ای برای شناخت و تحلیل پارامترهای موج و تغییرپذیری فصلی آن‌ها و اثرپذیری این پارامترها از شرایط محیطی برای توصیف حالت دریا فراهم شد. این رویکرد باعث پیش‌بینی بهتر مشخصه‌های موج و دقیق‌تر شدن حوزه محاسباتی در ساختارهای ساحلی و بندری می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

رویکرد مطالعه عمدتاً شبیه‌سازی عددی امواج و تحلیل امواج حاکم بر منطقه، با استفاده از پارامترهای بی‌بعد تیزی موج و سن موج است. برای این مطالعه، از مدل نسل سوم توسعه یافته MIKE 21 SW به منظور تجزیه و تحلیل امواج در نزدیکی ساحل استفاده شده است، که یک ابزار عددی با قابلیت شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل اقلیم امواج در مناطق ساحلی و دور از ساحل است. مدل موج از تکنیک شبکه‌بندی ساختار نیافته، برای تعریف دامنه جغرافیایی استفاده می‌کند. شرایط موج در مرز باز جنوبی مدل منطقه‌ای از یک مدل بزرگ‌تر به دست آمده است. در واقع از داده‌های امواج فراساحلی (ارتفاع موج)، داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران، با عنوان مطالعات پایش و مدل‌سازی سواحل ایران با مدیریت سازمان بنادر و دریانوردی ایران (فاز ششم - سواحل مکران) با وضوح زمانی یک‌ساعته، استفاده شده است. عملکرد مدل موج منطقه‌ای با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری با تجهیزات سرعت‌سنجی و موج‌نگاری از نوع سرعت‌سنج‌های مدل ADCP AWAC ساخت شرکت نوژی Nortek صحت‌سنجی شده است. دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده برای موج و جریان آب، در ایستگاه‌های معینی (جدول ۱) در

[۸]. که شکست موج متأثر از ویژگی‌های موج (اغلب ارتفاع و تیزی موج)، سرعت باد و عمق سنجی قرار می‌گیرد. بنابراین شکست موج با تیزی موج مرتبط است [۹]. مقدار تیزی بزرگ موج، به یک مقدار بالاروی نسبی کوچک از دیواره‌های ساحلی و سازه‌ها منجر می‌شود، به عبارتی می‌توان گفت که هر چه تیزی موج کوچک‌تر باشد، میزان بالاروی آن بیشتر خواهد بود. برای بهبود عملکرد روش تیزی موج، چندین تحقیق برای جداسازی امواج ناشی از باد و دور از طیف انرژی امواج صورت گرفته است [۱۰]. علاوه بر الگوریتم [۲]، الگوریتم جدیدی برای جداسازی امواج ناشی از باد محلی و دورا بر اساس تیزی موج معرفی شده است. پس از بررسی دقیق انواع تقسیم‌بندی طیفی و نواقص آنها [۹-۱۱]، اصلاحاتی بر روی الگوریتم [۱۲]، صورت گرفت. بنابراین توصیف این پارامتر موج در مقیاس‌های زمانی مختلف، به‌ویژه برای امواج پرانرژی در آب‌های عمیق ضروری است. با این حال، به دلیل مشکلات نصب و نگهداری شناورهای موج در آب‌های فراساحلی عمیق، مطالعات تغییرپذیری تیزی موج آب عمیق بر اساس مشاهدات میدانی طولانی مدت در محیط‌های پرانرژی وجود ندارد. این شرایط در مورد سواحل مکران واقع در جنوب شرق ایران نیز صدق می‌کند. اگر چه مطالعاتی بر درک اقلیم موج در امتداد سواحل کشور ایران شده است. ارزیابی در خصوص دو مدل عددی موج نسل سوم، سوان و مایک ۲۱ در پیش‌بینی ارتفاع امواج شمال دریای عمان صورت گرفته است و نتایج حکایت از عملکرد بهتر مدل مایک ۲۱ در منطقه مطالعاتی در دو نقطه جاسک و چابهار در سواحل شمالی دریای عمان دارد [۱۳]. همچنین یک مطالعه عددی در خصوص بررسی خواص هیدروفیزیکی دریای عرب شمالی در خلال مونسون تابستانه و زمستانی در خصوص متوسط دمای سطح دریا و متوسط شوری سطح دریا و لایه آمیخته صورت گرفته است [۱۴]. آن‌ها بر اساس مدل‌سازی عددی موج یا داده‌های شناور موج ثبت شده‌اند و بر تغییرپذیری تیزی موج تمرکز ندارند. بنابراین، در امتداد نوار ساحلی در آب عمیق، مطالعات بیشتری برای درک کامل ویژگی‌های پارامترهای بی‌بعدی همچون تیزی موج و سن موج در طول فصل‌های مختلف بر اساس توزیع آماری و توزیع توأم آن‌ها برای

که  $\varepsilon$  نسبت چگالی هوا به آب و  $\beta$  پارامتر مایلز و  $\sigma$  پارامتر فرکانس زاویه‌ای نسبی است. پارامتر  $x$  به صورت زیر داده می‌شود.

$$x = \frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) \quad (۳)$$

که  $u_*$  همان سرعت اصطکاک باد،  $c$  سرعت فاز،  $\theta$  و  $\theta_w$  به ترتیب جهت موج و باد هستند. شرح مختصر از این ترم‌ها و پارامترسازی‌ها در [۱۸]، ارائه شده است. از این‌رو در مدل‌های نسل سوم انتشار امواج پارامترسازی نرخ رشد موج موردبازنگری و تصحیح قرار گرفته است [۱۴]. پارامتر مایلز با ارتفاع بحرانی و عدد موج، یعنی تیزی موج تعریف می‌شود. بنابراین، در مدل‌سازی‌های اخیر، با توجه به وابستگی رشد ارتفاع موج به سن موج، در اجرای واقعی رابطه (۳) به شرح زیر اصلاح می‌شود.

$$x = \left( \frac{u_*}{c} + z_\alpha \right) \cos(\theta - \theta_w) \quad (۴)$$

که پارامتر تنظیم سن موج است. تیزی موج نسبت ارتفاع موج به طول موج، پارامتر مهمی برای دریای تصادفی است. بنابراین، اغلب متأثر از امواج کوتاه است. می‌توان از طریق آن به تاریخچه موج و نوع امواج حاکم بر منطقه، امواج دورا با پیرو بلند و امواج ناشی از باد محلی پی برد. مرکز ملی داده شناور در سال ۱۹۹۷ با آگاهی از اینکه می‌توان اطلاعات امواج دورا را از طیف انرژی موج به دست آورد، اما نداشتن زمان لازم و عدم تجربه بسیاری از دریانوردان برای انجام این کار، روشی را براساس تیزی موج توسعه دادند که فقط به داده‌های موج غیر جهت‌دار نیاز دارد. این روش براساس آگاهی از تندتر بودن امواج ناشی از باد از دورا و اینکه حداکثر تیزی موج در نزدیکی پیرو پیک امواج ناشی از باد اتفاق می‌افتد، دوره‌ای را برای جداسازی امواج دورا از امواج ناشی از باد تعیین می‌کند. برای جداسازی امواج دورا در دریا، تابع تیزی موج به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\xi(f) = \frac{H_s(f)}{L(f)} = \frac{2\pi H_s(f)}{gT_z^2(f)} = \frac{8\pi m_2(f)}{g\sqrt{m_0(f)}} \quad (۵)$$

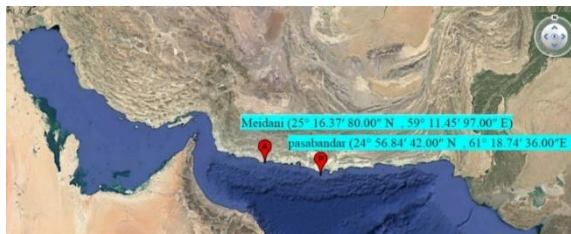
که در اینجا  $m$  گشتاور طیف چگالی انرژی است. بدیهی است که وقتی انرژی موج بزرگ است، قطعاً ارتفاع زیادی ایجاد

آب‌های عمیق بیش از ۲۵ متر بیرون ناحیه شکست موج با مدیریت سازمان بنادر جمهوری اسلامی ایران، نصب شده است و قادر است در این مطالعه از فرمول کاملاً طیفی جهت‌دار برای مناطق ساحلی و فراساحلی براساس معادله تعادل عملکرد موج نرم افزاری MIKE 21 SW استفاده شود. معادله تعادل عمل موج برای طیف واریانس را می‌توان به صورت مختصات دکارتی فرموله کرد. (کومن و همکاران، ۱۹۹۴).

$$\begin{aligned} \frac{dE(\sigma, \theta)}{dt} &\equiv \frac{\partial E(\sigma, \theta)}{\partial t} + \vec{C}_g \cdot \nabla E(\sigma, \theta) \\ &= \sum_{i=1}^n S_i \end{aligned} \quad (۱)$$

که در آن پارامتر  $\sigma = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای و  $\theta$  جهت انتشار موج و  $\nabla$  عملگر دیفرانسیلی است. چگالی انرژی موج  $(\sigma, \theta)$   $E$  وابسته به فرکانس و جهت انتشار موج است، که با توجه به زمان  $t$  و موقعیت جغرافیایی تغییر می‌کند [۱]. نرخ خالص رشد (یا فروپاشی) یک جزء طیفی، به دنبال مسیر پرتوی با سرعت گروهی آن، مجموع تمام عبارات‌های منبع است که هر یک نشان‌دهنده یک فرایند فیزیکی است، که مؤلفه‌های طیفی را اضافه یا کم می‌کنند و انرژی را به درون یا از طیف منتقل می‌کنند. این فرایندهای پراکندگی و اتلاف به شکل «اصطلاح منبع» طیفی پارامتری می‌شوند. که شامل اصطلاح‌هایی نظیر اثر فعل و انفعال موج-موج با عبارت پراکندگی [۱۶]، اصطلاحات دیگر شامل انتقال انرژی از باد به امواج  $S_{in}$  و از دست دادن انرژی موج ناشی از تشکیل سفیدک موج و تلاطم مرتبط با آن در اقیانوس است. اتلاف انرژی پایین، مربوط به پراکندگی امواج با اصطکاک بستر در آب‌های کم‌عمق است. پراکندگی به دلیل تغییرات عمق آب در مقیاس کوچک بر ویژگی‌های جهت موج تأثیر می‌گذارد [۱۷]. با توجه به مطالعات، نرخ رشد امواج تولیدشده توسط باد به سن موج بستگی دارد. این به دلیل وابستگی درگ آیرودینامیکی به شرایط حالت دریاست [۳]. بنابراین، پارامترسازی ساده از نرخ رشد امواج، توسط جانسن در سال ۱۹۹۱ به دست آمد:

$$\gamma = \varepsilon \beta \sigma x^2 \quad (۲)$$

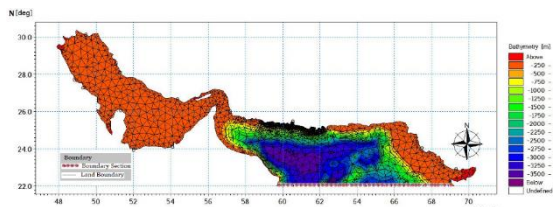


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها در منطقه

جدول ۱. موقعیت مکان‌های اندازه‌گیری با دوره‌های در دسترس

Station	Water Depth (m)	Latitude	Longitude	Period of Measurement for the Data Sets
Pasabandar	30	24° 56.86' 42"	61° 18.74' 36"	2.6.2016-11.29.2016
Meydani	30	25° 16.37' 80"	59° 11.45' 97"	2.9.2016-11.26.2016

نمای کلی عمق سنجی دقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. داده‌های ورودی مرز جنوبی باز مدل موج از نتایج مدل‌سازی فاز ششم پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل کشور (سواحل مکران) با وضوح زمانی یک‌ساعته، تهیه شده توسط سازمان بنادر و دریانوردی ایران استفاده شده است. قبل از اینکه شبیه‌سازی موج طیفی را تنظیم کنیم، یک فایل داده حاوی مؤلفه ارتفاع موج شاخص آماده شد. فایل باید به صورت یک فایل داده دوبعدی بدون ساختار یا یک فایل داده شبکه‌ای دوبعدی باشد و ناحیه مدل را تحت پوشش قرار دهد.



شکل ۲. نمای کلی از شبکه‌بندی در منطقه مطالعاتی با مرز جنوبی باز

### ۳-۲. بادهای سطحی

برای اینکه بتوانیم پیش‌بینی‌های موجی خوبی انجام دهیم ضروری است که تحلیل و پیش‌بینی درستی از باد سطحی در دسترس باشد. هر چه میدان باد ارائه شده به مدل موج دقیق‌تر باشد، شبیه‌سازی امواج افزایش می‌یابد. به این منظور می‌توان از نتایج مدل‌های عددی جوی استفاده کرد. میدان باد مورداستفاده در این تحقیق حاصل مطالعات فاز ششم پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل کشور (سواحل مکران) توسط سازمان بنادر و دریانوردی ایران است. در مطالعات انجام گرفته میدان باد با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF با وضوح مکانی ۰/۱ درجه و وضوح زمانی یک ساعت در محدوده کل سواحل

می‌کند و در نتیجه به تیزی زیاد منجر می‌شود. بنابراین، تغییرات مکانی تیزی موج با ارتفاع موج شاخص یکسان خواهد بود.

$$m_n(f) = \int_f^{f_u} f^n S(f) df \quad (6)$$

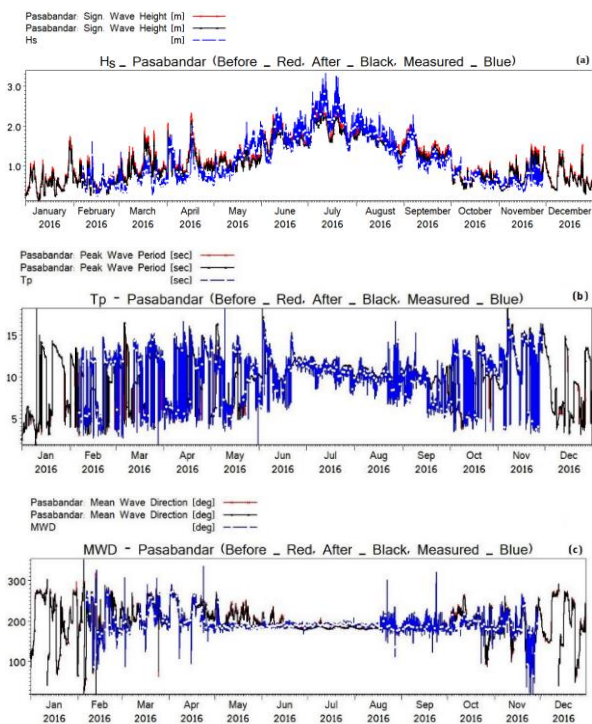
که  $f_u$  حد بالایی طیف است می‌توان فرکانس جداسازی را به صورت فرکانسی کمتر از فرکانس پیک امواج ناشی از باد محلی و بیشتر از فرکانس پیک امواج دورا در نظر گرفت. پرپود پیک برای جداسازی دورا و امواج ناشی از باد محلی کاملاً توسعه یافته توصیف شده است [۱۹]. اجزای امواج دورا به عنوان اجزایی تعریف می‌شوند که معیارهای مبتنی بر سن موج را برآورده می‌کنند. سهم اجزای آن در تیزی موج تقریباً ناچیز است زیرا طول موج آن‌ها بلند (عدد موج کوچک) است.

### ۳. تئوری و محاسبات

سواحل مکران واقع در جنوب شرقی ایران منطقه مورد مطالعه است. تلاش شده است تا شرایط موج در شرق منطقه مطالعاتی ایستگاه پسابندر و غرب منطقه مطالعاتی ایستگاه میدانی با موقعیت جغرافیایی مشخص در جدول (۱)، بررسی شود. شکل (۱) محدوده مطالعاتی و محل استقرار دستگاه‌های موج نگار و سرعت سنج به کار رفته در ایستگاه‌های مشخص شده در عمق بیش از ۲۵m بیرون ناحیه شکست موج در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل مکران را نشان می‌دهد. به منظور شبیه‌سازی امواج در بخش ساحلی و دور از ساحل در سال ۲۰۱۶ یک دامنه از عرض جغرافیایی ۲۲°N شمالی به سمت خط ساحلی ایران انتخاب شد.

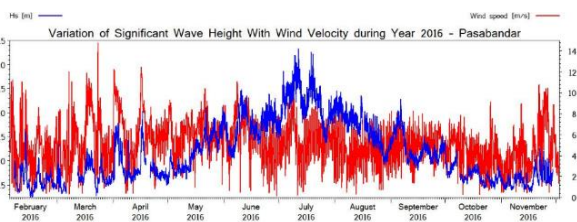
### ۳-۱. اطلاعات موج ورودی

به منظور برپایی مدل، هندسه منطقه، داده‌های هیدروگرافی و موقعیت مرز، شرایط طبیعی مسئله با حداکثر دقت به شکل قابل حل به کمک معادلات حاکم، به نرم‌افزار معرفی شده است. برای نمایش دقیق ساختار ساحلی و فراساحلی در حوزه محاسباتی، از شبکه ساختارنیافته با المان مثلثی با وضوح متغیر در دامنه بزرگی با مرز باز جنوبی استفاده شده است.



شکل ۳. مقایسه بین داده‌های ثبت شده (ADCP) برای ارتفاع موج شاخص و پرورد پیک موج TP و جهت متوسط موج در ایستگاه پسابندر

همچنین نوسانات شبیه‌سازی شده پارامترهای پرورد پیک موج و جهت متوسط موج، تفاوت زیادی با داده‌های اندازه‌گیری شده ندارند. تغییرات Hs امواج نزدیک به ساحل در سال ۲۰۱۶ با تغییرات سرعت باد مطابقت و همبستگی مطلوب دارند. اگرچه ممکن است با الگوی باد به علت وجود امواج دورای اقیانوسی هماهنگ نباشد. شکل (۴).



شکل ۴. تغییرات ارتفاع موج شاخص با سرعت باد

امواج در دریای عمان تحت تأثیر فرایندهای متفاوت از جمله بادهای محلی شمال غربی (باد شمال)، جبهه‌های هوایی مونسون و طوفان‌های اقیانوس هند و دریای عرب که به امواج اقیانوس هند در منطقه منجر می‌شوند، قرار دارند. اقلیم موج منطقه را می‌توان به صورت سه اقلیم قبل مونسون، مونسون و بعد مونسون تقسیم‌بندی کرد. قبل مونسون را می‌توان از شروع ماه میلادی تا نیمه ماه می و مونسون با بادهای ۱۲۰ روزه را از

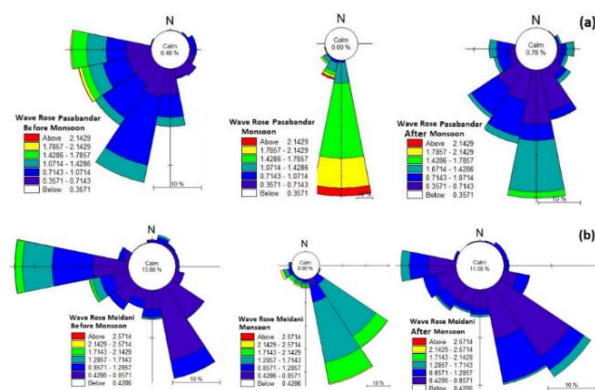
ایران تولید شده است. سیستم مدل‌سازی پیشرفته WRF یک مدل میان‌مقیاس، انعطاف‌پذیر با قابلیت‌های فراوان است، که می‌تواند شرایط آب و هوایی مختلف را شبیه‌سازی کند. برد کاربرد از چند متر تا هزاران کیلومتر است. این مدل به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی عددی جوی با وضوح زمانی و مکانی بالا طراحی و ارائه شده است.

#### ۴. یافته‌ها

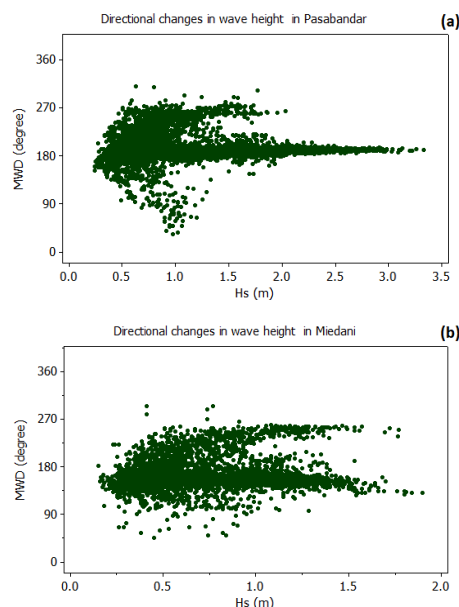
در این تحقیق با تمرکز بر حالت دریا در آب عمیق با وجود بادهای محلی و منطقه‌ای، از داده‌های موج جمع‌آوری شده در طول سال ۲۰۱۶ برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های موج فصلی و سالانه امواج در آب عمیق استفاده شده است. از میدان باد با وضوح مکانی ۰/۱ درجه و وضوح زمانی یک ساعت در محدوده کل سواحل ایران استفاده شده است. کالیبراسیون با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط دستگاه اندازه‌گیری ADCP AWAC در ایستگاه‌های اندازه‌گیری پسابندر و میدانی، جدول (۱) در سال ۲۰۱۶ انجام شد. داده‌های موج شامل ارتفاع موج شاخص، پرورد پیک و جهت متوسط موج پس از تنظیم مدل با ضرایب قابل تنظیم سفیدک موج با مقدار استخراج شدند. اقلیم باد این منطقه با توجه به موقعیت جغرافیایی، از یک طرف تحت تأثیر جریان‌های جوی متعدد مانند مونسون و به تبع آن باران‌های موسمی اقیانوس هند، همچنین تحت تأثیر مرکز پرفشار عرض‌های میانی است. دریای عمان متأثر از باد شمال غربی (شمال) و بادهای موسمی جنوب غربی است که به فعالیت امواج بالا منجر می‌شود. باد شمال باد غالب این منطقه است در زمستان می‌وزد و از جهت غرب به شرق است. بادهای مونسون در فصل تابستان می‌وزند. نیمه غربی دریای عمان به دلیل قرار گرفتن شبه‌جزیره عربستان و کشورهای حاشیه جنوب خلیج فارس مصون از بادهای مونسون است. تعیین صحیح الگو و مشخصات امواج و گلموج محدوده مورد مطالعه، اهمیت قابل توجهی در مطالعات دریایی دارد. شکل (۳) مطابقت داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه پسابندر، برای پارامترهای ارتفاع موج شاخص قبل و بعد کالیبراسیون را نشان می‌دهد. مدل ارتفاع موج را به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

منطقه ساحلی نشان داده شده است. در طول زمستان (دوره قبل مونسون) ارتفاع موج شاخص کم، به طور نمونه در ماه فوریه کمتر از یک متر است. اما روند تغییرات ارتفاع موج افزایشی است. غالب امواج متأثر از باد شمال با پریود ۵ تا ۷ ثانیه یا طوفان‌های غربی ناشی از آن و امواج اقیانوسی با ارتفاع حدود ۱m و پریود بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه با جهت غالب جنوبی و همچنین جنوب‌غربی دیده می‌شوند. به دلیل وزش بادهای موسمی زمستانی در منطقه و وزش بادهای شمال جهت امواج محلی و دورا پراکنده بوده، این رویداد برای امواج محلی ملموس تر است. با افزایش سرعت باد به بالای ۱۰ متر بر ثانیه افزایش ناگهانی در ارتفاع موج دیده می‌شود که نشان از امواج طوفانی با پریود کوتاه و تقریباً غربی است. البته اثر باد شمال در منطقه غرب مطالعاتی (ایستگاه میدانی) بر امواج بیشتر مشهود است. که باعث ایجاد امواج جنوب غربی و تقریباً غربی در این فصل می‌شود، شکل (۷). در دوره مونسون تابستانه ارتفاع موج و پریود بیک با بقیه سال متفاوت است و به موج‌های مرتبط با بادهای موسمی بستگی دارد. تقریباً اواخر اردیبهشت، از پراکندگی پریود کاسته و روند رشد امواج دریا آغاز شده است. با افزایش ارتفاع موج، پریود بیک کاهش یافته است. این می‌تواند نشان از شروع اثرات موسمی تابستانه باشد. در فصل تابستان که دوره مونسون تابستانی بر منطقه حاکم است، بر اساس شکل (۸) اواسط جولای حدوداً اواخر تیر زمان به اوج رسیدن مونسون و موج است. در این دوره غالب امواج در جهت جنوب با نام امواج مونسونی با ارتفاع گاهی تا ۳ m و پریود بیش از ۱۰s دیده می‌شود که می‌تواند همراه با امواج اقیانوسی باشند. امواج به دلیل جهت یکنواخت باد، تغییرات کمتری در جهت دارند. این روند تا اواخر دوره تقریباً، شهریور ادامه داشته و پس از آن از شدت امواج کاسته می‌شود. امواج جنوب شرقی، اغلب در تابستان منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و اثر آن در قسمت شرق منطقه مطالعاتی بیشتر است. جهت موج غالب در فصل مونسون با حرکت به سمت غرب منطقه مطالعاتی بیشتر جنوب شرقی خواهد بود.

نیمه ماه می تا نیمه سپتامبر و بعد مونسون از نیمه سپتامبر تا انتهای سال میلادی دانست. در واقع دوره مونسون مربوط به ماه‌های گرم سال یعنی از شروع خرداد تا اواخر شهریور است. تغییرپذیری فصلی پارامترهای موج و اثرپذیری این پارامترها از شرایط محیطی و تغییرات شدید قسمت غربی منطقه مطالعاتی را می‌توان با استفاده از گل موج شکل (۵) ارزیابی کرد. با توجه به بررسی شرایط باد در منطقه، امواج شمال غربی و غرب ناشی از باد شمال و امواج جنوب و جنوب شرق، منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطابق شکل (۶)، گاهی امواجی تا ارتفاع ۳ متر در هر دو جهت مشاهده می‌شود.

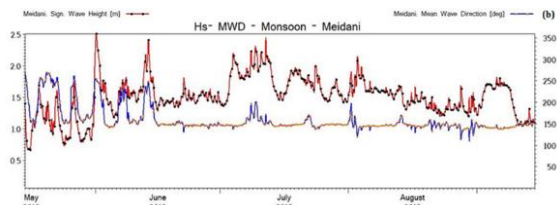


شکل ۵. گل‌موج فصلی ایستگاه (a) پسابندر (b) میدانی



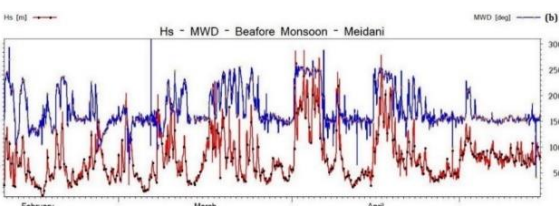
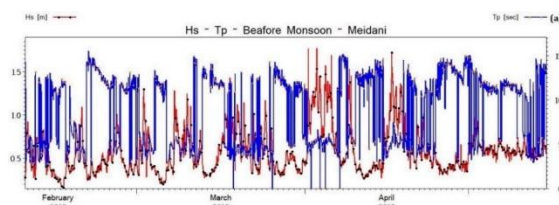
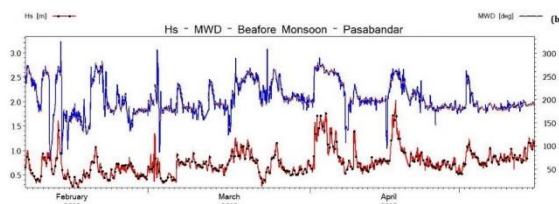
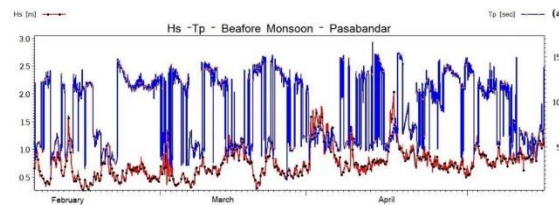
شکل ۶. تغییرات جهتی ارتفاع موج سال ۲۰۱۶ (a) ایستگاه پسابندر (b) ایستگاه میدانی

تغییرات ارتفاع موج شاخص با در نظر گرفتن پریود بیک و جهت متوسط موج در فصل‌های مختلف سال ۲۰۱۶ نزدیک به

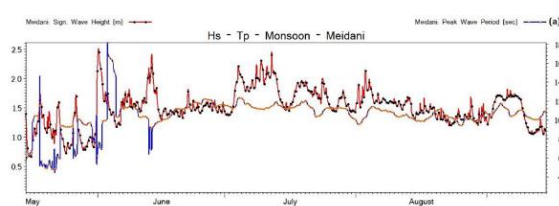
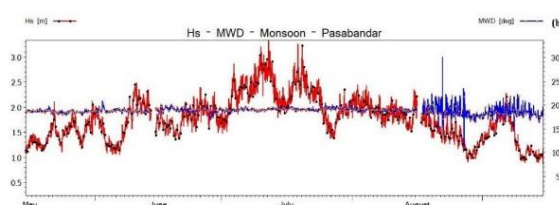
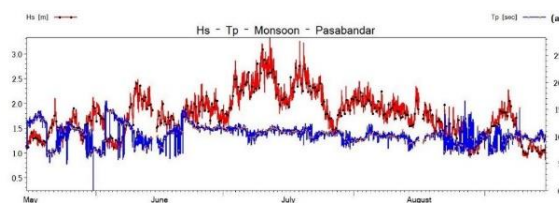


شکل ۸. نمودار تغییرات ارتفاع موج شاخص با پرپود دوره مونسون تابستانه (a) ایستگاه پسابندر (c) ایستگاه میدانی و تغییرات ارتفاع موج شاخص با جهت متوسط موج دوره مونسون تابستانه (b) ایستگاه پسابندر (d) ایستگاه میدانی

با پایان مونسون تابستانه و باران‌های موسمی تابستانه امواج دورای تشکیل شده به وجود خود ادامه خواهند داد. در دوره بعد مونسون روند تغییرات ارتفاع موج شاخص به دلیل تغییرات در شدت موج نسبت به دوره مونسون کاهشی مقدار آن کمتر از یک متر (بین ۶/۸ تا ۰/۸ متر) است. این نشان‌دهنده حاکم شدن دوباره امواج جنوبی و جنوب شرقی اقیانوس هند در دوره بعد مونسون به خصوص در قسمت شرق منطقه مطالعاتی است. در این دوره پرپود پیک موج به بالای ۱۰ ثانیه در حدود ۱۵ ثانیه است. بیشتر اختلاف در جهت امواج در بازه زمانی قبل و بعد مونسون تابستانه (جنوب شرقی) رخ می‌دهد شکل (۹). با توجه به نفوذ زیاد بادهای محلی شمال و موسمی زمستانه، به‌خصوص در آبان و اسفند در منطقه غرب با وقوع رویدادهای طوفانی، پراکندگی زیاد در جهت امواج و گاه افزایش ناگهانی ارتفاع موج مشاهده می‌شود. همچنین تغییرات زیادی در پرپود پیک امواج مشاهده می‌شود. در طول زمستان به‌خصوص به دلیل طوفان‌های شکل گرفته تغییرات ارتفاع و جهت موج (به دلیل تغییر جهت باد و سرعت باد) زیاد است. تنوع راستای موج در ایستگاه میدانی در غرب منطقه مطالعاتی به علت اثرپذیری بالای باد محلی، بیشتر است. مشاهده می‌شود که شرایط موج بر اساس تغییر فصل تغییر می‌کند. جهت امواج برای ایستگاه میدانی غربی تر است. در اوایل بهار، طوفان‌های غالب از سمت غرب هستند. این امواج غربی در ایستگاه میدانی با زاویه کم نسبت به ساحل حرکت می‌کنند. امواجی با پرپود کوتاه، کمتر از ۸ ثانیه هستند. این امواج هستند که ضمن حرکت تحت تأثیر بستر در مناطق ساحلی قرار نمی‌گیرند و ضمن رسیدن به دهانه بنادر تغییر جهت نمی‌دهند. با حفظ جهت غرب به شرق به بنادر می‌رسند و می‌توانند خطرناک‌تر از امواجی باشند که از آب عمیق به کم عمق می‌رسند و دچار انکسار شده و با زاویه کم خطرتری به دهانه بندر می‌رسند. پارامترهای امواج شبیه

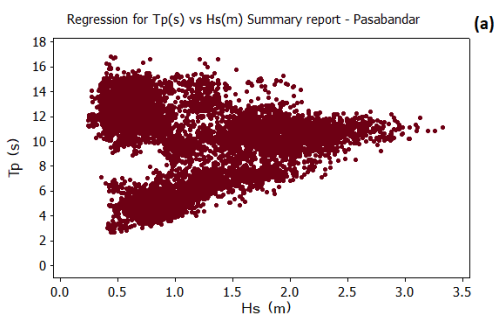


شکل ۷. نمودار تغییرات ارتفاع موج شاخص با پرپود (a) ایستگاه پسابندر دوره قبل مونسون (c) ایستگاه میدانی دوره قبل مونسون و تغییرات ارتفاع موج شاخص با جهت متوسط موج (b) ایستگاه پسابندر قبل مونسون (d) ایستگاه میدانی قبل مونسون

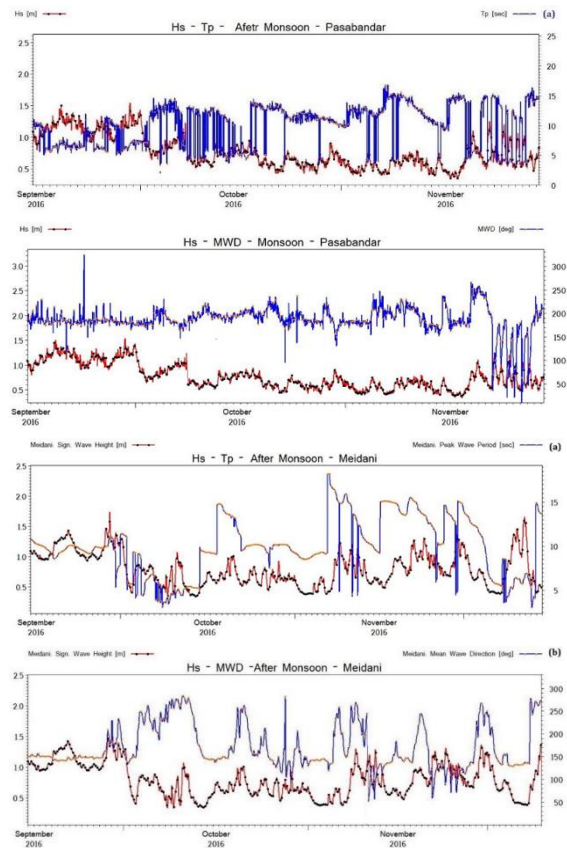




به وضوح مشاهده می شود که محتوای امواج از شرق به غرب تغییر کرده است. در شرق منطقه مطالعاتی، ایستگاه پسابندر، امواج دارای سه دسته پریودی مختلف هستند، ولی با حرکت به سمت ایستگاه میدانی واقع در غرب منطقه مطالعاتی، امواج دارای دو دسته پریود مختلف هستند. که نشان از حاکم شدن امواج مختلف بر منطقه است. با تجزیه و تحلیل می توان به امواج کوتاه ناشی از باد محلی و نامنظم که به سرعت به تغییرات باد پاسخ می دهند و امواج دورای منظم با قله های بلند که به شدت تحت تأثیر باد قرار نمی گیرند، پی برد. برای درک صحیح شرایط فصلی و سالانه امواج بر اساس دوره، مطابق شکل (۱۰)، امواجی با پریودی کوتاه کمتر از ۸ s توسط سیستم ناشی از باد محلی شمال غربی ایجاد می شود. امواج با دوره میانی با پریود ۸ تا ۱۲ ثانیه، به دلیل بادهای موسمی به وجود می آیند، این امواج اغلب در دوره مونسون جنوب غربی مشاهده می شوند، در فصل های قبل و بعد مونسون که حداقل سرعت باد روی دریا وجود دارد، کمتر مشاهده می شوند. وجود امواج با پریود بلند بیشتر از ۱۲ ثانیه به دلیل حضور امواج دورای اقیانوس هند است که تقریباً در تمام فصل ها مشاهده می شوند. امواج ناشی از باد محلی شمال [۲۰]، توسط بادهای از جهت شمال غربی، بر روی امواج از جهت جنوب غربی ایجاد می شوند. این امواج کوتاه مدت بیشتر در فصل قبل و بعد از مونسون هستند. سن موج معیاری برای اندازه گیری قدرت وزش باد و رشد موج و شاخص مهمی از درجه اتصال میدان باد و موج محلی است. با استفاده از سن موج رژیم امواج به دو دسته تقسیم می شود: امواج ناشی از باد محلی جوان، که مربوط به طیف فرکانس پیک بالا هستند و به تازگی توسط باد ایجاد شده اند. همچنین امواج بالغ (ناشی از باد) که با طیف اشباع مرتبط هستند معمولاً در جایی که امواج ناشی



دوره قبل مونسون می شوند. حاکم بودن شرایط فصلی و متغیر، اثر باد محلی در مشخصات امواج و حالت دریا مشهود است.

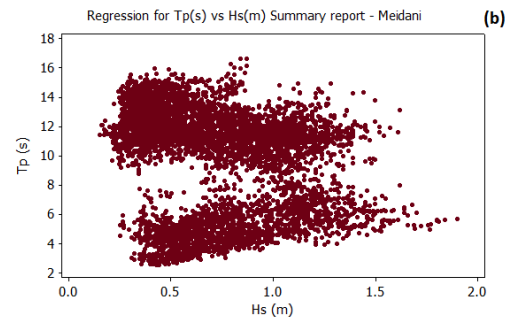


شکل ۹. نمودار تغییرات ارتفاع موج شاخص با پریود دوره بعد مونسون (a) ایستگاه پسابندر و تغییرات ارتفاع موج شاخص با جهت متوسط موج دوره بعد مونسون (b) ایستگاه پسابندر (c) ایستگاه میدانی (d) ایستگاه میدانی

## ۵. بحث

حالت موج با چند پارامتر مهم ارتفاع موج شاخص، پریود پیک و جهت موج و تراز آب مشخص می شود. رابطه بین پارامترهای موج، مانند ارتفاع موج شاخص، دوره پیک و وابستگی آن ها به هم، همچنین به روابط بی بعدی مثل سن موج و تیزی موج اغلب برای مهندسان اقیانوسی بسیار بااهمیت است. برای بررسی و تحلیل بهتر مشخصات موج می توان از توزیع توأم بین متغیرها و پارامترهای بی بعد استفاده کرد. این بررسی امکان شناسایی توزیع امواج در محدوده ساحلی و فراساحلی، تحلیل بهتر امواج حاکم بر منطقه را فراهم می آورد. یک طراح اغلب به رابطه بین ارتفاع موج شاخص و پریود پیک نیاز دارد. در شکل (۱۰)، ما این رابطه را نشان می دهیم.

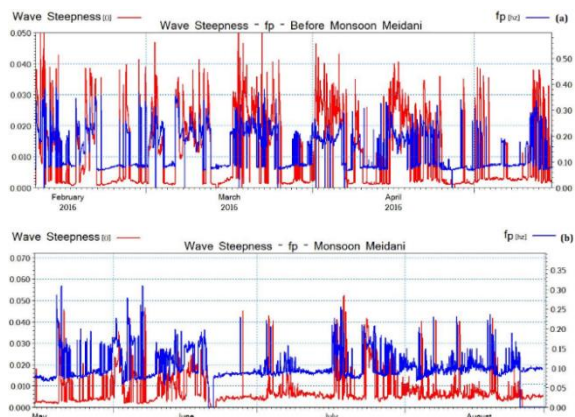
از عملکرد مدل‌سازی و مقایسه دو توزیع شرق و غرب منطقه مطالعاتی را در اختیار ما قرار می‌دهد. محور افقی نمودار مقادیر داده‌ها، عکس سن موج را به صورت صعودی و محور عمودی احتمال‌ها یا صدک‌ها را نشان می‌دهد. منحنی رسم شده، نشان‌دهنده جفت‌های متناظر از مقادیر داده‌ها و احتمال تجمعی است. برآورد توزیع احتمالی تجمعی بر مبنای تابع توزیع تجربی است که محور عمودی درصد فراوانی تجمعی را نشان می‌دهد. هر نقطه روی محور عمودی درصد مشاهداتی است که از آن نقطه کمتر است. در نمودار رسم شده خط چین قرمز عمود بر محور افق معرف عکس سن موج به مقدار  $0/83$  است. از محل تقاطع با منحنی، خط عمود بر محور قائم می‌تواند احتمال یا صدک تجمعی را نشان دهد. بنابراین با توجه به شکل (۱۱) طیف حاوی تغییرات عکس سن موج بیشتر از  $1/5$  به ندرت اتفاق می‌افتد. این به دلیل عدم توسعه یافتگی کامل حالت دریا در دوره مطالعاتی است. در حالی که بیشترین عکس سن موج در حد  $0/25$  است. بر اساس نمودار شاخص تجمعی شکل (۱۱) عکس سن موج با مقادیر کمتر از  $0/15$  در غرب منطقه مطالعاتی بیشتر است. امواج ناشی از باد جوان زمانی که عکس سن موج از  $0/18$  فراتر رود در توزیع نمودار بیشتر مشاهده می‌شود. بنابراین در یک دوره سالانه نشان داده می‌شود که سواحل شمالی دریای عمان تحت تأثیر امواج اقیانوسی و امواج ناشی از باد قرار دارد. در دوره مونسون امواج ناشی از باد محلی با عکس سن بیشتر از  $0/83$  بسیار محدود است. در منطقه غرب اثرات محدودی از امواج ناشی از باد محلی قوی دیده می‌شود. اما تقریباً  $10\%$  امواج در شرق منطقه دارای عکس سن کمتر از  $0/83$  هستند. باین حال امواج بیشتر اوقات به طور دقیق به صورت محلی تولید نمی‌شوند. در این دوره احتمالاً امواج دورا  $25$  تا  $30$  درصد کاهش می‌یابد. این نتایج با این فرض مطابقت دارد که در دوره مونسون عمده امواج ناشی از باد موسمی ( $75\%$ ) با عکس سن موج  $0/83$  -  $0/2$  در طول بادهای موسمی جنوب غربی آشکارتر هستند. طیف‌های باقی‌مانده کاملاً تحت تأثیر مؤلفه‌های دورای اقیانوسی قرار می‌گیرند. در دوره قبل مونسون با توجه شکل (۱۱a) در شرق منطقه مطالعاتی حدود  $80\%$  و در غرب حدود  $70\%$  عکس سن موج کمتر از  $0/83$  دارند. در دوره بعد مونسون به علت خروج بادهای موسمی در منطقه، اثرات دورا بیشتر نمایان می‌شود. احتمال اینکه عکس سن موج کمتر از  $0/15$  باشد، در غرب منطقه مطالعاتی بیشتر است. حدود  $10\%$  امواج



شکل ۱۰. نمودار پراکنندگی و توزیع توأم پریود پیک و ارتفاع موج شاخص

از باد محلی به آرامی روبه‌زوال باشد یا باد ضعیفی بر فراز امواج دورای تند می‌وزد ایجاد می‌شوند. با گذشت زمان از وزش باد، در طی مسافتی سرعت موج به سرعت باد نزدیک شده و از آن بیشتر می‌شود. برای مقادیر سن موج نزدیک واحد، باد و امواج تقریباً با سرعت یکسانی حرکت می‌کنند. نرخ رشد موج ناشی از باد بسیار کوچک می‌شود، امواج دورا که تازه از تأثیر باد رها شده‌اند، شکل می‌گیرند. سن موج دریاهای جوان کمتر از این مقدار است (یعنی امواج در حال توسعه، و سرعت باد بیشتر از سرعت فاز موج است. در حالی که سن موج برای دریاهای مسن بالاتر از این مقدار است. سن موج یک دریای کاملاً توسعه یافته تقریباً  $1/2$  است. برای سن موج بیشتر از  $1/2$  میدان موج تحت سلطه دورا فرض می‌شود، جایی که امواج  $20$  درصد سریع‌تر از  $U_{10}$  حرکت می‌کنند از باد پیشی گرفته و تکانه‌ای از باد دریافت نمی‌کنند [۲۱]. عکس سن موج برابر با  $0/83$ ، با مقدار طیف در توسعه کامل مطابقت دارد، که در آن اجزای طیفی زیر این مقدار به عنوان دورا (امواج بالغ) و بالاتر به عنوان امواج ناشی از باد طبقه‌بندی می‌شوند [۲۲]. سه نوع رژیم برهمکنش باد - موج معرفی شد [۲۳]. که عبارتند از (i) رژیم موج ناشی از باد قوی زمانی که عکس سن موج بیشتر از  $0/83$  است. (بادهای محلی قوی تکانه را به موج منتقل می‌کنند)، (ii) زمانی که عکس سن موج کمتر از  $0/15$  باشد، دوراهای سریع می‌توانند تکانه را به بادهای سطح منتقل کنند، (iii) رژیم مختلط وقتی که عکس سن موج بزرگ‌تر از  $0/15$  و کوچک‌تر از  $0/83$  باشد. در مطالعه حاضر، نمودارهای هیستوگرام عکس سن موج سیستم‌های موج، در سواحل شمالی دریای عمان با استفاده از داده‌های فصلی، نشان داده شده است، در شکل (۱۱). برای بهینه‌سازی هیستوگرام و توصیف نحوه توزیع داده‌ها از تابع توزیع احتمال تجمعی استفاده شده است. احتمال اینکه عکس سن موج کوچک‌تر یا مساوی مقدار معینی باشد را نشان می‌دهد. این تابع خلاصه‌ای

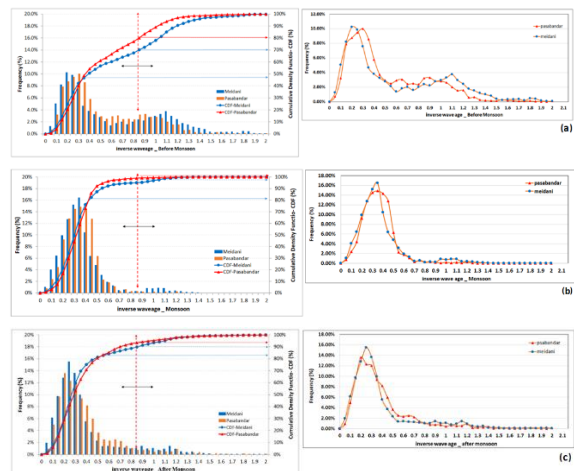
HS بیشتر است. مقدار متوسط تیزی موج در دوره قبل مونسون بیشترین مقدار است. کاهش پریود پیک می تواند تا حدودی ناشی از طوفان ها یا بقایای آن به ویژه در دوره قبل مونسون به طور نمونه در ماه فوریه و مارس باشد. نمودارهای توزیع توأم عکس سن موج بر حسب تیزی موج در شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب برای ایستگاه پسابندر و میدانی در فصل های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمایش تیزی موج و فرکانس پیک در ایستگاه میدانی (سال ۲۰۱۶)

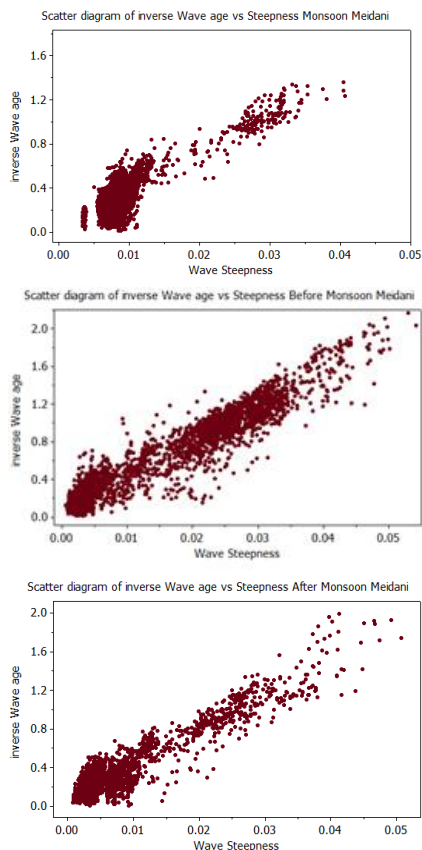
اگر به توزیع عکس سن موج و تیزی موج که کمیت های بدون بعدی هستند، در شکل های توزیع توأم، پس از کنترل کیفیت و آنالیز توأم دقت شود، داده های تجمعی آن ها در دوره غیر مونسون، گسسته شدن پراکندگی داده ها در تیزی کمتر از ۰/۰۱ را نشان می دهد. دسته ای از امواج با فرکانس بالا، طول موج کوتاه دارای تیزی زیادند که مربوط به امواج ناشی از باد محلی هستند. دسته ای دیگر از امواج با فرکانس پایین، طول موج بلند و تیزی کم می توانند معرف امواج دورا باشند. در ایستگاه پسابندر، دوره قبل از مونسون شکل (۱۳)، امواج با تیزی بیش از ۰/۰۲ و عکس سن بیش از ۰/۸۳ ارتفاعی حدود ۱ تا ۲ متر شکل (۱۵)، مربوط به امواج ناشی از باد محلی شمال غربی (امواج جوان) است. با رشد امواج و زیاد شدن سن موج، تیزی موج کم شده و امواج بالغ شکل می گیرند. امواج با تیزی کمتر از ۰/۰۱ و عکس سن موج پایین تر، می تواند معرف امواج دورای اقیانوس هند باشند که ارتفاعی در محدوده ۱ متر دارند. در دوره مونسون امواج با عکس سن موج بالاتر از ۰/۸۳ و تیزی بیشتر از ۰/۰۲ بسیار محدود هستند. غالب امواج تیزی کم و عکس سن موج کمتر از ۰/۸۳ دارند. با توجه به بادهای

عکس سن بیشتر از ۰/۸۳ دارند که به عنوان امواج ناشی از باد محلی در نظر گرفته می شوند. حدود ۸۰٪ امواج عکس سن کمتر از ۰/۵ دارند که نشان از وجود امواج بالغ و دورا در منطقه است. حدود ۹۰٪ عکس سن داده ها بیشتر از ۰/۱ است. بنابراین دریای جوان با حضور دوراها هستند.

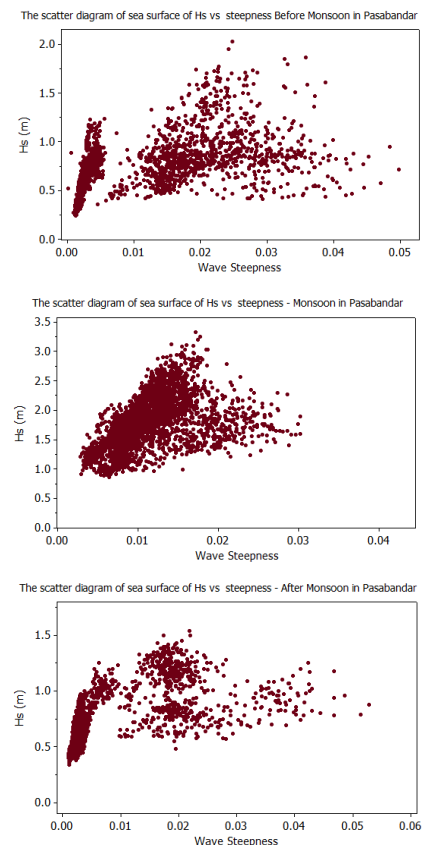


شکل ۱۳. فراوانی درصد وقوع عکس سن موج در ایستگاه پسابندر و میدانی سال ۲۰۱۶ (a) قبل از مونسون (b) مونسون (c) بعد مونسون

از تیزی موج در آب عمیق برای توصیف حالت دریا استفاده می شود. پس بررسی الگوهای تیزی موج در طول فصل های مختلف و مطالعه رابطه توزیع توأم عکس سن موج و تیزی موج برای توصیف رشد امواج ناشی از باد در مهندسی اقیانوس بسیار مهم است. انرژی موج دورا با فرکانس پایین نمی تواند به طور قابل توجهی پارامتر تیزی موج را تغییر دهد، چون پارامتر تیزی با توان دوم فرکانس متناسب است. سهم آن در تیزی موج معمولاً بسیار کمتر از امواج ناشی از باد محلی است. فرکانس های بالا بیشترین سهم را در جابه جایی سطح و تیزی موج دارند. شکل (۱۲) به طور نمونه تیزی موج و فرکانس پیک در ایستگاه میدانی، دوره قبل مونسون و مونسون را نشان می دهد. تیزی موج قبل مونسون با مقدار متوسط ۰/۱۳۴ بیشتر از دوره مونسون با مقدار متوسط ۰/۰۹۴ است. مقدار تیزی موج با مقدار متوسط سالانه ۰/۰۹۷ (شرق منطقه مطالعاتی) و ۰/۱۰۴ (غرب منطقه) تقریباً از ۰/۰۵ تا ۰/۰۵۵ متغیر است. کاهش مقدار متوسط تیزی موج به مقدار ۰/۰۸۰ در دوره بعد مونسون به خصوص در ماه های سپتامبر و اکتبر رخ می دهد. این نشان از تغییرات ارتفاع موج شاخص و دوره اوج است. با این حال افزایش دوره اوج و اثر آن در تیزی موج نسبت به

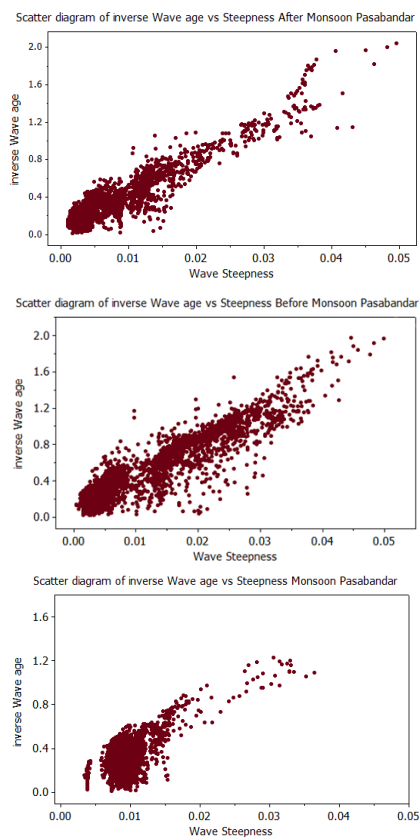


شکل ۱۴. توزیع توأم عکس سن موج-تیزی موج در فصل‌های مختلف ایستگاه میدانی



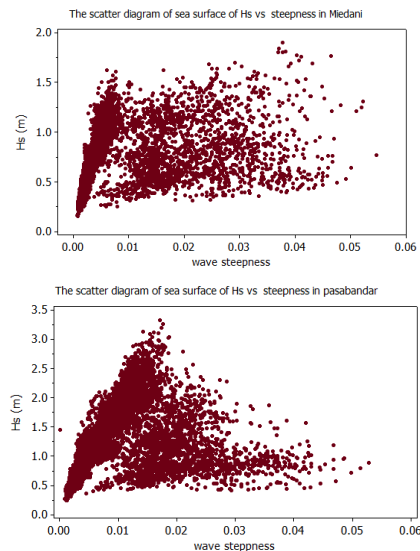
شکل ۱۵. توزیع توأم ارتفاع موج-تیزی موج در فصل‌های مختلف ایستگاه پسابندر

موسمی جنوب غربی قوی در منطقه، عمده امواج در این فصل از نوع امواج مونسون با ارتفاع زیاد (حدود ۳ متر) و تیزی کمتر از ۰/۰۲۵ هستند. این امواج همراه با امواج اقیانوس هند با ارتفاع تا ۱/۵ متر و عکس سن موج کمتر از ۰/۱۵ در محدوده حالت دریای مختلط مشاهده می‌شود. در دوره بعد مونسون، با خروج ناگهانی بادهای موسمی، امواج ناشی از باد محلی جوان با رفتاری نامنظم، گاه‌با ارتفاعی بالاتر از ۱/۵ متر و روند تیزی موج روبه رشد، به همراه امواج بالغ با عکس سن موج کمتر از ۰/۲ و تیزی کمتر از ۰/۰۰۵ به وضوح مشاهده می‌شوند که معرف حاکم شدن امواج اقیانوسی است. در ایستگاه میدانی مقدار بیشینه ارتفاع نسبت به ایستگاه پسابندر کمتر و مقدار پراکندگی امواج با تیزی زیاد، به علت اثر زیاد باد محلی، بیشتر است.



شکل ۱۳. توزیع توأم عکس سن موج-تیزی موج در فصل‌های مختلف ایستگاه پسابندر.

بالا، بین حداقل  $0.23\text{m}$  و حداکثر  $3/4\text{m}$  و میانگین  $1/18\text{m}$  در طول سال  $2016$  در شرق منطقه مطالعاتی تغییر کرده است. دوره اوج مشاهده شده با توافق مطلوب در محدوده بین  $2/6\text{ s}$  تا  $16/8\text{ s}$  و میانگین حدود  $10\text{ s}$  مشاهده شد. سری زمانی سالانه و روند تغییرات ارتفاع موج شاخص و پیرو پیک و جهت متوسط موج در شکل (۴) ارائه شده است. ارتفاع موج شاخص از ژانویه تا می دوره قبل مونسون روند ملایم افزایش را نشان می دهد. فعالیت موج و ارتفاع موج شاخص در طول دوره بادهای موسمی جنوب غربی زیاد بوده و حداکثر ارتفاع ( $3/4\text{m}$ ) در ماه ژوئیه و فعالیت موج در دوره بعد مونسون کم بوده و حداکثر ارتفاع ( $1/5\text{m}$ ) ثبت شده است. پارامتر جهت متوسط هم از همان الگوی در محل مطالعه پیروی می کند. در ایستگاه پسابندر علاوه بر جنوب و جنوب شرقی امواجی در جهت جنوب غربی و غرب نیز دیده می شود شکل (۵). درصد وقوع امواج مرتفع جنوبی نسبت به بقیه جهات بیشتر است. امواج با ارتفاع های بیشتر از  $1/5$  متر در این مکان اغلب جنوبی و جنوب غربی و غرب متمرکز هستند. با حرکت از شرق منطقه مطالعاتی به سمت غرب محتوای امواج تغییر کرده است، طوری که پراکندگی امواج از شرق به سمت غرب رو به افزایش است. این روندها می تواند ناشی از پارامترهای باد ورودی و ادغام امواج اقیانوسی با امواج ناشی از باد شمال غربی و کالیبره نشدن هم زمان امواج دورا در فصل مونسون با امواج محلی و ضعیف بودن میدان باد در محدوده خلیج عمان به علت قرارگیری بین مرز دو خشکی باشد. امواج گرانشی در امتداد سواحل غربی هند به شرایط باد حاکم بر منطقه با توجه به شرایط آن در فصل های مختلف مونسون، قبل و بعد مونسون بستگی دارد. همچنین بادهای موسمی جنوب غربی بر اقلیم امواج دریای عرب در امتداد سواحل غربی هند تأثیر می گذارد [۲۴]. تغییرات پیرو پیک با ارتفاع موج شاخص در سواحل غربی هند مطالعه شده است [۲۵]. در این مطالعه نمودار پراکندگی و توزیع توأم ارتفاع موج شاخص  $H_s$  و پیرو پیک  $T_p$  در دو ایستگاه ارائه شده است. در ایستگاه پسابندر واقع در شرق منطقه مطالعاتی سه دسته امواج مجزا با دوره های مختلف قابل مشاهده هستند. یک دسته امواج با پهنه نسبتاً وسیع با تیزی بیشتر از  $0.2$  و ارتفاع کم، گاهی با ارتفاعی نزدیک  $2$  متر، به



شکل ۱۶. روند تغییرات ارتفاع موج شاخص در ایستگاه پسابندر و میدانی در سال  $2016$

هم زیستی بین امواج ناشی از باد محلی و امواج اقیانوسی به ویژه بعد مونسون، به وضوح مشاهده می شود که می تواند نشان از فعال شدن امواج ناشی از باد محلی و غالب بودن امواج دورا در این فصل باشد. روند تغییرات سالانه ارتفاع موج شاخص منطقه مطالعاتی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. دسته ای از امواج با حداکثر ارتفاع تا حد  $3$  متر با تیزی تا حدود  $0.2$ ، می تواند مربوط به امواج مونسون و اقیانوسی متأثر از آن باشد. امواج اقیانوسی تیزی کم و ارتفاعی تا  $1/5$  متر دارند. امواج دیگری با پهنه نسبتاً وسیع و تیزی زیاد بیشتر از  $0.2$  و ارتفاع کمتر می توانند مربوط به امواج ناشی از باد محلی باشند.

پژوهش حاضر با هدف توسعه سیستم پیش بینی امواج ناشی از باد، در سواحل شمالی دریای عمان و تجزیه و تحلیل اثر سیستم باد بر امواج و تغییرات فصلی امواج با تمرکز بر پارامترهای بی بعد، سن موج و تیزی موج انجام شد. استنباط های به دست آمده از این مطالعه بر اساس تجزیه و تحلیل جامع داده های اندازه گیری شده و مدل سازی برای دوره از ژانویه تا دسامبر سال  $2016$  است. ضمن کالیبراسیون و تأیید مدل توسعه یافته Mike21-SW، از ترم استهلاکی سفیدک موج (sink term)، و ضرایب قابل تنظیم آن برای رسیدن به ارزش مطلوب استفاده شد. از مطالعه مدل سازی، آشکار است که پارامترهای موج اندازه گیری ها را به خوبی برای فصل های مختلف دنبال می کند. ارتفاع موج شاخص با همبستگی بسیار

باد و دورا، زمانی که عکس سن موج بزرگتر از ۰/۱۵ و کوچکتر از ۰/۸۳ باشد می‌تواند وجود داشته باشند. رژیم مختلف امواج و تأثیر باد بر امواج در سواحل هند واقع در سواحل شرقی دریای عرب همچنین برهم کنش بین باد و موج و شناخت رژیم موج حاکم بر منطقه با استفاده از عکس سن موج بررسی شده است [۲۳-۲۶]. سهم موج دورا در تیزی موج اغلب بسیار کمتر از امواج ناشی از باد محلی است. فرکانس‌های بالا بیشترین سهم را در جابه‌جایی سطح و تیزی موج دارند. تیزی موج در ایستگاه میدانی به‌طور نمونه از ۰/۰۵ تا ۰/۰۵۵ متغیر است. تیزی موج قبل مونسون بیشتر از دوره مونسون است. با توجه به داده‌های تجمعی توزیع توأم عکس سن موج - تیزی موج در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) در ایستگاه پسابندر و میدانی، پس از کنترل کیفیت و آنالیز همزمان، گسسته شدن پراکندگی داده‌ها در تیزی کمتر از ۰/۰۱ مشاهده می‌شود. در دوره قبل از مونسون امواج با عکس سن موج بیشتر از ۰/۸۳ و تیزی بیشتر از ۰/۰۲، می‌تواند امواج ناشی از باد محلی شمال (امواج جوان) باشند که ارتفاعی بالاتر از یک متر، گاهی بالاتر از ۲ دارند. این دسته امواج فرکانس بالا و طول موج کوتاه دارند. بر اساس طبقه‌بندی امواج توسط امواج ناشی از باد محلی با تیزی بیش از ۰/۰۲۵ شناخته می‌شوند [۲۷]. گروهی از امواج با تیزی کم و عکس سن موج کمتر از ۰/۸۳، امواج بالغ محسوب می‌شوند. امواجی با پیوند و طول موج بلند و ارتفاع در حد ۱ متر امواج اقیانوسی هستند که تیزی کم و عکس سن موج پایین دارند. در دوره مونسون امواج ناشی از باد موسمی امواج غالب منطقه هستند که تیزی تا حدود ۰/۰۲۵ و ارتفاعی نزدیک ۳ متر دارند. البته امواج دورای اقیانوس هند با تیزی کم و ارتفاعی در حد ۱/۵ متر و امواج محلی ناشی از باد شمال غربی با تیزی زیاد و ارتفاع بالاتر از ۱/۵ متر نیز مشاهده می‌شوند. در دوره بعد مونسون دوباره امواج حاکم بر منطقه امواج اقیانوسی است. تیزی کمتر از ۰/۰۱ ارتفاعی تا ۱/۲ متر دارند. امواج محلی نیز با تیزی زیاد و ارتفاعی حدود ۱/۵ متر و بالاتر نیز مشاهده می‌شوند. در مدل‌سازی‌های جدید، مدل‌های نسل سوم انتشار امواج، پارامترسازی نرخ رشد مورد بازنگری و تصحیح قرار گرفته است. پارامتر تنظیم سن موج، در پارامترسازی رشد موج وارد

علت وقوع طوفان و پیوند کمتر از ۸ ثانیه می‌تواند مربوط به امواج ناشی از باد محلی در راستای جنوب غربی و غرب در محدوده شمالی دریای عمان باشند. گروهی دیگر از امواج با ارتفاع زیاد نزدیک ۳ متر و پیوندی بیش از ۸ ثانیه (۸ تا ۱۲ ثانیه) دارند، با تیزی موج در حد ۰/۰۲، می‌تواند مربوط به امواج مونسونی ناشی از بادهای موسمی محدوده مطالعاتی باشند. امواج با پیوند بیک طولانی که تقریباً در تمام فصل‌ها مشاهده می‌شوند، به‌عنوان دورای انتشار یافته از اقیانوس هند شناسایی می‌شوند که این امواج ارتفاعی تا مرز ۱/۵ متر و پیوندی بیش از ۱۲ ثانیه و تیزی کم دارند. در ایستگاه میدانی واقع در غرب منطقه مطالعاتی دو دسته پیوند قابل مشاهده هستند. امواج غالب با پیوند کمتر از ۸ ثانیه، ناشی از باد محلی شمال غربی، که پراکندگی و تیزی زیاد بیشتر از ۰/۰۲۵ دارند. انرژی موج در پیوند بالاتر از ۱۰ ثانیه و ارتفاع کمتر از ۱ متر در این منطقه می‌تواند مربوط به امواج اقیانوسی باشد، که می‌تواند در دوره‌های قبل و بعد مونسون بادهای سطح را تغییر دهند. این امواج در تمام فصل‌ها مشاهده می‌شوند. بیشترین ارتفاع موج شاخص در این منطقه نزدیک ۲ متر و پیوند بیک تقریباً بین ۳ تا ۱۵ ثانیه متغیر است. بنابراین مقدار بیشینه ارتفاع موج در غرب منطقه مطالعاتی کمتر از شرق است. حالت واقعی دریا بر اساس تیزی موج و سن موج شناسایی می‌شود. به‌طور مثال بر اساس سن موج داده‌های اندازه‌گیری شده در آب‌های نزدیک سواحل شمال دریای عرب، وجود دوراهای جوان را نشان می‌دهند [۲۶]. در تحلیل میدان موج مورد مطالعه با توجه به سن موج، امواج ناشی از باد محلی زمانی که عکس سن موج بزرگتر از ۰/۸۳ باشد، بادهای قوی تکانه را به امواج منتقل می‌کنند، این امواج با سن موج تقریباً کمتر از ۱/۲ می‌تواند ناشی از باد محلی (امواج جوان یا متأثر از باد) باشد. همچنین امواجی با تیزی کم و سن رو به رشد نشان از امواج بالغ است. رژیم امواجی که عکس سن موج آن کوچکتر از ۰/۱۵ باشد دوراهای سریع می‌تواند باشند که قادرند اندازه حرکت را به لایه هوای نزدیک سطح نیز منتقل کنند. بنابراین امواجی با تیزی کم و سن بالا که پیوندی بالاتر از ۱۰ ثانیه و ارتفاعی کمتر از یک متر دارند، می‌تواند معرف امواج دورای اقیانوس هند باشند. امواج مختلط با حضور هر دو موج، امواج ناشی از

شده است که این پارامتر برای لحاظ کردن اثرات طوفانی (gustiness) و به دست آمدن نرخ رشد معقول نیاز است. همچنین در محدوده‌هایی که اثرات همزمان امواج ناشی از باد (seas) و امواج دورآ (swell) وجود دارد، توصیه می‌شود که از رویکردهایی با در نظر گرفتن سن موج برای مدل‌سازی امواج استفاده شود. بنابراین داشتن اطلاعات دقیق از سن امواج، شرایط دریا و تیزی موج، برای شناخت غیرخطی بودن هندسی میدان موج به دلیل برهم‌کنش‌های غیرخطی موج - موج، در محدوده کمک شایانی به کالیبراسیون مدل‌های انتشار امواج در آینده می‌نمایند.

## ۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه یک بررسی و تجزیه و تحلیل درباره ویژگی‌های موج، در منطقه شمالی دریای عمان ارائه می‌دهد. استنباط‌های به دست آمده از این مطالعه براساس تجزیه و تحلیل جامع داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای دوره از ژانویه تا دسامبر سال ۲۰۱۶ است. ضمن توجه به تطابق خوب بین داده‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل در یک دوره یک‌ساله نشان می‌دهد سواحل شمالی دریای عمان تحت تأثیر امواج اقیانوسی و امواج ناشی از باد، با توجه اثرات پدیده فصلی و منطقه‌ای به‌ویژه اثر مونسون و شکل‌گیری پدیده‌ای موسوم به باد شمال غربی (شمال)، قرار می‌گیرند. با حرکت از شرق منطقه مطالعاتی به سمت غرب محتوای امواج دچار تغییر شده است. طوری که پراکندگی امواج از شرق به سمت غرب رو به افزایش است. همچنین در طول مونسون جهت تابش امواج از جنوب و جنوب غربی است و ارتفاع موج زیر ۰/۵ متر در این دوره تقریباً صفر است. به علت ماهیت متفاوت امواج مونسون، امواج ناشی از باد شمال غربی، در شرق منطقه مطالعاتی سه دسته امواج و در غرب منطقه دو دسته امواج با پریرود متفاوت قابل مشاهده است. در واقع امواج دو اقلیم متفاوت (امواج مونسونی و امواج محلی ناشی از باد شمال غربی) دارند. با حرکت از شرق به غرب محدوده مطالعاتی این تفکیک با دقت بیشتری قابل انجام است. البته علاوه بر امواج مونسونی، امواج با ارتفاع‌های کمتر از ۱ متر که دوره طولانی دارند و از اقیانوس هند می‌آیند، محدوده مورد مطالعه را

تحت تأثیر قرار می‌دهند. دقت میدان باد با توجه به قرارگیری دریای عمان بین سواحل ایران و عمان و نزدیک شدن دو پهنه خشکی در این نواحی با حرکت از شرق (پسابندر) به سمت غرب (تنگه هرمز) کاهش می‌یابد. بیشتر اختلاف در جهت امواج در بازه زمانی قبل و بعد از مونسون رخ می‌دهد. در دوره قبل مونسون امواج ناشی از باد محلی که جهت شمال غربی دارند تأثیرگذار است. طوری که در پایان دوره قبل مونسون باند فرکانسی موج با پریرود کوتاه و بلند به امواج مونسونی با پریرود میانی ۸ تا ۱۲ ثانیه تبدیل می‌شود و در آغاز دوره پس از مونسون امواج پریرود میانی به امواج ناشی از باد محلی با پریرود کوتاه، همچنین امواج اقیانوسی بالغ با پریرود بلند تبدیل می‌شود. در این بازه زمانی علاوه بر امواج محلی ناشی از بادهای شمال غربی امواج ناشی از اقیانوس شروع به شدت گرفتن می‌کند که در نتیجه ادغام امواج اقیانوسی و امواج محلی، مشخصات جهتی امواج تغییرات زیادی می‌کند. برای شناسایی ماهیت حالت دریا بر اساس تیزی موج، در توزیع همزمان عکس سن موج - تیزی موج، داده‌های تجمعی امواج در دوره قبل و بعد مونسون یک گسستگی واضح ۰/۰۱ در تیزی موج را نشان می‌دهند. در دوره قبل مونسون، امواجی با عکس سن بیشتر از ۰/۸۳ مشاهده می‌شوند که دارای پریرود پیک و طول موج کوتاه و تیزی بیشتر از ۰/۲۵ هستند. این امواج می‌توانند ارتفاعی بالاتر از ۱ متر و گاه بالاتر از ۲ متر داشته باشند که مربوط به امواج ناشی از باد محلی شمال غربی هستند. با روند افزایشی تغییرات ارتفاع موج و سن موج در قبل مونسون، پریرود پیک نیز افزایش می‌یابد که امواجی بالغ با پریرود بلند بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه و تیزی کم نیز دیده می‌شوند. پس امواج با عکس سن موج کم، پریرود پیک و طول موج بلند، تیزی کمتر از ۰/۰۱ و ارتفاع محدود در حد ۱ متر، مربوط به امواج دورای اقیانوس هند با جهت جنوب، جنوب شرق و غرب است که با امواج ناشی از باد محلی شمال غربی و غرب با پریرود کوتاه ۵ تا ۷ ثانیه و ارتفاع ۱ تا ۲ متر هم‌زیستی می‌کنند. حالت دریا در فصل قبل مونسون (زمستان و بهار) دارای انحراف معیار زیاد و جهت متنوع با روند ملایم افزایش ارتفاع موج شاخص است. تغییر کوچک در سرعت باد می‌تواند تغییر زیادی در ارتفاع موج ایجاد کند. از ماه می تا ژوئیه روند رشد

## سپاسگزاری

بدین وسیله از داوران، ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک و استادان عزیز که در بهبود کیفیت مقاله راهنمایی و کمک شایانی داشته‌اند، کمال تشکر را دارم.

## مراجع

- [1] DHI. MIKE 21 Spectral Waves FM Module, User Guide., Denmark: DHI; 2009.116 p.
- [2] Earle MD. Development of algorithms for separation of sea and swell. National Data Buoy Center Tech Rep MEC-87-1, Hancock County. 1984;53:1-53.
- [3] Komen GJ, Cavaleri L, Donelan M, Hasselmann K, Hasselmann S, Janssen PA. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press; 1994.
- [4] Chen G, Chapron B, Ezraty R, Vandemark D. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002 Nov 1;19(11): 1849-59.
- [5] Alves JH, Banner ML, Young IR. Revisiting the Pierson-Moskowitz asymptotic limits for fully developed wind waves. *Journal of physical oceanography*. 2003 Jul;33(7): 1301-23.
- [6] Collard F, Ardhuin F, Chapron B. Monitoring and analysis of ocean swell fields from space: New methods for routine observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009 Jul;114(C7).<https://doi.org/10.1029/2008JC005215>.
- [7] Van der Meer JW. Design of concrete armour layers. In: *Proceedings of the coastal structures 1999 Jun 7*. (Vol. 99, p. 213-21).
- [8] Perlin M, Choi W, Tian Z. Breaking waves in deep and intermediate waters. *Annual review of fluid mechanics*. 2013 Jan 3;45(1): 115-45.
- [9] Portilla J, Ocampo-Torres FJ, Monbaliu J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2009 Jan 1;26(1): 107-22.
- [10] Puspita AI, Thaha MA, Pallu MS, Maricar F. Effect of wave steepness to relative wave run-up on OWEC breakwater. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020* (Vol. 419, No. 1, p. 012117). IOP Publishing.
- [11] Hwang PA, Ocampo-Torres FJ, García-Nava H. Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method.

فعالیت امواج دریا و قدرت موج با افزایش ارتفاع موج، حداکثر ارتفاع (۳/۴m) ادامه پیدا می‌کند که به دلیل تشکیل امواج جوان، با کاهش جزئی در دوره اوج نسبت به امواج اقیانوس هند همراه است. این می‌تواند نشان از شروع اثرات مونسون تابستانه باشد. در این دوره با توجه به بادهای موسمی جنوب غربی قوی، تسلط دوراها و امواج مونسونی با عکس سن موج در محدوده ۰/۵-۰/۲ و تیزی کمتر از ۰/۲۵ مشاهده می‌شود. معمولاً حالت مختلط دریا در این فصل با غلبه امواج مونسونی با پیشینه ارتفاع در اواسط جولای، مشاهده می‌شود. پیرو این امواج بین ۱۰ تا ۱۲ ثانیه در شرق منطقه مطالعاتی با جهت غالب جنوب و در غرب منطقه مطالعاتی با جهت غالب جنوب و جنوب شرقی است. در این دوره حتی امواج به دلیل جهت یکنواخت باد، تغییرات کمتری در جهت دارند. این روند تقریباً تا اواخر دوره شهریور ادامه داشته و پس از آن از شدت امواج کاسته می‌شود. در این دوره کمتر از ۲۰٪ امواج با تیزی کمتر از ۰/۰۱ و عکس سن موج کمتر از ۰/۱۵ مربوط به دوراهای سریع اقیانوس هند هستند، که امواج بلند سریع‌تر از باد سطحی حرکت می‌کنند، تکانه می‌تواند از موج اقیانوس به هوای نزدیک سطح منتقل شود. روند تغییرات ارتفاع موج بعد مونسون کاهش می‌یابد. با افزایش تدریجی سن موج و افزایش پیرو پیک، امواج بالغ با تیزی کم به رشد خود ادامه می‌دهند. بنابراین در دوره بعد مونسون با عقب‌نشینی زود هنگام بادهای موسمی و باران‌های موسمی، با پایان مونسون تابستانه، شاهد حاکم شدن دوباره امواج دورای بالغ اقیانوس هند خواهیم بود. که این امواج با عکس سن کمتر از ۰/۸۳ و تیزی کمتر از ۰/۰۱ به همراه امواج ناشی از باد محلی با تیزی نسبتاً زیاد و ارتفاعی تا حد ۱/۵ متر در منطقه مشاهده می‌شوند. به دلیل وزش بادهای موسمی زمستانی در منطقه و همچنین وزش بادهای شمال غربی جهت امواج محلی و دورا پراکنده بوده و این رویداد برای امواج محلی ملموس‌تر است. با این حال مطالعه دقیق و بیشتر، تعامل بین امواج ناشی از باد و دورا باعث درک بهتر حالت دریا می‌شود. شناخت پارامترها و اندازه‌گیری بیشتر می‌تواند به مدل‌سازی دقیق منجر شود، که برای مطالعات مهندس دریا و ساحل بسیار اهمیت دارد.



- [20] Aboobacker VM, Vethamony P, Rashmi R. "Shamal" swells in the Arabian Sea and their influence along the west coast of India. *Geophysical Research Letters*. 2011 Feb;38(3).
- [21] Edson J, Crawford T, Crescenti J, Farrar T, Frew N, Gerbi G, Helmis C, Hristov T, Khelif D, Jessup A, Jonsson H. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2007 Mar;88(3): 341-56.
- [22] Donelan MA, Dobson FW, Smith SD, Anderson RJ. On the dependence of sea surface roughness on wave development. *Journal of physical Oceanography*. 1993 Sep 1;23(9): 2143-9.
- [23] Hanley KE, Belcher SE, Sullivan PP. A global climatology of wind-wave interaction. *Journal of physical oceanography*. 2010 Jun;40(6): 1263-82.
- [24] Kumar VS, Pathak KC, Pednekar PN, Raju NS, Gowthaman R. Coastal processes along the Indian coastline. *Current science*. 2006 Aug 25: 530-6.
- [25] Sanil Kumar V, Sajiv Philip C, Balakrishnan Nair TN. Waves in shallow water off west coast of India during the onset of summer monsoon. *Annales Geophysicae*. 2010 Mar 19; 28(3):817-24.
- [26] 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.
- [27] Thompson TS, Nelson AR, Sedivy D G. Wave group anatomy. *Proceeding of 19th conference on Coastal engineering*. American Society of Civil Engineers:1984;(1): 661-7.
- [12] Wang DW, Hwang PA. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001 Dec 1;18(12): 2052-62.
- [۱۳] عباسی محمودرضا. ارزیابی دو مدل عددی موج در پیش‌بینی ارتفاع امواج شمال دریای عمان. دو فصلنامه هیدروفریزیک؛ تابستان ۱۳۹۹: ۳۵-۴۳.
- [14] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 SW Reference Manual, MIKE by DHI, Manual Mesh Generator; MIKE Zero. Hørsholm, Denmark; 2023.
- [15] Kalantari H, Lari K, Arasteh A M and Torabi MA. Wave Hindcasting in the Southeastern Coasts of Iran (55.2019). *Marine Technology Society Journal*. 2022 Feb; 56(1): 83-97.
- [16] Hasselmann S, Hasselmann K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography*. 1985 Nov 1;15: 1369-77.
- [17] Ardhuin F, Herbers TH. Bragg scattering of random surface gravity waves by irregular seabed topography. *Journal of Fluid Mechanics*. 2002 Jan;451:1-33.
- [18] DHI. MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide. Hørsholm, Denmark: DHI Water Environment Health; 2015.
- [19] Chen G, Chapron B, Ezraty R, Vandemark D. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002 Nov 1;19(11): 1849-59.

#### پی‌نوشت‌ها

1.NDBC

2.Sea States