

## اعتبارسنجی طیفی و آماری امواج ناشی از باد شمال زمستانی با استفاده از روش SPM و مدل سازی هم زمان جو و موج به وسیله COAWST

محمد پاخیزدن<sup>۱</sup>، مریم راهبانی<sup>۲\*</sup>، حسین ملکوتی<sup>۳</sup>

mht\_pa@yahoo.com

maryamrahbani@yahoo.com

hos\_malakooti@yshoo.com

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۴

### چکیده

امواج ناشی از باد، پیچیده ترین نوع امواج در طیف امواج دریایی هستند و برآورد و پیش بینی آن‌ها در شرایط خاص مانند بادهای شدید و طوفان‌ها اهمیت بسیاری دارد. در این تحقیق ارتفاع و دوره تناوب امواج در دوره وزش باد شمال زمستانی در ژانویه ۲۰۱۵ در شمال غرب خلیج فارس با توجه به برآورد امواج به روش SPM و شبیه سازی عددی به وسیله مدل هم زمان جو و موج COAWST از نظر طیفی و آماری بررسی شد. شروع پدیده باد شمال زمستانی هم زمان با عبور یک جبهه سرد از روی خلیج فارس، همراه با افزایش سرعت باد است و جهت وزش باد شمال تا شمال غربی می شود. با توجه به بررسی نتایج شبیه سازی ارتفاع و دوره تناوب موج و محاسبه خطاها، مدل هم زمان جو و موج COAWST نسبت به روش SPM برآورد بهتری را ارائه می کند. در هر دو روش طیف فرکانسی منطقه مورد مطالعه از نوع تک قله ای است و بیشینه طیفی در پایین دست بیشینه طیف محاسبه شده از داده های مشاهداتی پیش بینی شده است. همچنین طیف فرکانسی منطقه مورد مطالعه در مقایسه با طیف های نظری معتبر، هماهنگی نزدیکی با طیف جان سوآپ دارد.

واژه های کلیدی: روش SPM، COAWST، طیف موج، باد شمال زمستانی، خلیج فارس

### ۱. مقدمه

دوره تناوب نامنظم می شود. با توجه به این ویژگی خاص باد، سطح دریا به طور دائم متغیر است، بدین معنی که نمی توان یک رویکرد قطعی برای توصیف سطح دریا به کار برد. ارتفاع سطحی امواج در اقیانوس، در هر زمان و مکان، می تواند به عنوان مجموع تعداد زیادی از امواج هارمونیک دیده شود که هر کدام از آن‌ها با بادهای توربولانسی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف به وجود آمده اند [۲].

امواج ناشی از باد، عمده ترین امواج مشاهده شده در دریا بوده و بیشترین اثر را بر فعالیت های بشری در محیط دریا دارند. فرایند رشد موج علاوه بر سمت و سرعت باد، به مدت زمان وزش باد و طول موجگاه<sup>۱</sup> بستگی دارد [۱]. هنگام وزش باد، انرژی به صورت ایجاد جریان و موج سطحی نمود می یابد. همچنین طبیعت نامنظم باد باعث ایجاد امواجی با ارتفاع و

نتایج مدل‌های عددی جوی استفاده کرد. مدل هیدرودینامیکی منطقه‌ای WRF<sup>۳</sup> به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی عددی جوی با وضوح زمانی و مکانی بالا طراحی و ارائه شده است [۱۳].

امروزه مدل‌های واسطه‌ای طراحی و ارائه شده‌اند که می‌توانند به‌طور هم‌زمان، جو و موج را شبیه‌سازی کنند. اجرای هم‌زمان شبیه‌سازی‌های جو و موج نسبت به اجرای غیرهم‌زمان آن‌ها، به علت نزدیک‌تر بودن به شرایط واقعی دقت بیشتری دارد. یکی از مدل‌های ارائه‌شده در زمینه شبیه‌سازی هم‌زمان جو و موج، مدل COAWST<sup>۴</sup> است که مدل پیش‌بینی و تحقیق آب و هوایی WRF و مدل نسل سوم امواج اقیانوسی سوان را با یک ابزار واسطه MCT<sup>۵</sup> هم‌پوشانی می‌کند [۱۴].

از دیگر روش‌های برآورد امواج، استفاده از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی پیش‌بینی موج است که به‌صورت روابط محاسباتی و در اثر تحقیقات واقعی به دست آمده‌اند. این روابط و منحنی‌ها، اولین بار برای پیش‌بینی مشخصه‌های امواج ناشی از باد در زمان جنگ جهانی دوم مطرح شدند و همچنان در حال توسعه و تکامل هستند. روش طیفی برآورد و پیش‌بینی موج SPM یکی از این روش‌هاست. در این روش، با در نظر گرفتن اثر اصطکاک و نفوذپذیری بستر دریا و روابط ارائه‌شده، می‌توان ارتفاع و دوره تناوب موج را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد [۶].

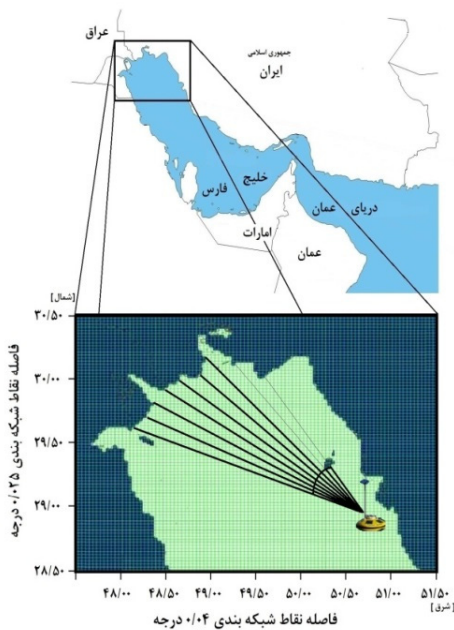
در این تحقیق برآورد ارتفاع و دوره تناوب موج با استفاده از شبیه‌سازی عددی با مدل هم‌زمان جو و موج COAWST و روش طیفی SPM در مدت زمان وزش باد شمال زمستانی در شمال غرب خلیج فارس در ماه ژانویه سال ۲۰۱۵ انجام شد. نتایج حاصل، با داده‌های مشاهداتی بویه موج‌نگار منطقه دور از ساحل بوشهر به‌منظور اعتبارسنجی هر دو روش مقایسه شد. در ادامه، طیف فرکانسی موج با توجه به داده‌های مشاهداتی، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش طیفی SPM، محاسبه و رسم شد و با طیف‌های معتبر جهانی مانند جان‌سوآپ، برتشنايدر و اوشی<sup>۶</sup> مقایسه شد.

باد شمال یک باد موسمی، سیستماتیک، مداوم و قوی در منطقه خلیج فارس است که می‌تواند چند روز بوزد و برابر با نیروی طوفان، امواجی به ارتفاع سه تا چهار متر در یک دریای باز ایجاد کند [۳]. باد شمال در دو نوع تابستانی و زمستانی است. باد شمال تابستانی اغلب بین ماه‌های می تا جولای می‌وزد و می‌تواند تا سپتامبر هم ادامه داشته باشد. باد شمال زمستانی در بازه زمانی دسامبر تا ابتدای ماه مارس اتفاق می‌افتد و می‌تواند بر اساس مدت زمان وزش، در دو نوع کلی مشخص شود. مدت دوام یکی از آن‌ها در حدود یک تا سه روز و دیگری در حدود سه تا پنج روز است [۴-۵].

امواجی که تحت تأثیر تنش برشی باد ایجاد می‌شوند، نیروی مضاعفی را به سازه‌های ساحلی و فراساحلی وارد می‌کنند و تجزیه و تحلیل آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶]. برای تعیین مشخصات موج در مکانی که میدان باد آن معلوم است، می‌توان از مدل‌سازی عددی و روش‌های طیفی استفاده کرد. همچنین می‌توان میدان امواج را به‌صورت حاصل جمع امواج سینوسی که دارای بسامدهای مختلف هستند را بیان کرد [۷]؛ این جمله اساس تعریف طیف انرژی موج را تشکیل می‌دهد. این طیف، منحنی تغییرات انرژی بر حسب فرکانس موج است که توزیع انرژی را به‌صورت تابعی از فرکانس موج بیان می‌کند. در واقع طیف موج، نمودار انرژی موج در هر مؤلفه از دوره تناوب یا فرکانس است [۸].

امروزه استفاده از مدل‌سازی عددی برای پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی، به امری رایج تبدیل شده است [۹]. یکی از انواع مدل‌ها که برای شبیه‌سازی امواج نزدیک ساحل به کار می‌رود، مدل سوان<sup>۲</sup> است. اگر چه این مدل در اصل برای محیط‌های ساحلی طراحی شده است، اما یک مدل ایده‌آل برای استفاده در محیط‌های نیمه بسته دریایی نیز به شمار می‌رود [۱۰]. هولسوویجنس و همکاران، مدل سوان را به‌عنوان یک مدل با تفکیک مکانی-زمانی بالا ارتقا دادند [۱۱]. این مدل دامنه وسیعی از گزینه‌های پیکربندی برای اجرای برنامه‌های متنوع را برای کاربر فراهم می‌کند [۱۲]. از طرفی هر چه میدان باد ارائه شده به مدل موج دقیق‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی امواج افزایش می‌یابد. به این منظور می‌توان از

اصطکاک بستر و شکست ناشی از عمق و کف روی موج است [۱۸]. حاجی بابایی و همکاران در مقاله‌ای به ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی امواج ناشی از باد و ارائه مدل مناسب برای آب‌های ساحلی شهرستان بابلسر پرداختند. محققان بیان کردند که بهترین هماهنگی بین داده‌های مشاهداتی و نتایج به‌دست‌آمده از روش پیش‌بینی موج SBM است و با توجه به اینکه طیف پیرسون-مسکوویچ برای دریای کاملاً توسعه یافته به کار می‌رود، دارای صد در صد خطا است. روش جان‌سوآپ نیز دارای خطای بیشتری نسبت به روش SBM است [۱۹]. نجارپور و همکاران به بررسی خصوصیات طیف موج ناشی از باد در منطقه عسلویه پرداختند و گفتند که مقایسه طیف اندازه‌گیری شده با طیف موج برآورد شده نشان می‌دهد که بهترین انطباق بین طیف داده‌های اندازه‌گیری با طیف جان‌سوآپ وجود دارد [۲۰]. الله‌دادی و همکاران به بررسی الگوهای طیفی موج در اثر یک طوفان شدید با استفاده از مدل موج طیفی از مجموعه مایک، پرداختند و مشخصات امواج ناشی از طوفان گونو (۲۰۰۷) را در امتداد سواحل شمال دریای عمان در خلیج چابهار شبیه‌سازی کردند. سپس گفتند پارامترهای طیف جان‌سوآپ برای سازگاری با شرایط طوفان، اصلاح شده و طیف موج قابل‌اعتماد برای منطقه مورد مطالعه در زمان وقوع طوفان که سازگار با شرایط امواج باشد ارائه کرده‌اند [۲۱].



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

در زمینه مدل‌سازی عددی و تحلیل طیفی امواج، تحقیقات قابل توجهی به انجام رسیده است. مونتایا و همکاران در پژوهشی به مقایسه بین دو مدل متداول اقیانوسی WAVEWATCH III و سوان و تحلیل طیفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج تحت تأثیر باد شدید (طوفان کاترینا در خلیج مکزیک) پرداختند. آن‌ها در مطالعاتشان نشان دادند که مدل سوان مقادیر حداکثر ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب را بیش از حد واقعی پیش‌بینی می‌کند و هنگامی که باد سرعت بیشتری دارد، مدل WAVEWATCH III عملکرد بهتری دارد [۱۵]. در تحقیقی از فرجامی و همکاران با استفاده از مدل سوان به مطالعه امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر و اعتبارسنجی آن پرداخته شد. محققان این پژوهش عنوان کردند که از مدل سوان می‌توان با دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد و تهیه اطلس هیدرودینامیکی منطقه ساحلی بوشهر استفاده کرد [۱]. رجبی و همکاران به مدل‌سازی امواج ناشی از باد در منطقه انزلی با استفاده از مدل سوان پرداختند. آن‌ها برای ورودی مدل سوان از داده‌های باد ECMWF استفاده کردند و بیان نمودند نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج به وسیله سوان تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد، ولی قله امواج پایین‌تر از داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی شده است. بنابراین پیشنهاد کردند در صورت استفاده از نتایج این تحقیق باید از یک ضریب اصلاحی استفاده شود [۱۶]. رضایی و همکاران در پژوهشی به بررسی امواج در محدوده بین جزایر قشم و هرمز با استفاده از مدل سوان اقدام نمودند و براساس نتایج به‌دست‌آمده تأکید کردند که سفیدک رأس موج نقش کلیدی در کالیبراسیون مدل سوان ایفا می‌کند [۱۷]. کالیسکن و لوینسون به بررسی دگرگونی و تغییر شکل امواج ناشی از باد در یک خلیج طویل (خلیج کانسپسیون در کالیفرنیا) با استفاده از مدل سوان پرداختند و در تحقیقشان عوامل مؤثر بر تضعیف و میرایی امواج را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گفتند که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، علت تغییر دوره تناوب امواج در نقاط مختلف خلیج، پراکندگی امواج دورآ در میانه خلیج است و علت اصلی تضعیف امواج، مسدود شدن موج به علت تغییر جهت خط ساحلی، انکسار،

## ۲. مواد و روش‌ها

## ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

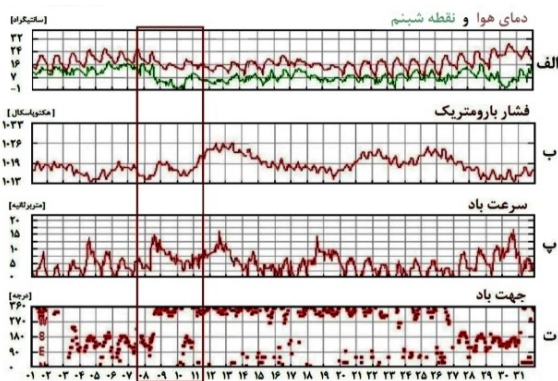
منطقه شمال غرب خلیج فارس، بین ۲۸/۵۰ درجه تا ۳۰/۵۰ درجه شمالی و ۴۷/۵۰ درجه تا ۵۱/۵۰ درجه شرقی به عنوان منطقه مورد مطالعه، برای بررسی برهم کنش جو و موج انتخاب شد. این محدوده از شمال و شرق به ایران، از شمال غربی به عراق و از غرب به کویت محدود شده است و تقریباً ۷۸ درصد آن شامل آب‌هایی با عمق کمتر از ۲۰ متر می‌شود (شکل ۱).

## ۲-۲. باد شمال زمستانی

باد شمال زمستانی، بادی شمالی تا شمال غربی است که به طور عمده روی کشور عراق و خلیج فارس می‌وزد و قسمت‌هایی از غرب آسیا را هم در بر می‌گیرد. این باد در طول روز قوی است ولی قدرت آن در شب کاهش می‌یابد. در فصل سرد، هنگامی که یک طوفان گذرا به همراه یک جبهه سرد و قوی از کوهستان‌های ترکیه عبور می‌کند، لبه جلویی توده هوای سرد، گردوغبار و شن را تحریک می‌کند و آن‌ها را به حالت معلق در هوا پراکنده می‌کند. بعد از عبور جبهه سرد یک باد شمال تا شمال غربی رخ می‌دهد که می‌تواند چند روز ادامه داشته باشد [۲۲]. باد شمال زمستانی همراه با قوت گرفتن یک الگوی پرفشار در سواحل جنوبی خلیج فارس و پایداری یک الگوی کم‌فشار روی مناطقی از شرق آن تشکیل می‌شود. این باد همراه با اختلالات عرض‌های میانی که اغلب از غرب به شرق گسترده می‌شود، بین نوامبر تا مارس رخ می‌دهد. باد شمال زمستانی در ادامه عبور یک جبهه سرد گذرا تشکیل می‌شود و مشخصه آن یک باد نسبتاً قوی از سمت شمال تا شمال غرب است [۲۳]. رخداد شمال زمستانی همراه با اثرات کشندی، می‌تواند موجب خیزاب ناشی از طوفان شود و تغییرات قابل توجهی در سطح دریا تا چند متر ایجاد کند [۲۴].

با توجه به اینکه باد شمال زمستانی در ادامه عبور یک جبهه سرد و قوی رخ می‌دهد، برای درک بازه وزش باد شمال زمستانی، نشانه‌های عبور یک جبهه سرد در فاصله سه ماه، از

ژانویه تا مارس ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ اطلاعات مربوط به ماه ژانویه را نشان می‌دهد. از مشخصات عبور جبهه سرد، افت دما و اختلاف دمایی با نقطه شبنم (شکل ۲-الف)، افت ناگهانی فشار (شکل ۲-ب) و افزایش سرعت باد است (شکل ۲-پ). همچنین مهم‌ترین مشخصه آن روی خلیج فارس جهت شمال تا شمال غربی باد است (شکل ۲-ت). کادر قرمز رنگ در شکل ۲، شواهد عبور جبهه سرد و باد شمال زمستانی را برای روزهای ۶ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد [۲۵].



شکل ۲. نمودار الف) دمای هوا و نقطه شبنم، ب) فشار بارومتریک، پ) سرعت باد و ت) جهت وزش باد در ژانویه ۲۰۱۵ [۲۵] (کادر قرمز رنگ بازه وزش باد شمال زمستانی را نشان می‌دهد)

## ۲-۳. مدل هم‌زمان جو و موج COAWST

مجموعه COAWST به عنوان یک مدل جفت شده، شامل مدل جوی WRF، مدل موج طیفی سوان و نرم افزار MCT به عنوان یک ابزار هم‌پوشاننده برای تبادل داده‌ها بین مدل‌های جو و موج است. تجربه به دست آمده با استفاده از مدل‌سازی فرایندهای میان‌مقیاس با استفاده از مدل جفت شده COAWST نشان می‌دهد که با توجه به ویژگی‌های باد و موج، عواملی مانند موقعیت و اندازه دامنه شبیه‌سازی، وضوح مکانی و شرایط اولیه می‌تواند بر نتایج مدل‌سازی تأثیر گذار باشد [۱۴].

## ۲-۳-۱. مدل WRF

WRF یک سامانه کارآمد پیش‌بینی عددی وضع هوا و شبیه‌سازی جو است که برای کاربردهای پژوهشی و عملیاتی طراحی شده است [۱۳]. مدل WRF دو کلاس بزرگ

تاریخ و زمان وابسته است. اجرای مدل WRF در حالت واقعی دارای دو بخش به صورت برنامه اولیه و برنامه انتگرال‌گیری است.

برنامه اولیه برون‌داد برنامه Metgrid را به عنوان داده‌های ورودی دریافت می‌کند. با اجرای این برنامه، داده‌ها از مختصات فشاری به مختصات سیگما تغییر می‌یابند. در اجرای برنامه اولیه، طرح‌واره‌های<sup>۱۱</sup> فیزیکی مناسب فصل و منطقه، مانند پارامترهای مختلف دینامیکی، پارامترسازی لایه سطحی<sup>۱۲</sup> و پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای<sup>۱۳</sup>، به کار گرفته می‌شود که بیشترین تأثیر را روی میدان باد لایه مرزی و پیکربندی‌های فیزیکی مدل جوی دارند. برنامه انتگرال‌گیری برون‌داد برنامه اولیه را دریافت می‌کند و با اجرای این برنامه کمیت‌های جوی برای زمان‌های مورد نظر و روی ترازهای تعریف شده با مدل شبیه‌سازی می‌شوند [۱۳].

### ۲-۳-۲. مدل موج سوان

سوان به عنوان یک مدل موج طیفی، به‌طور خاص برای آب‌های کم عمق طراحی شده است، هرچند برای استفاده در محیط‌های نیمه بسته دریایی نیز بسیار ایده‌آل است [۲۶]. سوان تولید و انتشار امواج ناشی از باد را در آب‌های ساحلی شبیه‌سازی می‌کند و شامل فرایندهای انکسار، پراش، استهلاك ناشی از کم عمق شدن، برهم کنش‌های سه‌گانه و چهارگانه موج-موج، استهلاك در اثر ایجاد سفیدک قله موج، استهلاك ناشی از شکست موج و استهلاك ناشی از اصطکاک بستر است. مدل موج سوان معادله تعادل حرکت را به صورت رابطه ۱ حل می‌کند [۲۷].

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S(\theta, \sigma)}{\sigma} \quad (1)$$

در این رابطه،  $N(\sigma, \theta, x, y, t)$  طیف حرکت چگالی است؛  $\sigma$  فرکانس نسبی رادیان است (همان‌طور که در یک قاب در حال حرکت با جریان اقیانوسی مشاهده می‌شود)؛  $\theta$  جهت عمود بر قله موج است؛  $x$  و  $y$  مختصات مکان هستند (قابل بیان در هر دو مختصات کروی و دکارتی) و  $t$  زمان است.  $C_x$  و  $C_y$  سرعت‌های انتشار در جهت  $x$  و  $y$  هستند. جمله  $S(\sigma, \theta)$  معادله منبع چگالی انرژی است [۱]. رابطه ۲ تمام فرایندهای

شبیه‌سازی دارد که می‌تواند هم شبیه‌سازی‌هایی با داده‌های ایده‌آل و هم شبیه‌سازی‌هایی با داده‌های واقعی تولید کند. در شبیه‌سازی‌های با داده‌های ایده‌آل، توپوگرافی به صورت ساده فرض می‌شود، ولی در شبیه‌سازی با داده‌های واقعی، به یک سامانه پیش‌پردازشگر (WPS<sup>y</sup>) نیاز است تا همه میدان‌های جوی و ثابت را به نحو مقتضی ایجاد کند [۱۳].

وظیفه پیش‌پردازشگر WPS آماده‌سازی اجزای مختلف مدل WRF برای استفاده در قسمت شبیه‌سازی داده‌های واقعی<sup>۸</sup> است. WPS دارای سه برنامه مجزا شامل Geogrid، Ungrib و Metgrid است.

هدف برنامه Geogrid، تعیین دامنه‌های شبیه‌سازی و وارد کردن مجموعه داده‌های زمینی گوناگون روی شبکه مدل است. دامنه‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های تعیین شده توسط کاربر تعریف می‌شوند. محاسبه طول، عرض و فاکتورهای مقیاس نقشه در هر نقطه از شبکه، انواع خاک، نوع کاربری زمین، ارتفاع منطقه، میانگین سالیانه دمای خاک در عمق‌های متفاوت، درصد پوشش گیاهی ماهانه و بیشترین مقدار سپیدایی، با برنامه Geogrid برای شبکه‌های مدل به صورت پیش فرض تعریف می‌شود. برون‌داد این برنامه، پوشه‌هایی با قالب NetCDF<sup>۹</sup> است که هر کدام از این پوشه‌ها به یک دامنه تعلق دارد [۱۳]. برنامه Ungrib، پوشه‌های با قالب خواننده و به یک قالب استاندارد تبدیل می‌کند. GRIB ها، فایل‌هایی به شکل شبکه‌بندی دوتایی هستند که داده‌های هواشناسی گذشته یا پیش‌بینی شده، به شکل منظم و فشرده در آن‌ها ذخیره شده است. فایل‌های GRIB، میدان‌های هواشناسی را که با زمان تغییر می‌کند، شامل می‌شوند. پس از اجرای این برنامه، فایل‌هایی حاوی تاریخ و زمان تولید می‌شود [۱۳]. برنامه Metgrid، داده‌های هواشناسی قالب میانی را که با برنامه Ungrib استخراج می‌شوند، به روی دامنه‌های شبیه‌سازی تعریف شده با برنامه Geogrid به صورت افقی درون‌یابی می‌کند. به‌طور کلی برنامه Metgrid، برون‌داد دو برنامه دیگر را به عنوان ورودی دریافت کرده و با درون‌یابی افقی از میدان‌ها و انتقال کمیت‌ها روی شبکه مدل، فایل‌هایی تولید می‌کند که به



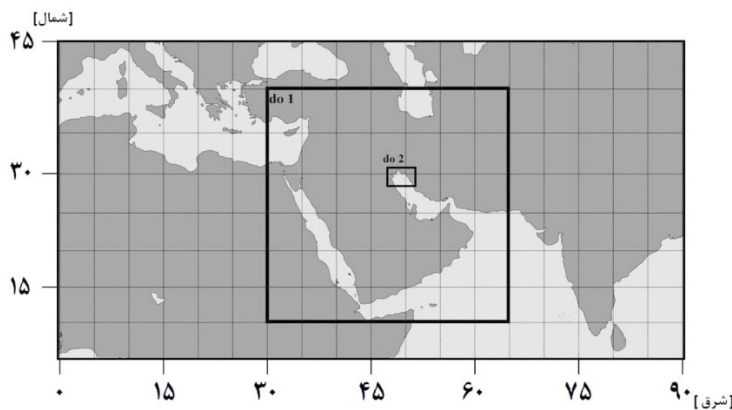
ملی پیش‌بینی زیست‌محیطی ایالات متحده NCEP<sup>۱۵</sup>، به دست آمد.

برای مدل موج، از داده‌های بویه موج‌نگار بوشهر در موقعیت ۲۸/۶۲ درجه شمالی و ۵۰/۸۰ درجه شرقی و برای ژانویه ۲۰۱۵، به‌عنوان مرجع واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شده است. این داده‌ها شامل فشار سطح دریا، رطوبت سطح، دمای هوا و نقطه شبنم، سرعت و جهت جریان آب، ارتفاع موج شاخص، دوره تناوب، جهت پیشروی موج، سرعت و جهت باد است که از سوی سازمان بنادر و دریانوردی در دسترس قرار گرفت.

### ۲-۳-۵. صحت‌سنجی و اجرای مدل COAWST

به‌منظور نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی به مقادیر واقعی، مدل باید برای یک دوره زمانی با توجه به داده‌های مشاهداتی صحت‌سنجی می‌شد. به‌همین منظور، یک بازه زمانی به مدت ۷۲ ساعت، از ۸ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵ برای شبیه‌سازی منطقه‌ای باد شمال زمستانی و موج ناشی از آن با COAWST انتخاب شد.

به‌منظور شبیه‌سازی میدان باد به‌وسیله مدل WRF، در ابتدا با استفاده از ابزار پیش‌پردازش WPS، دو دامنه تودرتو، طراحی شد (شکل ۳). دامنه بیرونی (۱۲۶×۱۳۰: Nx × Ny) با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر و گام زمانی ۱۸۰ ثانیه، منطقه فعالیت باد شمال را پوشش می‌دهد (do1 در شکل ۳) و دامنه داخلی با تفکیک افقی ۹ کیلومتر (۳۷×۴۳: Nx × Ny) و گام زمانی ۶۰ ثانیه، منطقه اثر باد شمال بر الگوی امواج را در بر گرفته است (do2 در شکل ۳). دامنه کوچک‌تر مدل جوی، منطبق بر دامنه شبیه‌سازی مدل موج سوان است.



شکل ۳. دامنه‌های مدل جوی در شبیه‌سازی هم‌زمان (دامنه کوچک‌تر منطبق بر دامنه مدل موج است)

فیزیکی که موجب تولید، استهلاک یا بازپخش انرژی موج می‌شوند را نشان می‌دهد که در پارامتر  $S_{tot}$  خلاصه می‌شوند:

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $S_{wind}$  ورودی انرژی توسط باد (رشد خطی یا نمایی توسط باد)،  $S_{nl3}$  و  $S_{nl4}$  به ترتیب، انتقال غیرخطی انرژی موج تحت برهم‌کنش سه‌گانه و چهارگانه،  $S_{wc}$  استهلاک موج در اثر سفیدک قله موج،  $S_{bot}$  اصطکاک بستر و  $S_{db}$  شکست موج ناشی از کاهش عمق را نشان می‌دهد [۱۶].

### ۲-۳-۳. ابزار اجرای هم‌زمان MCT

به‌منظور مبادله یا انتقال داده‌های مختلف بین مدل‌های جوی و موج، از ابزار اجرای هم‌زمان MCT، با یک رویکرد اجرای موازی استفاده می‌شود [۲۸]. برنامه MCT، به‌عنوان مجموعه‌ای از ابزارهایی که در طول اجرای مدل‌ها با هم مرتبط هستند، مسیر مبادله بین مؤلفه‌های مدل‌ها را مشخص می‌کند و آن‌ها را انتقال می‌دهد. متغیرهای مبادله شده در مدل‌سازی هم‌زمان جو و موج به‌وسیله COAWST، طوری است که مدل جوی مؤلفه‌های باد را در ارتفاع ۱۰ متری از سطح  $(U_{10}, V_{10})$  برای مدل موج ارسال می‌کند و از طرفی مدل موج، ارتفاع موج شاخص  $H_s$ ، دوره تناوب شاخص  $T_s$  و طول موج  $L_p$  را برای مدل جوی آماده می‌کند.

### ۲-۳-۴. اطلاعات پایه

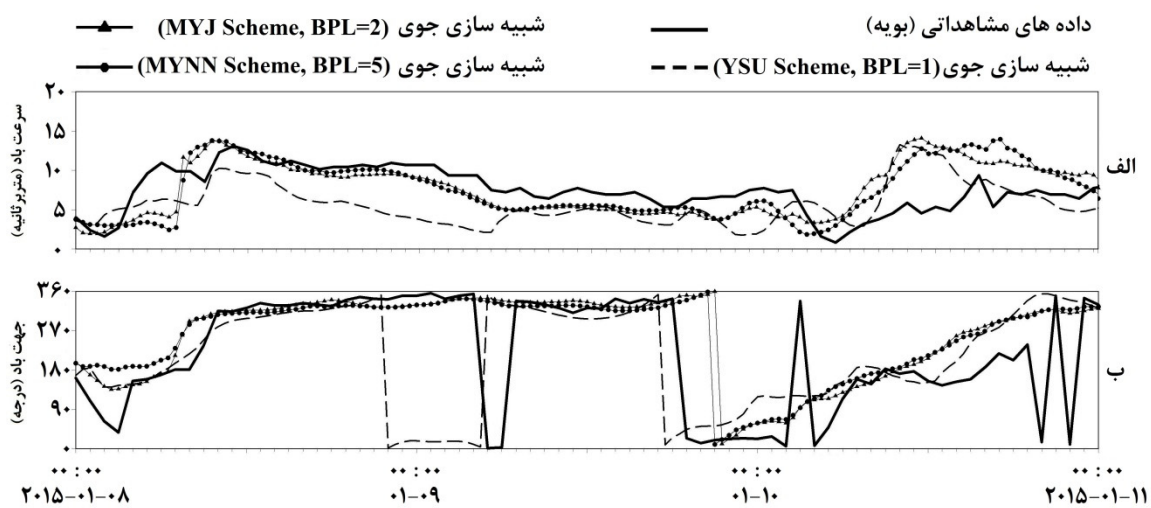
در این مطالعه، شرایط اولیه و مرزی برای مدل جوی در اجرای مدل هم‌زمان، از داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی<sup>۱۴</sup> GFS با وضوح ۰/۵ درجه‌ای و از تجزیه و تحلیل نهایی مرکز

استخراج نتایج مشاهده شد که نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از طرح‌واره MYNN در مقایسه باد و طرح‌واره دیگر دقت بیشتری را نشان می‌دهد (شکل ۴).

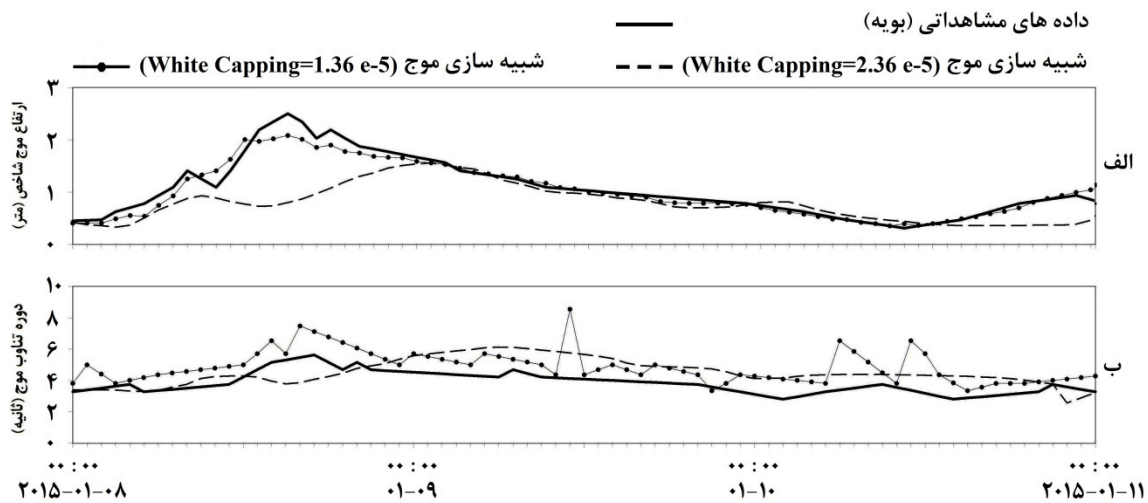
مدل موج سوان در دستگاه مختصات کروی اجرا شد. اتلاف انرژی توسط سفیدک رأس موج و زبری بستر، به‌عنوان مبنای واسنجی مدل سوان در این مطالعه انتخاب شدند. برای ضریب اتلاف انرژی توسط سفیدک رأس موج، مقدارهایی بین  $10^{-5}$  تا  $2/35 \times 10^{-5}$  در نظر گرفته شد که بهترین مقدار با توجه به داده‌های مشاهداتی در محل بویه موج‌نگار بوشهر،  $10^{-5} \times 1/35$  به دست آمد. برای اصطکاک بستر نیز پس از بررسی نتایج با استفاده از مقدارهای مختلف، از مقدار  $0/02$  استفاده شد. این محاسبات با گام زمانی ۳۰ دقیقه اجرا شد. شبکه محاسباتی مدل سوان در این مطالعه به‌صورت منظم با طول ۴ درجه و عرض ۲ درجه به  $100$  شبکه در طول و  $100$  شبکه در عرض تقسیم شد. اندازه هر یک از شبکه‌های طولی  $3590$  متر ( $0/04$  درجه) و هر شبکه در عرض  $2770$  متر ( $0/25$  درجه) است (شکل ۱) و بیشترین عمق در محدوده محاسباتی  $55$  متر است. نتایج شبیه‌سازی امواج در دوره واسنجی مدل هم‌زمان در شکل ۵ نشان داده شده است.

طرح‌واره‌های فیزیکی که برای مدل جوی در نظر گرفته شده شامل میکروفیزیک<sup>۱۶</sup> [۲۹]، تابش طول‌موج کوتاه [۳۰] و تابش طول‌موج بلند<sup>۱۷</sup> [۳۱]، مدل سطحی خاک<sup>۱۸</sup> [۳۲]، لایه سطحی [۳۳] و پارامتریزه کردن ابرهای کومولوس<sup>۱۹</sup> [۳۴] است. برای پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای و به‌منظور رسیدن به بهترین هماهنگی بین نتایج مدل و داده‌های مشاهداتی، سه طرح‌واره موجود در مدل WRF شامل  $YSU^{20}$  [۳۵]،  $MYJ^{21}$  [۳۶] و  $MYNN^{22}$  [۳۷] به‌صورت مجزا استفاده شدند.

هنگام استفاده از طرح‌واره YSU، یک اختلاط عمودی عمیق با توجه به حرکت لایه‌های مرزی سیاره‌ای اتفاق می‌افتد، ولی تأثیر بادهای شدید کم است. طرح‌واره MYJ تصویر واقع‌بینانه‌ای از دمای پتانسیل، ارتفاع و حرکت لایه‌های مرزی سیاره‌ای در شبیه‌سازی وارد می‌کند و زمان محاسبات از طرح‌واره YSU کمتر است. طرح‌واره MYNN نیز با سرعت بیشتری نسبت به طرح‌واره‌های قبلی، محاسبات را انجام می‌دهد و با دقت بیشتری اختلاط‌های لایه‌های مرزی سیاره‌ای را در شبیه‌سازی وارد می‌کند [۳۸]. پس از اجرای مدل جوی با استفاده از طرح‌واره‌های مختلف برای لایه‌های مرزی سیاره‌ای و



شکل ۴. مقایسه (الف) سرعت و (ب) جهت باد شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی مدل COAWST



شکل ۵. مقایسه (الف) ارتفاع موج شاخص و (ب) دوره تناوب موج شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهده‌ای در دوره واسنجی مدل COAWST

## ۲-۴. طیف موج

$$\alpha \approx - \left[ \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - \frac{(0.185)}{1.9+\gamma}} \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}, \quad \beta = e^{-\left[ \frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]}$$

در رابطه (۳)،  $H_s$  ارتفاع موج شاخص،  $f$  فرکانس موج،  $f_p$  فرکانس پیک طیف و  $\gamma$  و  $\sigma$  ضرایب ثابت هستند. طیف جان‌سوآپ توسط  $\gamma$  که به ضریب ارتقای قله معروف است، مشخص می‌شود. این ضریب، تیزی قله طیفی را کنترل می‌کند. مقدار  $\gamma$  بین ۱ تا ۷ و با میانگین ۳/۳ متغیر است. اوشی طیف جان‌سوآپ را برای شرایط طوفانی کالیبره کرد و مقادیر زیر را برای این طیف ارائه نمود [۴۱]:

$$\alpha = 4.5 H_s^2 f_p^4, \quad \gamma = 9.5 H_s^{0.34} f_p \quad (۴)$$

طیف برتشنايدر بر اساس امواج ناشی از باد در طول موج‌گاه محدود ارائه شده است. این طیف برای تخمین طیف موج با استفاده از ارتفاع و دوره تناوب موج به کار می‌رود. رابطه طیف برتشنايدر به صورت زیر است [۴۲]:

$$S(f) = \frac{5}{16} H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \quad (۵)$$

## ۲-۵. روش پیش‌بینی موج SPM

روابط ارائه‌شده در روش SPM به منظور محاسبه ارتفاع موج شاخص و پریرود بیشینه در آب عمیق ( $h/L > 1/2$ ) به شکل

طیف‌های انرژی تک‌جهته امواج بر مبنای دو مؤلفه اصلی موج، یعنی ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب موج، مشخص می‌شوند. طول موج گاهی به همراه سرعت بادی که بر آن می‌وزد، تعیین‌کننده اندازه موج‌های تولیدشده در دریاست [۱]. همچنین اگر جهت وزش باد در طول عمر یک موج، همواره از یک جهت باشد، قدرت آن موج بیشتر خواهد بود. طیف پیرسون-مسکویچ برای دریاهای آزاد با طول موج‌گاه نامحدود توصیه شده است و این طیف نشان‌دهنده شرایط موج کاملاً نمو یافته<sup>۲۳</sup> در اثر وزش باد ثابت طی مدت‌زمان کافی است، به طوری که سرعت باد باید برای مدت معین بین ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه باشد [۳۹]. با توجه به نمودار سرعت باد در بازه رخداد شمال زمستانی (شکل ۲-ب)، این طیف در مطالعه حاضر کاربرد ندارد.

طیف جان‌سوآپ برای دریاهای با طول موج‌گاه محدود به کار می‌رود. این طیف از پروژه‌های تحقیقاتی امواج دریای شمال است که اندازه‌گیری موج و باد با مدت‌زمان تداوم لازم، برای تهیه مدل طیفی در آب عمیق و شرایط حدی طول موج‌گاه انجام شده است. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده در دریا، طیف پارامترسازی شده جان‌سوآپ به صورت زیر است [۴۰]:

$$S(f) = \alpha H_s^2 f_p^4 f^{-5} e^{-\left[ \left( \frac{5}{4} \right) \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right]} \gamma \beta \quad (۳)$$



باد ضروری نیست، در غیر این صورت لایه‌مرزی ناپایدار است. اگر  $\Delta T$  منفی باشد، سرعت باد تأثیر بیشتری در رشد موج دارد و اگر مثبت باشد، تأثیر باد بر رشد موج کمتر است [۴۳]. در این مطالعه، داده‌های باد ثبت شده توسط بویه موج‌نگار در ارتفاع ۴ متری، با استفاده از رابطه ۱۰ به باد در ارتفاع ۱۰ متری تبدیل شدند. با توجه به اختلاف دمایی هوا و سطح دریا، از ضریب ۱/۱ به منظور تصحیح سرعت باد در این مطالعه استفاده شد. همچنین طول موجگاه ۱۰۰ کیلومتر برآورد شد، عامل تنش باد با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد. در نهایت با استفاده از رابطه ۷، ارتفاع و دوره تناوب موج به روش SPM محاسبه شد.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. تحلیل آماری امواج

شبه‌سازی مشخصات موج برای یک دوره ۸ روزه از ۶ تا ۱۴ ژانویه ۲۰۱۵ به روش SPM و شبه‌سازی عددی هم‌زمان جو و موج با استفاده از COAWST انجام شد. نمودار مقایسه ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب موج محاسبه شده به روش SPM و ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب موج محاسبه شده با داده‌های COAWST، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در شکل ۶ نشان داده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر میزان دقت نتایج حاصل از مدل‌سازی هم‌زمان و روش SPM، شاخص‌های اریبی<sup>۲۴</sup>، ضریب همبستگی<sup>۲۵</sup>، جزر میانگین مربع خطاها<sup>۲۶</sup> و ضریب پراکندگی<sup>۲۷</sup> محاسبه شده‌اند. خطای اریبی، اختلاف میانگین داده‌های اندازه‌گیری را بیان می‌کند:

$$\text{Bias} = \bar{y} - \bar{x} \quad (11)$$

ضریب همبستگی (CC)، شاخصی است که به منظور تعیین نوع همبستگی و میزان رابطه بین دو متغیر به کار می‌رود. مقادیر این ضریب در محدوده ۱ و -۱ هستند.  $CC=1$  همبستگی کامل و  $CC=-1$ ، عدم هر نوع همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد:

$$CC = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

رابطه ۶ و در آب کم عمق ( $h/L < 1/20$ ) به شکل رابطه ۷ است [۴۳]:

$$H_s = \frac{U_A}{g} 0.0016 \sqrt{gF} \quad (6)$$

$$T_p = 0.2857 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} \frac{U_A}{g}$$

$$H_s = \frac{U_A^2}{g} 0.283 \tanh \left[ 0.53 \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \times \tanh \left[ 0.00565 \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{1/2} / \tanh 0.53 \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]$$

$$T_p = \frac{U_A}{g} 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]$$

$$\times \tanh \left[ 0.0379 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} / \tanh 0.833 \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \quad (7)$$

در روابط بالا،  $g$  شتاب گرانشی،  $F$  طول موجگاه و  $U_A$  عامل تنش باد طی مدت وزش باد است. از مهم‌ترین پارامترهای مورد توجه در این روش طول موجگاه است که فاصله بین خط ساحل و نقطه مورد نظر به منظور برآورد ارتفاع موج در جهت باد سو است. در این روش باید ۹ شعاع از نقطه برآورد ارتفاع موج تا نقطه‌ای که خط ساحل را قطع می‌کند، به شعاع ۳ درجه رسم شود. طول موجگاه، از میانگین‌گیری طول این ۹ شعاع به دست می‌آید:

$$\text{Fetch} = \frac{\sum_{i=1}^9 F_i}{9} \quad (8)$$

عامل تنش باد برای به حساب آوردن رابطه غیرخطی بین تنش باد و سرعت باد به کار برده می‌شود و از رابطه ۹ به دست می‌آید [۴۳]:

$$U_A = 0.71 U_{10}^{1.23} \quad (9)$$

$U_{10}$  سرعت باد در تراز ۱۰ متری است. اگر سرعت باد در تراز ۱۰ متری اندازه‌گیری نشده باشد، با استفاده از رابطه ۱۰ تصحیح می‌شود:

$$U_{10} = U_z \left( \frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $z$  تراز اندازه‌گیری سرعت باد و  $U_z$  سرعت باد در تراز  $z$  است. اگر  $\Delta T = T_{\text{air}} - T_{\text{sea}}$  تفاوت دمایی آب و هوا صفر باشد، لایه‌مرزی پایدار است و تصحیح سرعت

شده و آمیانگین این داده‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر خطاها برای ارتفاع موج شاخص و متوسط دوره تناوب موج در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. محاسبه خطای پارامترهای امواج

	ارتفاع موج شاخص		دوره تناوب موج	
	SPM	COAWST	SPM	COAWST
اریبی	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۳۸	۱/۰۴
ضریب همبستگی	۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۳۹	۰/۶۵
جزر میانگین مربع خطاها	۰/۳۶	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۲۶
ضریب پراکندگی	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۳۳

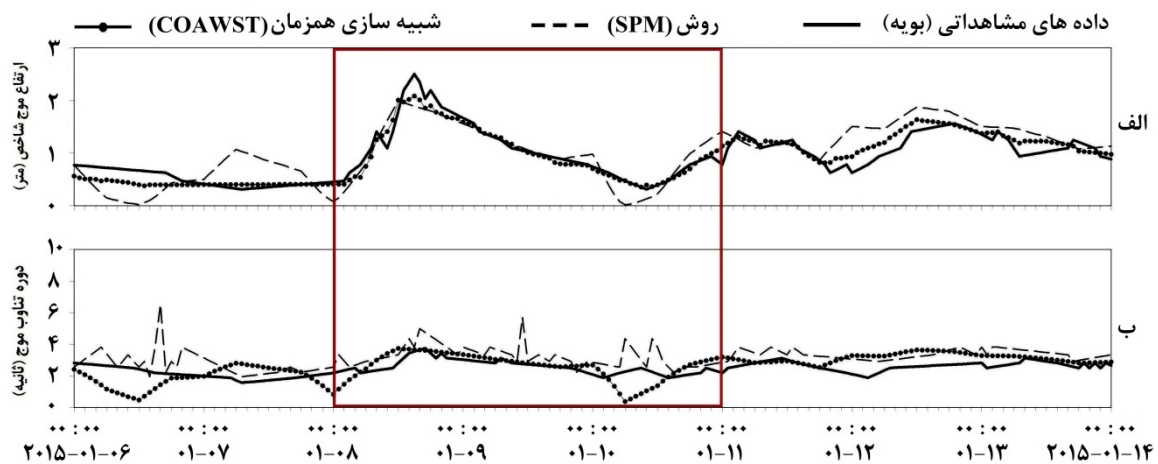
جزر میانگین مربع خطاها (RMSE)، تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده با مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2} \quad (13)$$

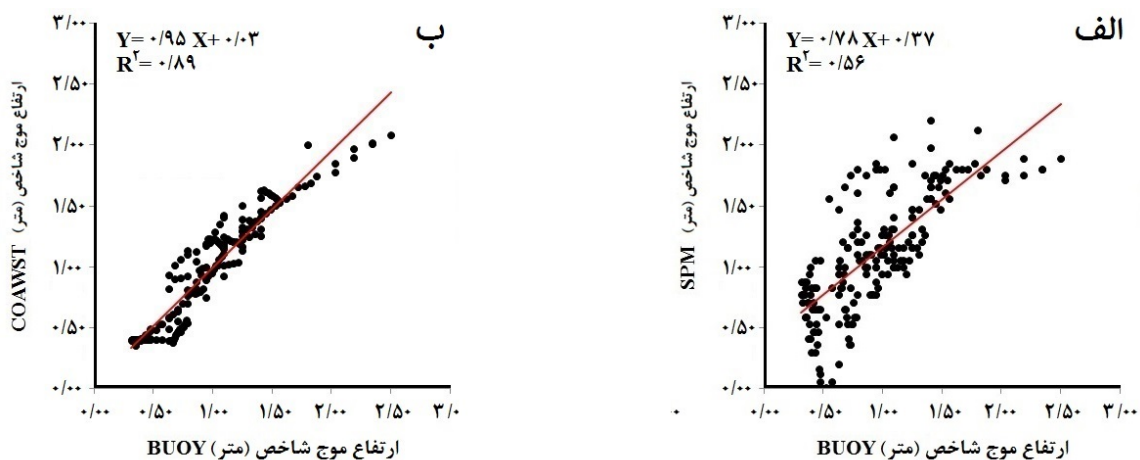
ضریب پراکندگی (SI)، معرف پراکندگی متغیر به صورت مطلق است. چنانچه در مقدار داده‌ها پراکندگی وجود نداشته باشد، مقدار این ضریب صفر است:

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum x_i} \quad (14)$$

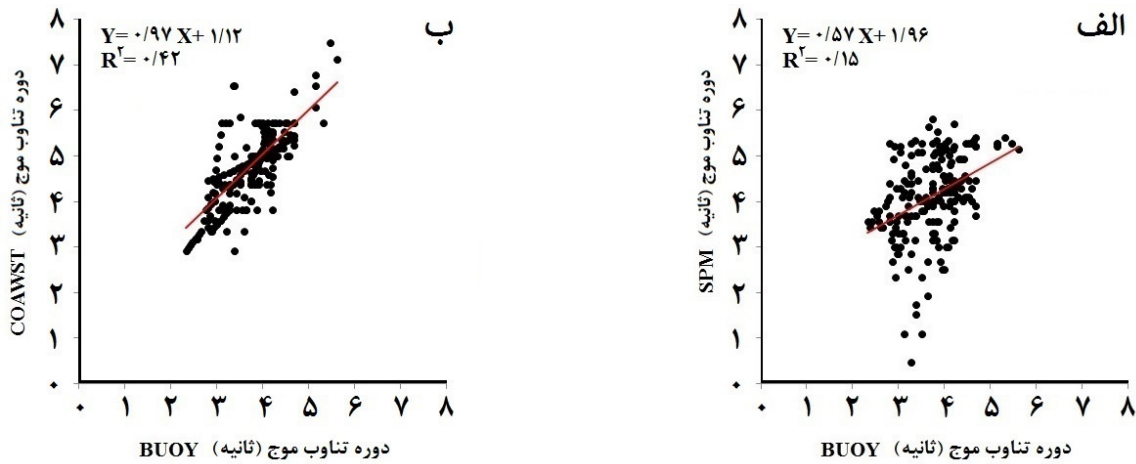
در روابط بالا،  $x_i$  پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط بویه،  $\bar{x}$  میانگین داده‌های بویه،  $y_i$  پارامترهای شبیه‌سازی یا محاسبه



شکل ۶. مقایسه الف) ارتفاع موج شاخص و ب) دوره تناوب موج حاصل از روش SPM و مدل COAWST در مقایسه با داده‌های بویه موج‌نگار بوشهر - ۶ تا ۱۴ ژانویه ۲۰۱۵ (کادر قرمز: بازه وزش باد شمال زمستانی)



شکل ۷. مقایسه نمودار پراکندگی ارتفاع موج محاسبه شده الف) به روش SPM و ب) شبیه‌سازی به وسیله COAWST

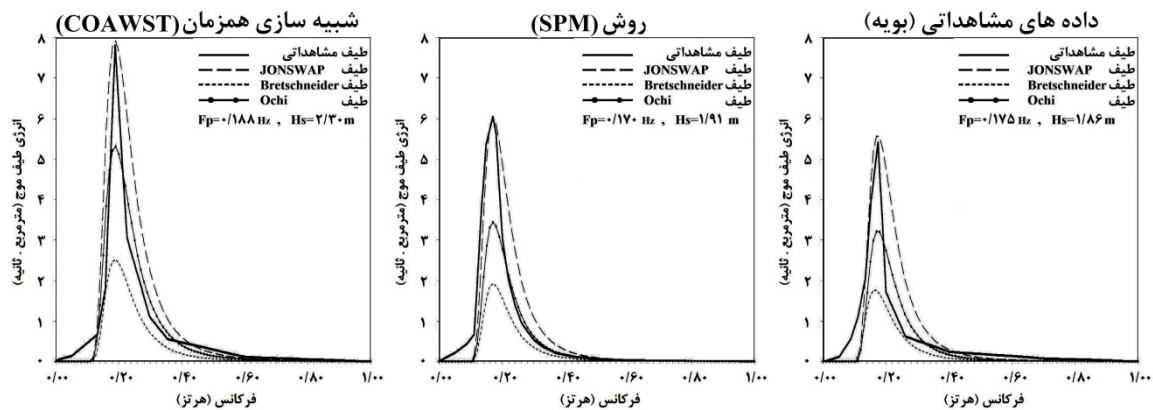


شکل ۸. مقایسه نمودار پراکندگی دوره تناوب موج محاسبه شده (الف) به روش SPM و (ب) شبیه‌سازی به وسیله COAWST

### ۳-۲. تحلیل طیفی امواج

محاسبه و رسم طیف فرکانسی موج، در بازه زمانی رخداد باد شمال زمستانی (۸ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵) انجام شد. به این منظور، در ابتدا ارتفاع موج شاخص، فرکانس زاویه‌ای پیک، دوره تناوب پیک و بیشینه ارتفاع موج برای بیشینه سرعت باد مشخص شدند (جدول ۲). در ادامه، طیف‌های فرکانسی (انرژی) موج، برای موقعیت مکانی بویه موج‌نگار بوشهر با توجه به داده‌های مشاهده‌ای و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با مدل COAWST و روش SPM محاسبه و رسم شدند.

نمودار پراکندگی ارتفاع و دوره تناوب موج شبیه‌سازی شده با استفاده از شبیه‌سازی هم‌زمان و روش SPM در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. برای هر یک از نمودارها، خط رگرسیون و ضریب تعیین  $(R^2)$  ارائه شده است. خط رگرسیون بیان تغییرات یک متغیر بر اساس اطلاعات متغیر دیگر است و ضریب تعیین، اندازه‌گیری آماری نزدیک بودن داده‌ها به خط رگرسیون است و بین صفر و یک است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ضریب تعیین برای نتایج اجرای مدل هم‌زمان توسط COAWST، در مقایسه با نتایج اجرای منفرد مدل موج و روش SPM، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. طیف فرکانسی امواج برای داده‌های مشاهده‌ای (راست)، روش SPM (وسط) و شبیه‌سازی هم‌زمان جو و موج به وسیله COAWST (چپ) برای بازه زمانی رخداد باد شمال زمستانی - ۸ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵

معتبر مانند جان سوآپ، برتشنايدر و اوشی مقایسه شدند. با توجه به نمودارها، بهترین هماهنگی طیف فرکانسی منطقه با

برای تعیین بهترین الگوی طیفی امواج در شمال غرب خلیج فارس، طیف‌های موج محاسبه شده با طیف‌های نظری

تأییدکننده شبیه‌سازی بهتر در اجرای هم‌زمان مدل‌های جو و موج به وسیله COAWST است.

نتایج مربوط به طیف فرکانسی موج نشان‌دهنده اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین بیشینه مقدار انرژی به دست آمده از طیف مشاهداتی توسط بویه و بیشینه مقدار انرژی به دست آمده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط COAWST و روش SPM است. با توجه به اختلاف بیشینه ارتفاع موج بویه با سایر نتایج، این تفاوت قابل انتظار است، هرچند بیشینه ارتفاع موج ثبت شده توسط بویه، می‌تواند نتیجه یک برهم‌نهی لحظه‌ای امواج باشد که در حیطه محاسباتی مدل‌ها و روش‌های برآورد موج نیست.

مقایسه طیف‌های محاسبه شده با طیف‌های نظری معتبر نشان می‌دهد که طیف جان‌سوآپ هماهنگی نزدیکی با طیف‌های محاسبه شده دارد. همچنین طیف‌های فرکانسی در منطقه مورد مطالعه از نوع تک قله‌ای هستند.

## مراجع

- [1] فرجامی حسین، حسینی سید طالب، چگینی وحید، محمدی سیده سعیده. شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با مدل عددی سوان. اقیانوس‌شناسی. ۱۳۹۰؛ ۸(۸):۷۹-۸۷.
- [2] Rusu E. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications. *Journal of Marine Science and Technology*. 2011;19(1):58-75.
- [3] Glejin J, Kumar VS, Nair TB, Singh J, Mehra P. Observational evidence of summer Shamal swells along the west coast of India. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013;30(2):379-88.
- [4] Abdi Vishkae F, Flamant C, Cuesta J, Oolman L, Flamant P, Khalesifard HR. Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012;117(D3).
- [5] Rao PG, Al-Sulaiti M, Al-Mulla AH. Winter Shamals in Qatar, Arabian Gulf. *Weather*. 2001;56(12):444-51.
- [6] عباسی حامد، کتابداری محمدجواد. اعتبار روش‌های پیرسون مسکوویچ و جان‌سوآپ و SPM در برآورد

طیف جان‌سوآپ است (شکل ۹). همچنین طیف انرژی اندازه‌گیری شده در این منطقه دارای یک برآمدگی اصلی بوده و از نوع طیف تک قله‌ای<sup>۲۸</sup> است که تأییدکننده نتایج پژوهش‌های پیشین [۴۴] است.

جدول ۲. پارامترهای امواج در بیشینه سرعت باد

دوره	در مدت وزش باد شمال زمستانی			
	مدل / مشاهداتی	بویه	SPM	COAWST
زمان		۱۵:۰۰-۲۰۱۵-۰۱-۰۸		
Tp (s)		۵/۳۱	۵/۸۸	۵/۷۱
Fp (Hz)		۰/۱۸۸	۰/۱۷۰	۰/۱۷۵
Hmax		۲/۵۰	۲/۱۸	۲/۰۹
Hs		۲/۳۰	۱/۹۱	۱/۸۶

## ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق موج ناشی از باد شمال زمستانی در ژانویه ۲۰۱۵ در شمال غرب خلیج فارس از نظر آماری و طیفی، با استفاده از روش SPM و مدل هم‌زمان جو و موج COAWST بررسی شد. صحت‌سنجی نتایج نیز با استفاده از داده‌های بویه موج‌نگار در آب‌های دور از ساحل بوشهر، به انجام رسید.

برای اجرای شبیه‌سازی هم‌زمان به وسیله COAWST، مدل موج سوان با یک دامنه و مدل جوی WRF با دو دامنه تودرتو، به‌طور هم‌زمان زمینه‌های اثرگذار بر عملکرد مدل دیگر را مبادله کردند؛ به‌طوری که دامنه بزرگ‌تر مدل جوی، محدوده عملکرد باد شمال زمستانی را پوشش دهد و دامنه کوچک‌تر دقیقاً منطبق بر دامنه مدل موج باشد.

نتایج محاسبه یا شبیه‌سازی ارتفاع موج شاخص، به ترتیب با استفاده از روش SPM و مدل COAWST، نشان می‌دهد که همبستگی مطلوبی با نمودار سرعت باد در دوره وزش باد شمال زمستانی وجود دارد. همچنین، بررسی نمودار پراکنندگی ارتفاع و دوره تناوب موج نشان می‌دهد که ضریب تعیین برای نتایج اجرای COAWST، در مقایسه با نتایج روش SPM، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد و

- [18] Caliskan H, Valle-Levinson A. Wind-wave transformations in an elongated bay. *Continental Shelf Research*. 2008;28(14):1702-10.
- [19] حاجی‌بابایی نوید، آزر مسعود علی. ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی امواج ناشی از باد و ارائه مدل مناسب برای سواحل شهرستان بابلسر. علوم و فنون دریایی. ۱۳۸۲؛ ۳(۱):۱۵-۳۰.
- [۲۰] نجارپور محمدعلی، چگینی وحید، صدری‌نسب مسعود، کعبی عامر. خصوصیات طیف موج ناشی از باد در منطقه عسلویه. علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۱؛ ۴(۱۱):۵۷-۶۳.
- [21] Allahdadi MN, Chaichitehrani N, Allahyar M, McGee L. Wave Spectral Patterns during a Historical Cyclone: A Numerical Model for Cyclone Gonu in the Northern Oman Sea. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2017;7(02):131.
- [22] Rao PG, Hatwar HR, Al-Sulaiti MH, Al-Mulla AH. Summer shamals over the Arabian Gulf. *Weather*. 2003;58(12):471-78.
- [23] Perrone TJ. Winter shamal in the Persian Gulf. *NAVAL ENVIRONMENTAL PREDICTION RESEARCH FACILITY MONTEREY CA*; 1979.
- [24] El-Sabh MI, Murty TS. Storm surges in the Arabian Gulf. *Natural Hazards*. 1989;1(4):371-85.
- [25] The Weather Company, an IBM business. *Weather Underground* [Internet]. USA; 2015 [cited 2015 Jan]. Available from: [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com)
- [26] Booij NR, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*. 1999;104(C4):7649-666.
- [27] Holthuijsen LH. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press; 2010 Feb 4.
- [28] Jacob R, Larson J, Ong E. M× N communication and parallel interpolation in Community Climate System Model Version 3 using the model coupling toolkit. *The International Journal of High Performance Computing Applications*. 2005;19(3):293-307.
- [29] Hong SY, Dudhia J, Chen SH. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*. 2004;132(1):103-20.
- [30] Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*. 2002;107(44):4205-21.
- ارتفاع امواج منطقه بوشهر. ارائه‌شده در هشتمین همایش صنایع دریایی؛ ۱۳۸۵ آبان ۹-۱۱؛ بوشهر، ایران.
- [7] Longuet-Higgins MS. On the statistical distribution of the height of sea waves. *JMR*. 1952;11:245-66.
- [8] Sorensen RM. *Basic coastal engineering*. Springer Science & Business Media; 2005.
- [9] Warner JC, Armstrong B, He R, Zambon JB. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*. 2010;35(3):230-44.
- [10] Rusu E, Raileanu A. A multi-parameter data-assimilation approach for wave prediction in coastal areas. *Journal of Operational Oceanography*. 2016;9(1):13-25.
- [11] Holthuijsen LH, Booij N. Oceanic and nearshore whitecapping effects in SWAN. *Proceeding of 6th International Conference on Wave Hindcasting and Forecasting*; 2000 Nov 6. (pp. 362-68).
- [12] Dykes JD, Hsu YL, Rogers WE. The development of an operational SWAN model for NGLI. *OCEANS'02 MTS/IEEE*; 2002 Oct 29-31; Biloxi, MI, USA. IEEE; 2003. p.859-66. (Vol. 2).
- [13] Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. A description of the advanced research WRF version 2. *National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div*; 2005.
- [14] Warner JC, Sherwood CR, Signell RP, Harris CK, Arango HG. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*. 2008;34(10):1284-306.
- [15] Montoya RD, Arias AO, Royero JO, Ocampo-Torres FJ. A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. *Ocean Engineering*. 2013;67:100-18.
- [۱۶] رجبی سمانه، چگینی وحید، لاری کامران، کامران‌زاد بهاره، حسینی سیدطالب. مدل‌سازی امواج ناشی از باد در منطقه انزلی با استفاده از مدل عددی سوان. اقیانوس‌شناسی. ۱۳۹۲؛ ۴(۱۵):۸۳-۹۲.
- [۱۷] رضایی فروغ، تجزیه چی مجتبی، سلطان‌پور محسن، امامی عارفه. پیش‌بینی مشخصات موج در محدوده جزایر قشم و هرمز با استفاده از مدل عددی سوان. ارائه‌شده در یازدهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی؛ ۱۳۹۲ آذر ۳-۵؛ تهران، ایران.



[43] US Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Corps of Engineers, US Govt. Manual, Shore protection. USA: Washington, DC; 1984. (vol.1)

[۴۴] پاخیره زن محمد، راه بانى مریم، ملکوتى حسین. ارزیابى

الگوى امواج در شمال غرب خلیج فارس با استفاده از

شیبه سازی هم زمان جو و موج. فصلنامه اقیانوس شناسی.

۱۳۹۷؛ ۹(۳۶): ۱-۱۱.

### پی نوشت

1. Fetch
2. Simulating Wave Near-Shore
3. Weather Research and Forecasting
4. Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport
5. Model Coupling Toolkit
6. Joint North Sea Wave Project
7. WRF Preprocessing System
8. Real Data System
9. Network Common Data Form
10. Gridded Binary
11. Schematics
12. Surface Layer
13. Planetary Boundary Layer
14. Global Forecasting System
15. National Centers for Environmental Prediction
16. Microphysics
17. Short and Long Wave Radiation
18. Land Surface Model
19. Cumulus Parameterization
20. Yonsei University
21. Mellor-Yamada- Janjic
22. Mellor-Yamada-Nakanishi and Niino
23. Fully Developed Sea
24. Bias
25. Correlation Coefficient
26. Root-Mean-Square-Errors
27. Scattering Index
28. Single Peak

Research: Atmospheres. 1997;102(D14):16663-82.

[31] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences*. 1989;46(20):3077-107.

[32] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*. 2001;129(4):569-85.

[33] Monin AS, Obukhov AM. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*. 1954;151(163):e187.

[34] Kain JS. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*. 2004;43(1):170-81.

[35] Hong SY, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*. 2006;134(9):2318-41.

[36] Janjić ZI. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*. 1994;122(5):927-45.

[37] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*. 2006;119(2):397-407.

[38] Cohen AE, Cavallo SM, Coniglio MC, Brooks HE. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern US cold season severe weather environments. *Weather and forecasting*. 2015;30(3):591-612.

[39] Pierson 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;69(24):5181-90.

[40] Hasselmann K, Barnett TP, Bouws E, Carlson H, Cartwright DE, Enke K, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft* 8-12. 1973.

[41] Ochi MK. *Ocean waves: the stochastic approach*. Cambridge University Press; 2005.

[42] Bretschneider CL. Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves. *CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC BEACH EROSION BOARD*; 1959.