

شبیه‌سازی امواج ناشی از باد تحت تأثیر پیچیدگی‌های جغرافیایی در تنگه هرمز

فاطمه عامری^۱، سرمد قادر^{۲*} و سید عباس حق شناس^۳^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران^۳ استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰)

چکیده

برآورد قابل اعتماد از اطلاعات موج برای بدنه‌های آبی متأثر از پیچیدگی‌های جغرافیایی از اهمیت بسیاری برخوردار است. تنگه‌های اصلی دنیا مانند تنگه هرمز، مرجع اصلی برای این برآورد هستند. داده‌های باد ورودی به مدل‌های موج، مهم‌ترین پیش‌نیاز برای دستیابی به برآورد واقعی از امواج به‌شمار می‌روند. این در حالی است که میدان باد در این حوزه‌ها از خشکی‌های اطراف تأثیر می‌پذیرد. دقت داده‌های باد همچنین به وضوح افقی مدل‌های جوی جهت گرفتن پدیده‌های ریزمقیاس منطقه مورد مطالعه وابسته است.

در پژوهش حاضر، نتایج توسعه مدل طیفی موج، جفت‌شده با مدل جوی میان‌مقیاس برای مدل طیفی-عددی SWAN جهت شبیه‌سازی امواج ناشی از باد ارائه و تلاش شده است با به‌کارگیری مدل عددی-طیفی موج SWAN، به شبیه‌سازی امواج در تنگه هرمز پرداخته شود که تحت تأثیر پیچیدگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی اطراف است. این پیچیدگی‌ها بر میدان باد تأثیر می‌گذارند. در ابتدا مدل موج برای محدوده خلیج فارس و قسمتی از دریای عمان تا محدوده‌ای که تنگه هرمز را شامل شود با داده‌های باد سطحی حاصل از داده‌های بازتحلیل ECMWF-ERA5 راه‌اندازی و با داده‌های اندازه‌گیری موجود صحت‌سنجی شد. در ادامه، با استفاده از مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF و اجرای مدل مذکور برای منطقه مورد مطالعه، با تفکیک‌های افقی متفاوت، داده میدان باد سطحی مورد نیاز برای مدل موج تأمین شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها و داده‌های اندازه‌گیری موجود برای پارامتر ارتفاع موج با کمک سنج‌های آماری، برای دو ایستگاه لارک در قسمت غربی تنگه هرمز و جاسک در قسمت شرقی تنگه هرمز انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی، موفقیت در بهبود نتایج را در حد قابل قبولی نشان می‌دهد. در این مقایسه‌ها، عملکرد مدل SWAN با داده‌های مدل WRF برای ایستگاه لارک که متأثر از دو رژیم باد دریای عمان و خلیج فارس است، بهبود چشمگیری دارد؛ نتایج، عملکرد خوب مدل موج SWAN جفت‌شده با مدل جوی منطقه‌ای WRF را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. کاهش میزان خطای جذر مربعات به مقدار ۱۰ درصد و انطباق بیش از ۰/۷۵ درصد، بهبود نتایج شبیه‌سازی نسبت به داده‌های موج ERA5 را نشان داد. تحلیل‌های آماری نتایج شبیه‌سازی با داده‌های موج ERA5 برای ارتفاع موج شاخص در ایستگاه جاسک که در بخش اقیانوسی محدوده مورد مطالعه است، نمایانگر عملکرد بهتر داده‌های موج ERA5 با تطابق ۰/۹ درصد با داده‌های اندازه‌گیری است. همچنین افزایش تفکیک افقی میدان باد تا حدود قابل قبولی نتایج شبیه‌سازی موج را بهبود بخشیده است.

واژه‌های کلیدی: تنگه هرمز، شبیه‌سازی امواج، مدل SWAN، مدل WRF، جفت‌شدگی

۱ مقدمه

امواج یکی از مهم‌ترین پدیده‌های قابل مشاهده و تأثیرگذار در دریاها و اقیانوس‌ها هستند. عوامل متفاوتی امواج را ایجاد می‌کنند. عمده‌ترین عامل، باد است. امواج ثقلی ناشی از باد با توجه به درصد وقوع آنها و همچنین انرژی زیادی که در حین طوفان دارند، از اهمیت ویژه‌ای در اندرکنش دریا و نواحی ساحلی برخوردار هستند. امواج دریا ماهیت تصادفی دارند. شرایط موج که حالت دریا نامیده می‌شود، معمولاً با طیف امواج مشخص می‌شود. مطالعه امواج در تنگه هرمز، به دلیل تأثیراتی که در پدیده‌شناسی اقیانوسی و نیز ناوبری و فعالیت‌های اقتصادی و انتقال انرژی در منطقه دارد، ضروری به نظر می‌رسد؛ در هر شش دقیقه یک کشتی اقیانوس‌پیما از این تنگه می‌گذرد که این خود نشان از اهمیت بسیار زیاد این تنگه دارد (الهجری، ۱۹۹۰). اقلیم موج، تغییر خصوصیات موج است که با توجه به کیفیت و مشخصات جوی و هیدرودینامیکی آن منطقه مشخص می‌شود و میانگین درازمدت شرایط تغییر موج را دربرمی‌گیرد. این اصطلاح نه فقط به‌طور ساده برای شرایط میانگین، بلکه برای همه پارامترها نظیر بیشینه‌ها، کمینه‌ها و مانند آنها نیز به‌کار می‌رود. عوامل اقلیمی نظیر عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، توپوگرافی بستر دریا، وزش باد و نظیر اینها شرایط ویژه فیزیکی هستند که اقلیم موج را کنترل می‌کنند.

پیچیدگی‌های منطقه مورد مطالعه ناشی از پیچیدگی‌های جغرافیایی (کوه‌های اطراف) است که میدان باد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین تغییرات اقلیمی و تنوع الگوی باد حاکم (تأثیر هم‌زمان اقلیم باد در دریای عمان و اقلیم باد خلیج فارس) و اهمیت بهبود تخمین باد، مدل موج را در منطقه بااهمیت می‌سازد؛ بنابراین بررسی میانگین درازمدت پارامترهای موج ضروری است. میانگین درازمدت این پارامتر، نیازمند

داده‌های اندازه‌گیری است. داده‌های اندازه‌گیری میدان باد و موج معمولاً در همه نقاط یافت نمی‌شوند و برای بازه زمانی طولانی‌مدت، داده‌های بویه‌ها برای نواحی ساحلی موجود نیست. منبع موجود دیگر، داده‌های ماهواره است که پخش مکانی و زمانی چندان مناسبی ندارند. ممکن است به‌واسطه تفکیک‌پذیری اندک زمانی-مکانی، داده‌های ماهواره‌ای یک رویداد مهم در بخش مورد علاقه‌ای در پهنه آبی مورد مطالعه در دسترس نباشد. همچنین داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای، هیچ کمکی به پیش‌بینی‌های امواج نمی‌کند. برای یک زمان طولانی، روش‌های تجربی همانند SBM متداول‌ترین روش برای تخمین پارامترهای موج بود، ولی این روش‌های تجربی به دلیل محدودیت‌هایشان، برای محدوده‌های زیادی قابل استفاده نیستند؛ بر همین اساس، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی برای دستیابی به نتایج مطمئن در مناطق مورد مطالعه اجتناب‌ناپذیر است. دستیابی به نتایج مطمئن از تخمین امواج با استفاده از مدل‌های عددی به ورودی‌های قابل اعتماد باد بستگی دارد. دسترسی به مجموعه داده‌های قابل اعتماد و با تفکیک مناسب از باد روی پهنه‌های دریایی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر ورودی مدل‌های موج مورد نیاز است. علی‌رغم پیشرفت گسترده علم هواشناسی در دهه‌های اخیر، همچنان در مناطق زیادی از جهان مانند نواحی قطبی و اقیانوسی، دسترسی به اطلاعات و داده‌های مشاهداتی مربوط به وضع هوا برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی باد با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. اندازه‌گیری مستقیم بیشتر کمیت‌های فیزیکی مورد نیاز مطالعات جوی با دقت و قدرت تفکیک‌پذیری زیاد به دلیل وسعت زیاد این مناطق و دور از دسترس بودنشان دشوار و پرهزینه است. در گذشته، تنها راه برای جبران فقدان داده‌های هواشناسی در این مناطق، استفاده از اندازه‌گیری‌های هواپیماها و کشتی‌های اقیانوس‌پیما بود (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۰۸).

و روی خشکی و نیز اندرکنش آب و خشکی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از داده‌های میدان باد روی خشکی بدون اعمال اصلاحات جهت استفاده روی آب، خطای زیادی را وارد شبیه‌سازی می‌کند.

کیفیت و تفکیک فضایی خروجی‌های مدل موج به شدت به داده‌های باد ورودی وابسته است. پژوهشگران زیادی به تحلیل دقت خروجی مدل‌های موج نسبت به ورودی‌های میدان باد با استفاده از منابع باد متفاوت جهت ورودی مدل‌های موج پرداخته‌اند. برخی از این پژوهش‌ها عبارت‌اند از: کومار و همکاران (۲۰۰۰)؛ کاوالری و برتوتی (۲۰۰۳)؛ سیگنل و همکاران (۲۰۰۵)؛ آردهوین و همکاران (۲۰۰۷)؛ سیادت موسوی و همکاران (۲۰۰۹)؛ دی لئون و همکاران (۲۰۱۲)؛ آپندینی و همکاران (۲۰۱۳)؛ ون ولدر و اکیپنار (۲۰۱۵) و لایویداس و همکاران (۲۰۱۷).

از پژوهش‌های انجام‌گرفته در محدوده مورد مطالعه می‌توان به مطالعات محمدمهدی زاده و همکاران (۱۳۹۳)، مطالعات سازمان بنادر و دریانوردی در پروژه پایش سواحل استان هرمزگان (۲۰۰۹)، شریفی و همکاران (۲۰۱۲)، نایاک و همکاران (۲۰۱۶)، کاظمی نژاد و سیادت موسوی (۲۰۱۷) و حق‌شناس و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد. در تمامی پژوهش‌های انجام‌گرفته در این منطقه، تمرکز عمده بر شبیه‌سازی امواج استوار بوده است و شبیه‌سازی هم‌زمان میدان باد و میدان موج انجام نگرفته و اصلاحی روی میدان باد جهت تدقیق نتایج مدل موج اعمال نشده است.

در کار حاضر، برای تأمین داده‌های میدان باد سطحی مورد نیاز برای شبیه‌سازی مدل موج از دو رویکرد استفاده شده است. در بخش اول برای تأمین داده‌های باد از داده‌های بازتحلیل ERA5 مربوط به مرکز ECMWF (هرسپاچ و دی، ۲۰۱۶) استفاده شده است. در بخش دوم، از مدل میان‌مقیاس هواشناسی WRF (Weather

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در مدل‌های جوی، امروزه میدان باد حاصل از مدل‌های جوی روی اقیانوس‌ها و نواحی دور از ساحل به‌طور کلی عملکرد خوبی دارد و از دقت قابل قبولی برخوردار است، اما در حوزه‌های نیمه‌بسته و بسته و ناحیه‌هایی که میدان باد تحت تأثیر عارضه‌های زمین‌ریخت‌شناسی قرار می‌گیرد، معمولاً مدل‌های جوی، سرعت باد را کم تخمین می‌زنند و قابل اتکا نیستند. از مطالعات انجام‌شده در این حوزه‌ها می‌توان به مطالعات کاوالری و برتوتی (۲۰۰۳، ۲۰۰۶)، دی لئون و سوارز (۲۰۰۸) و کاوالری و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد. مدل‌های عددی در بازه‌های زمانی و مکانی وسیع‌تری موجودند و بسیاری از آنها به‌صورت متن‌باز هستند؛ بنابراین پرکاربردترند. عدم قطعیت‌های موجود در میدان باد به‌عنوان مهم‌ترین ورودی میدان موج، بر میدان موج اثر می‌گذارد. هر ۱۰٪ خطا در میدان باد موجب خطای تقریبی ۲۰٪ در ارتفاع موج خروجی می‌شود. برای مثال، تخمین حد بالا برای سرعت باد در اقیانوس جنوبی قبل از سال ۱۹۹۴، اریبی مثبت در میدان موج ایجاد می‌کند. چاولا و همکاران (۲۰۱۳)، راسکل و آردهوینی (۲۰۱۳)، استوپا و چیونگ (۲۰۱۴) در این زمینه مطالعاتی انجام داده‌اند.

کیفیت نتایج پیش‌یابی/پیش‌بینی در مدل‌های موج به‌طور وسیعی به کیفیت میدان باد ورودی (تندی و جهت) بستگی دارد. معمولاً با افزایش تفکیک‌پذیری یا اعمال اصلاحاتی در مدل جوی، با کاهش عدم قطعیت‌ها نتایج بهبود می‌یابند. در خصوص تأثیر میدان باد اصلاح‌شده بر خروجی مدل‌های موج نیز می‌توان به مطالعات روجر و ویتمن (۲۰۰۵) و دورانت و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. میدان باد می‌تواند متأثر از شرایط جغرافیایی حاکم باشد. استفاده از میدان باد با شرط اعمال تغییرات، به نتایج بهتری منجر می‌شود. در پژوهشی، ماریوتی و همکاران (۲۰۱۸) میدان باد را برای شرایط متفاوت جزایر احاطه‌شده با آب

حاضر، به دو دسته اصلی از داده‌ها نیاز است. دسته اول، داده‌های مشاهدات جهت صحت‌سنجی و دسته دوم داده‌های لازم برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل است. اطلاعات بیشتر در این خصوص، در ادامه به تفصیل ارائه شده است. در گام اول، از داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز ECMWF استفاده شده است و در گام بعدی، با کمک داده‌های میدان باد حاصل از مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF در منطقه تنگه هرمز، نتایج بهبود یافته‌اند. سعی شده است نتایج اولیه شبیه‌سازی امواج، دقیق‌تر بررسی شود؛ از این‌رو، نخست ضمن اجرای مدل موج در شرایط متفاوت در محدوده خلیج فارس و قسمتی از دریای عمان، مدل برای پارامترهای اندازه تفکیک مکانی شبکه محاسباتی، ضریب زبری بستر و همچنین تغییر محدوده مرز باز محدوده محاسباتی واسنجی شده است. در گام بعد، شرایط بهینه برای اجرای مدل در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. سپس مدل در این شرایط، اجرا و نتایج شبیه‌سازی برای ارتفاع موج شاخص در ایستگاه‌های موجود صحت‌سنجی شد. در نهایت، به کمک سنج‌های آماری، نتایج شبیه‌سازی با نتایج مشاهداتی مقایسه شده‌اند.

۱-۲ معرفی منطقه مورد مطالعه

تنگه هرمز آبراهی است که دریای عمان را به خلیج فارس پیوند می‌زند. این تنگه یکی از راهبردی‌ترین مسیرهای بین‌المللی کشتیرانی در جهان به‌شمار می‌رود و دومین تنگه بین‌المللی پرتردد دنیا است. حدود ۶۸ درصد ذخایر شناخته‌شده نفت و گاز دنیا در خلیج فارس قرار دارد و تنگه هرمز نقش کلیدی در تأمین بی‌وقفه انرژی دنیا دارد. عریض‌ترین فاصله تنگه هرمز، ۸۴ کیلومتر (از کرانه‌های بندرعباس در شمالی‌ترین نقطه تا کرانه‌های مسندم در جنوب) و کوتاه‌ترین آن (میان جزیره ایرانی لارک در شمال و جزیره عمانی السلامه، که نام دیگر آن قوئین

Research and Forecasting) (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده شده و با اجرای شبیه‌سازی با مدل مذکور برای تفکیک‌های افقی متفاوت، داده‌های میدان باد مورد نیاز مدل موج تأمین شده‌اند. از جمله کارهای انجام‌شده در منطقه خلیج فارس و دریای عمان، که در آنها از مدل WRF برای شبیه‌سازی میدان باد سطحی استفاده شده است، می‌توان به مطالعات قادر و همکاران (۱۳۹۴ و ۲۰۱۶ الف و ب) اشاره کرد.

در این پژوهش به پیش‌یابی امواج ناشی از باد برای منطقه تنگه هرمز پرداخته شده است. همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، این تنگه از لحاظ اقلیمی، بیشتر با عوارض زمین‌ریخت‌شناسی احاطه شده است و به دلیل پیچیدگی مرزهای ساحلی اطراف منطقه، نیازمند مدلی است که به‌خوبی توسعه یافته باشد و بتواند شرایط و سازوکارهای آب‌کم‌عمق همانند توسعه امواج، اضمحلال و رشد آنها را به‌خوبی در نظر بگیرد. مدل‌های عددی همچون SWAN (Simulating Waves Nearshore) که برای نواحی کم‌عمق توسعه داده شده‌اند و همچنین مدل‌های WAM و WAVEWATCH که به‌منظور پیش‌بینی و پیش‌یابی، برای نقاط بسیاری راه‌اندازی و اجرا شده‌اند، نمونه‌هایی از این مدل‌ها هستند. در بین این مدل‌ها، مدل SWAN برای آب‌های کم‌عمق و نزدیک ساحل عملکرد بهتری را نشان داده است. پژوهش حاضر با هدف تدقیق نتایج شبیه‌سازی اولیه اجراشده با مدل موج SWAN و داده‌های باد ERA5 با کمک ورودی میدان باد سطحی حاصل از مدل جوی WRF انجام گرفته است.

۲ روش‌شناسی مطالعه حاضر

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی طیفی تولید و انتشار امواج ناشی از باد در تنگه هرمز به کمک مدل عددی-طیفی SWAN، شبکه نامنظم (unstructured) و واداشت باد به‌دست آمده است. برای اجرای شبیه‌سازی‌های کار

به فاز چهارم و در محدوده استان هرمزگان است. پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل استان هرمزگان با هدف بررسی و تعیین مشخصات امواج در آب‌های کم‌عمق ساحلی

استان هرمزگان انجام شده است. محدوده ساحلی استان هرمزگان که مطالعات پایش و مدل‌سازی روی آن انجام گرفته است، حد فاصل خط ساحلی بین بندر در دریای عمان تا بندر جوادالائمه در خلیج فارس است. بخشی از شرح خدمات پروژه پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل استان هرمزگان، اندازه‌گیری پارامترهای دریایی از جمله مشخصات امواج به مدت یک سال بود. این پروژه از بهمن‌ماه سال ۱۳۸۷ (۲۰۰۹ میلادی) به مدت دو سال اجرا شده است. اندازه‌گیری‌های موج و جریان با دستگاه AWAC و در عمق ۲۵ متری انجام شده است. در جدول ۱ مشخصات عمومی ایستگاه‌های اندازه‌گیری که از داده‌های ثبت‌شده در آنها در این مطالعه استفاده شده، به همراه مکان و زمان اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده، داده‌های ارتفاع شاخص، جهت و دوره تناوب امواج هستند.

داده‌های باد که جهت واسنجی و مقایسه کردن به‌کارگرفته شده است، از داده‌های بازتحلیل ERA5 است. اطلاعات میدان باد که شامل سرعت و جهت آن برای دوره اجرای مدل است، در کل حوزه خلیج فارس و قسمتی

از دریای عمان اعمال شده است. در شکل ۲ این

بزرگ است، در جنوب) ۳۳/۶ کیلومتر برآورد شده است (حافظ‌نیا، ۱۳۷۸). موقعیت جغرافیایی تنگه هرمز، ۲۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی است. عرض میانگین آن ۵۶ کیلومتر و عمق متوسط و بیشترین عمق آن به ترتیب ۹۰ متر و ۱۱۰ متر است.

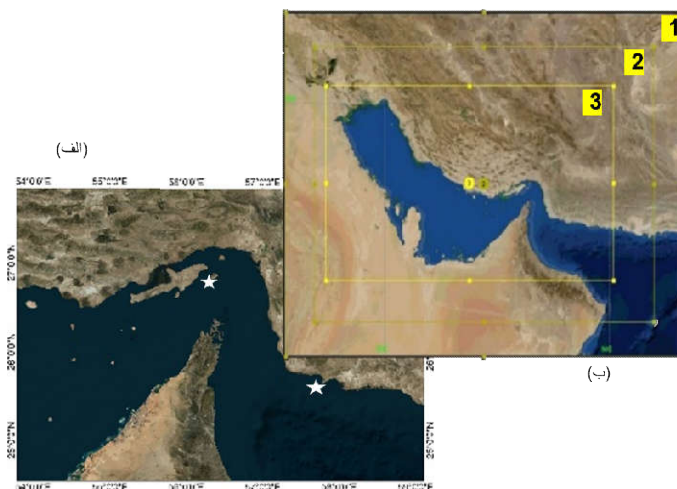
تنگه هرمز می‌تواند تحت تأثیر دو سامانه آب و هوایی متفاوت قرار گیرد: سامانه آب و هوایی گرمسیری که در دریای عمان غالب است و سامانه رژیوم باد حاره‌ای که در خلیج فارس غالب است. تنگه هرمز تخمین مرزی میانه‌ای از این دو سامانه است. در پژوهشی که نایک و سان‌دیپان (۲۰۱۶) انجام دادند، مشخص شده است که امواج شکل‌گرفته در دریای عمان تأثیر زیادی در تکامل امواج در خلیج فارس ندارند؛ چون اتلاف انرژی آنها در اثر عبور از تنگه هرمز، کنش این امواج را کاهش می‌دهد. دریای عمان در حاشیه شمالی سامانه‌های آب و هوایی استوایی در دریای عرب و اقیانوس هند قرار دارد، به‌طوری‌که چرخه‌های موسمی در تابستان، بادهای جنوبی و در زمستان، بادهای شمالی قوی ایجاد می‌کند. با شرحی که داده شد، تنگه هرمز تخمین میانه‌ای از سامانه حاکم بر خلیج فارس و دریای عمان است.

۲-۲ اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی

جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، از داده‌های اندازه‌گیری موجود برای دو ایستگاه (شکل ۱) استفاده شده است. داده‌ها از مرجع پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل کشور، که سازمان بندر انجام داده است، دریافت شده و مربوط

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری منتخب و زمان اندازه‌گیری‌های میدانی موجود

UTM	مختصات		عمق (m) مربوط به CD	بازه اندازه‌گیری		نوع اندازه‌گیری (دستگاه)	نام ایستگاه
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی		شروع	پایان		
۴۰	۲۹۶۶۵۸۶	۴۳۰۴۸۶	۲۵	۲۰۱۱/۱۰/۱۸	۲۰۰۹/۰۶/۱۰	AWAC	لاری
۴۰	۲۸۳۲۴۹۷	۵۷۵۶۵۳	۲۵	۲۰۱۱/۰۵/۳۱	۲۰۱۰/۰۷/۱۶	AWAC	جاسک



شکل ۱. (الف) منطقه مورد مطالعه و مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری. محورهای افقی و قائم مختصات جغرافیایی را نشان می‌دهند. (ب) نمایی از حوزه محاسباتی شبیه‌سازی.

شکل ۲. عمق‌سنجی مربوط به تنگه هرمز.

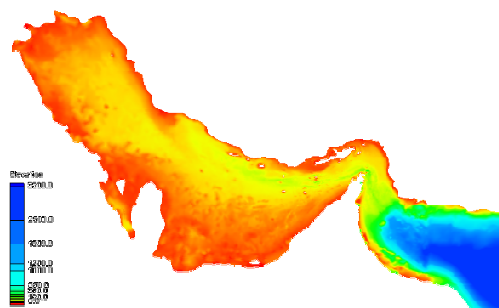
داده‌های عمق‌سنجی عمومی در محدوده خلیج فارس برای نواحی ساحلی از داده‌های سازمان نقشه‌برداری کشور (NCC) تهیه شده است و در مواردی که داده‌های اندازه‌گیری عمق‌سنجی از مرجع نخست (NCC) موجود نبود، از داده‌های ETOPO1 برای نواحی عمیق استفاده شده است. در شکل ۲ عمق‌سنجی منطقه نشان داده شده است.

۳-۲ شبیه‌سازی عددی

۱-۳-۲ مدل موج

مدل SWAN (بویج و همکاران، ۱۹۹۹) و ریس و همکاران، ۱۹۹۹) مدل موج نسل سومی برای دستیابی به برآوردهای واقع‌گرایانه پارامترهای موجی در نواحی ساحلی، دریاچه‌ها و دهانه‌های رودخانه‌های بزرگ (مدخل‌ها) با توجه به میدان باد ورودی، شرایط کف و جریان است. مدل SWAN را می‌توان روی هر مقیاس و برای امواج ثقلی سطحی ناشی از باد استفاده کرد. این مدل

محدوده به صورت طرح کلی نشان داده شده است. داده‌های باد مورد استفاده جهت تدقیق نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه، که با کمک داده‌های ERA5 انجام گرفته است، از نتایج شبیه‌سازی عددی با مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF است. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به پژوهش قادر و همکاران (۱۳۹۴ و ۲۰۱۶ الف و ب) مراجعه کرد. برای داده‌های مرز باز مدل از داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز اروپایی ECMWF استفاده شده است. داده‌های موج به صورت تاریخچه زمانی و به‌عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است.



برای پارامترهای تفکیک مکانی شبکه محاسباتی، تغییر محدوده مرز باز و پارامترهایی از قبیل اصطکاک بستر، شکست موج ناشی از کاهش عمق و نرخ استهلاک انرژی در اثر سفیدک موج انجام گرفت. با توجه به موقعیت قرار گرفتن دستگاه‌های اندازه‌گیری در عمق ۲۵ متری، اصطکاک بستر و شکست موج ناشی از کاهش عمق تأثیر کمتری بر نتایج موج داشتند. مؤثرترین پارامتر در نتایج نرخ استهلاک انرژی در اثر سفیدک موج بود که بهترین حالت برای رابطه کُمن (Komen) با ضریب $(10^{-5} \times 3/36)$ $Cds2 =$ به دست آمده است. پس از یافتن مقادیر بهینه برای راه‌اندازی مدل، اثر اعمال واداشت میدان باد سطحی با تفکیک‌های افقی متفاوت بر نتایج شبیه‌سازی نیز بررسی و حساسیت‌سنجی شد.

۲-۳-۲ مدل WRF جهت تأمین داده‌های میدان باد سطحی

مدل WRF یک مدل متن‌باز میان‌مقیاس و غیر هیدرواستاتیک برای انجام شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌های عملیاتی وضع هوا به صورت منطقه‌ای و جهانی است. مدل مذکور برای استفاده در دامنه وسیعی از کاربردها مناسب است که مقیاس آنها از چند متر تا هزاران کیلومتر را شامل می‌شود. مدل WRF مدلی میان‌مقیاس با تفکیک‌پذیری زیاد برای میدان‌های سطحی همانند میدان باد است که کاملاً موازی، معادلات تراکم‌پذیر حاکم بر جو را می‌تواند حل کند. در حال حاضر این مدل به صورت گسترده در مناطق مختلف دنیا برای پیش‌بینی‌های عملیاتی منطقه‌ای کاربردهای پژوهشی استفاده می‌شود. گفتنی است در طی سال‌های اخیر و هم‌زمان با به‌روزرسانی مدل WRF، مجموعه متنوعی از طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی به مدل مذکور اضافه شده است. در این مطالعه از نتایج پژوهش قادر و همکاران (۱۳۹۴ و ۲۰۱۶ الف و ب) استفاده شده است.

بر مبنای معادله تعادلی کنش موج به همراه در نظر گرفتن اثر چشمه‌ها (منابع افزایش انرژی موج) و چاه‌ها (منابع کاهش انرژی موج) اجرا می‌شود و برای آب‌های محدود توسعه یافته و صحت آن به اثبات رسیده است. مدل را معینی و همکاران (۲۰۱۲، ۲۰۱۰) برای محدوده خلیج فارس صحت‌سنجی کرده‌اند. نسخه ۴۱/۳۱ مدل SWAN جهت شبیه‌سازی طیفی امواج ناشی از باد در تنگه هرمز و شبیه‌سازی دوبعدی نامانا در مختصات کروی و حالت نسل سوم استفاده شد. زمان محاسبه یا گام زمانی، دو دقیقه انتخاب شد. محدوده طیفی $\theta = 10^\circ = 360^\circ/36$ و محدوده فرکانسی بین $0/24$ و $0/5$ هرتز است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها به صورت یک‌ساعته بود، خروجی‌ها برای مدل به صورت یک‌ساعتی تنظیم شد.

شبکه محاسباتی استفاده‌شده، شبکه نامنظم با مشخصه‌های تعداد گره 20275 ، تعداد سلول 40039 و کمترین فاصله سلولی $0/00280$ (برحسب درجه) و بیشترین فاصله شبکه‌ای $0/14121$ (برحسب درجه) است. کمینه و بیشینه زاویه سلول‌ها برابر 40 و 135 درجه در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که بیشترین تعداد سلول‌های متصل به یک گره زیر هشت عدد تنظیم شده است. نحوه تنظیم ابعاد شبکه و دسته‌بندی ابعاد مختلف با پیروی از روش هیگن و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است. در این روش برای ناحیه عمیق اندازه مینا انتخاب شده است و نواحی کم‌عمق و ساحلی طی دو مرحله ریز شده‌اند. از مزایای استفاده از شبکه‌های بی‌ساختار برای حوزه‌ای با پیچیدگی‌های عمق‌سنجی و جزیره‌های موجود و سواحل پیچیده، نمایش بهتر جزئیات منطقه است.

واداشت میدان باد سطحی به مدل اعمال شده است. شبیه‌سازی برای بازه زمانی چهل روزه سال ۲۰۱۱ در دو ایستگاه جاسک و لارک انجام گرفت. واسنجی با مقایسه نمودار سری زمانی ارتفاع موج شاخص در این ایستگاه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری انجام شده است. واسنجی مدل

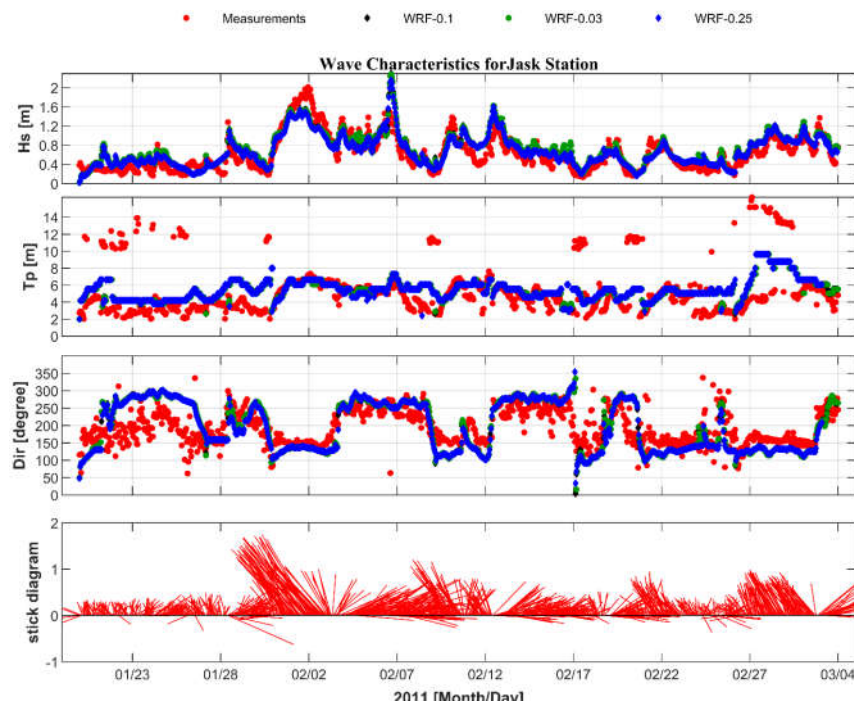
مرزی نمی‌تواند به نتایج مطلوبی دست پیدا کند (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸)؛ شرایط مرزی و جانبی از داده‌های بازتحلیل Era Interim از مرکز اروپایی ECMWF برای این مدل با تفکیک مکانی ۰/۷۵ درجه و تفکیک زمانی شش ساعته دریافت شده است.

۳ اثر تفکیک‌های افقی متفاوت واداشت میدان باد سطحی

واسنجی و بررسی عملکرد مدل‌های عددی را می‌توان با مقایسه نتایج این مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری موجود انجام داد. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی برای واداشت باد با سه تفکیک افقی متفاوت به شرح زیر برای ایستگاه

با توجه به هدف کار حاضر، از یک حوزه محاسباتی متشکل از سه شبکه تودرتو (لانه‌ای) در راستای افقی (طول و عرض جغرافیایی) شامل شبکه افقی ۰/۲۵ با تعداد نقاط ۶۹×۵۰، شبکه افقی ۰/۱ با تعداد نقاط ۱۲۰×۱۷۷ و شبکه افقی ۰/۰۳ با تعداد نقاط ۴۵۰×۲۵۰ استفاده شده است. شکل ۱- ب نمایی از حوزه محاسباتی را نشان می‌دهد. در این شکل، دقت بیرونی‌ترین حوزه (حوزه شماره ۱) برابر ۰/۲۵، دقت دومین حوزه (حوزه شماره ۲) برابر ۰/۱ و دقت داخلی‌ترین حوزه (حوزه شماره ۳)، برابر ۰/۰۳ است و در ۳۹ تراز قائم است. محورهای افقی و قائم طول و عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد.

با علم به اینکه هر مقدار هم که مدل عددی در شبیه‌سازی معادلات حاکم بر جو خوب عمل کند، بدون بهره‌گیری از داده‌های صحیح جهت تأمین شرایط اولیه و

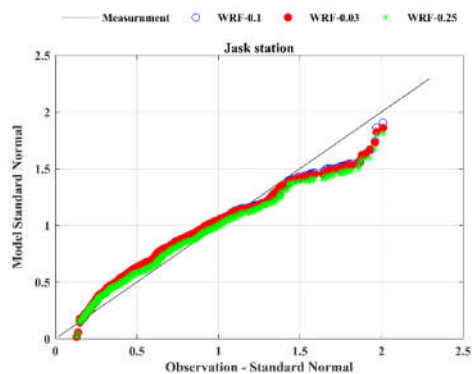


شکل ۴. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع شاخص موج، دوره تناوب و جهت حاصل از مدل و اندازه‌گیری در ایستگاه جاسک با تفکیک‌پذیری ۰/۲۵ (مربع آبی)، ۰/۱ (مربع مشکی) و ۰/۰۳ (دایره سبز توپر). مشاهدات با دایره‌های قرمز توپر نشان داده شده است. نمودار پایین، جهت موج مشخصه داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول ۲. تعدادی از سنج‌های آماری مربوط به نمودار تیلور شکل‌های ۶ و ۱۲ ایستگاه جاسک برای ارزیابی نتایج صحت‌سنجی اجراهای منتخب برای ارتفاع موج مشخصه برای بازه‌های زمانی مورد مطالعه.

ERA5-SWAN	ERA5 Wave Data	WRF-0.25	WRF-0.03	WRF-0.1	پیکربندی پارامترها
۰/۲۰۶	۰/۱۶۸	۰/۲۱۴	۰/۲۲۹	۰/۲۲۵	جذر میانگین مربعات خطا RMSE
۰/۸۴۶	۰/۹	۰/۸۳۱	۰/۸۲۹	۰/۸۳۲	ضریب همبستگی CC
۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۴۸	۰/۰۸۷	۰/۰۸۰	ارایی Bias
۰/۳۲۲	۰/۲۶۳	۰/۳۳۵	۰/۳۵۷	۰/۳۵۱	ضریب پراکندگی SI

مختصر آماری از چگونگی و میزان تطابق یک الگو یا الگوهای آماری با مشاهدات است و برای مقایسه مناسب‌تر نتایج و ارزیابی آنها استفاده می‌شود. در شکل ۶ نتایج مقایسه شبیه‌سازی‌ها به کمک این نمودار در ایستگاه جاسک برای نتایج کلی حاصل از این بخش، تمام بازه‌های اندازه‌گیری و سه تفکیک ذکر شده ارائه شده است. ضریب همبستگی برای ایستگاه جاسک که بیشتر متأثر از رژیم باد دریای عمان است، بین ۰/۸ و ۰/۸۵ است. ضرایب همبستگی و RMSE در جدول ۲ نوشته شده است. همچنین CRMSE بین ۰/۹ تا ۰/۸ است و نزدیکی به دایره مرجع برای اجراهای انجام گرفته با تفکیک ۰/۱ و ۰/۰۳ تا حدودی حاصل شده است.

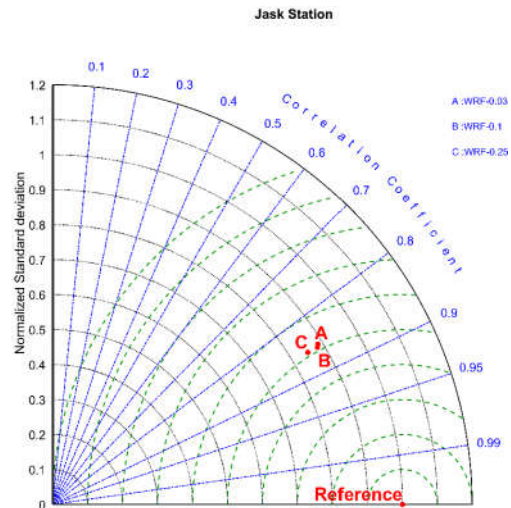


شکل ۵. نمودار Q-Q مقایسه ارتفاع موج مشخصه مدل و مشاهدات ایستگاه جاسک برای میدان باد با دقت‌های ۰/۱ (دایره آبی توخالی)، ۰/۲۵ (ستاره سبز) و ۰/۰۳ (دایره قرمز توپر).

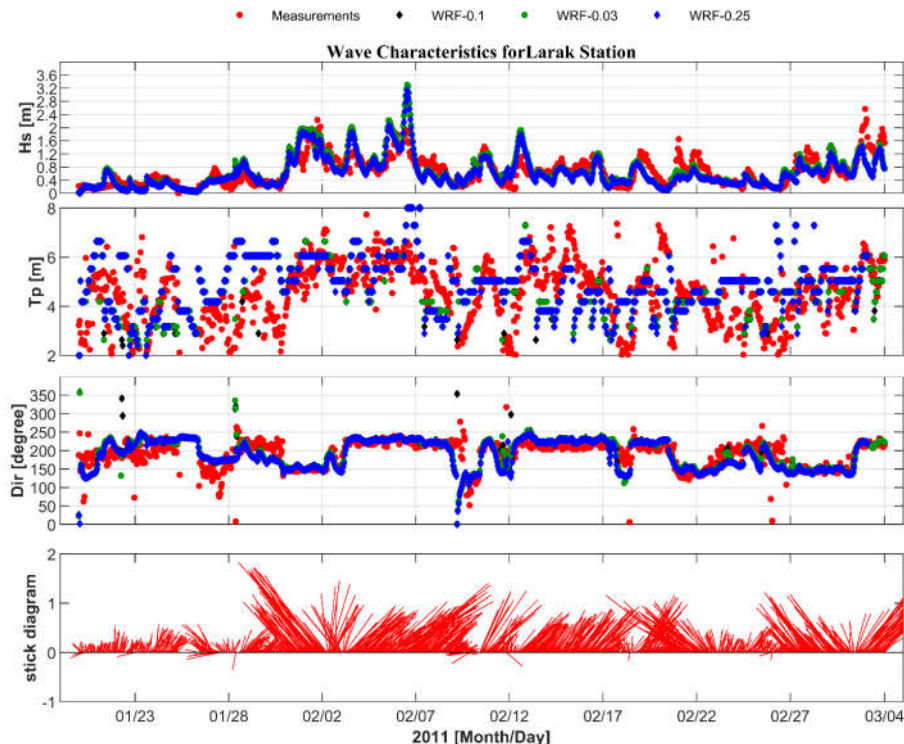
جاسک در قسمت شرقی تنگه هرمز و لارک در قسمت غربی تنگه هرمز نشان داده شده است. در شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای موج شاخص، دوره تناوب و جهت برای ایستگاه جاسک نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای بازه زمانی ۲۰۱۱/۲/۲ رخداد را تخمین پایین گرفته است. در نمودار جهتی پایین شکل، محدوده این رخداد برای بادهایی است که از سمت خلیج فارس وارد می‌شوند. رخداد بعدی در ۲۰۱۱/۲/۷ تخمین بالا گرفته شده است و با توجه به نمودار جهتی ارتفاع مشخصه برای بادهایی است که از سمت دریای عمان وارد می‌شوند. در باقی محدوده شبیه‌سازی، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود. همچنین در مقایسه سه تفکیک با یکدیگر، بهبود در نتایج برای تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ نسبت به تفکیک ۰/۲۵ مشاهده می‌شود و دو تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ بر هم منطبق هستند. جهت دوره تناوب حاصل از مدل و مشاهدات نیز تطابق قابل قبولی برای سه شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد. شکل ۵ نمایانگر نمودار Q-Q برای ارتفاع مشخصه ایستگاه جاسک است و بهبود نتایج کلی شبیه‌سازی برای ورودی میدان باد سطحی را با تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ نسبت به تفکیک ۰/۲۵ نشان می‌دهد.

در ادامه، برای ارزیابی خروجی شبیه‌سازی‌ها در نقاط مشاهدات، سنج‌های آماری شبیه‌سازی‌ها به کمک نمودار تیلور بررسی می‌شود. نمودار تیلور یک ارائه خلاصه و

نمودار سری زمانی مقایسه ارتفاع موج مشخصه، دوره تناوب و جهت برای ایستگاه لارک در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که پیش از این بررسی شد، ایستگاه لارک متأثر از دو رژیم باد دریای عمان و خلیج فارس است؛ از آنجا که جزیره‌های اطراف و پیچیدگی‌های جغرافیایی بر رژیم باد منطقه مؤثرتر است، برای رخداد حدی بازه زمانی ۲۰۱۱/۱/۳۱ تا ۲۰۱۱/۰۲/۴ که ناشی از بادهایی است که از سمت خلیج فارس می‌وزند، نتایج تخمین پایین گرفته شده است و برای بازه زمانی ۲۰۱۱/۲/۷ تا ۲۰۱۱/۲/۱۲ برای بادهایی که از سمت دریای عمان است، تخمین بالا گرفته شده است. در ادامه، برای تمام بازه‌های دیگر نیز نتایج به همین منوال است. در مقایسه کلی برای تفکیک‌های متفاوت در این ایستگاه نیز



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای تیلور برای ارتفاع موج مشخصه در ایستگاه جاسک و شبیه‌سازی مدل موج SWAN برای میدان باد WRF با تفکیک ۰/۲۵ (A)، ۰/۱ (B) و ۰/۰۳ (C).



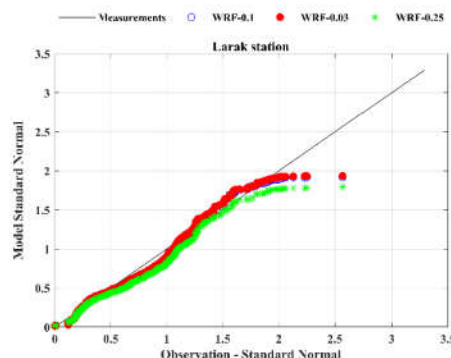
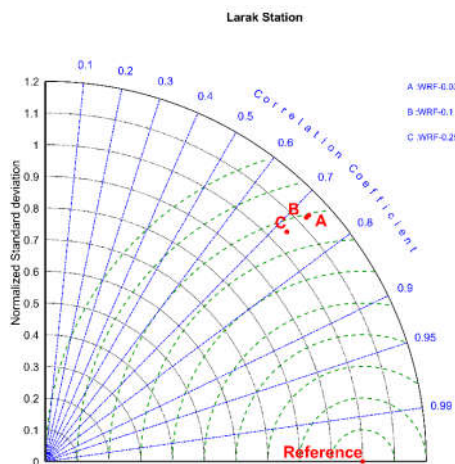
شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع شاخص، دوره تناوب و جهت موج حاصل از مدل و اندازه‌گیری در ایستگاه لارک با تفکیک‌پذیری ۰/۲۵ (مربع آبی)، ۰/۱ (مربع مشکی) و ۰/۰۳ (دایره سبز توپر). مشاهدات با دایره قرمز توپر نشان داده شده است. نمودار پایین، جهت موج مشخصه داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول ۳. تعدادی از سنج‌های آماری مربوط به نمودار تیلور شکل‌های ۹ و ۱۵ ایستگاه لارک برای ارزیابی نتایج صحت‌سنجی اجراهای منتخب برای ارتفاع موج مشخصه برای بازه‌های زمانی مورد مطالعه.

ERA5-SWAN	ERA5 Wave Data	WRF-0.25	WRF-0.03	WRF-0.1	پیکربندی پارامترها
۰/۳۵۴	۰/۳۸۰	۰/۳۱۵	۰/۳۳۰	۰/۳۲۷	جذر میانگین مربعات خطا RMSE
۰/۸۳۱	۰/۸۲۱	۰/۷۴۹	۰/۷۵۳	۰/۷۵۳	ضریب همبستگی CC
-۰/۲۷۵	-۰/۲۸۳	-۰/۰۴۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	اریبی Bias
۰/۵۲۵	۰/۵۶۴	۰/۴۶۸	۰/۴۹۰	۰/۴۸۵	ضریب پراکندگی SI

نتایج شبیه‌سازی برای ورودی میدان باد با تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ نسبت به تفکیک ۰/۲۵ بهبود نشان می‌دهد. دو تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ بر هم منطبق هستند. کادریهای مقایسه‌ای برای جهت و دوره تناوب شبیه‌سازی و مشاهدات سازگاری خوبی برای نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات نشان می‌دهند.

نتایج شبیه‌سازی برای ورودی میدان باد با تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ نسبت به تفکیک ۰/۲۵ بهبود نشان می‌دهد. دو تفکیک ۰/۰۳ و ۰/۱ بر هم منطبق هستند. کادریهای مقایسه‌ای برای جهت و دوره تناوب شبیه‌سازی و مشاهدات سازگاری خوبی برای نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات نشان می‌دهند.



شکل ۸. نمودار Q-Q مقایسه ارتفاع موج مشخصه مدل و مشاهدات ایستگاه لارک برای میدان باد با دقت‌های ۰/۱ (دایره آبی توخالی)، ۰/۲۵ (ستاره سبز) و ۰/۰۳ (دایره قرمز توپر).

شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای تیلور برای ارتفاع موج مشخصه ایستگاه لارک و شبیه‌سازی مدل موج SWAN برای میدان باد WRF با تفکیک ۰/۲۵ و (A) ۰/۰۳ و (B) ۰/۱ و (C).

۴ نتایج

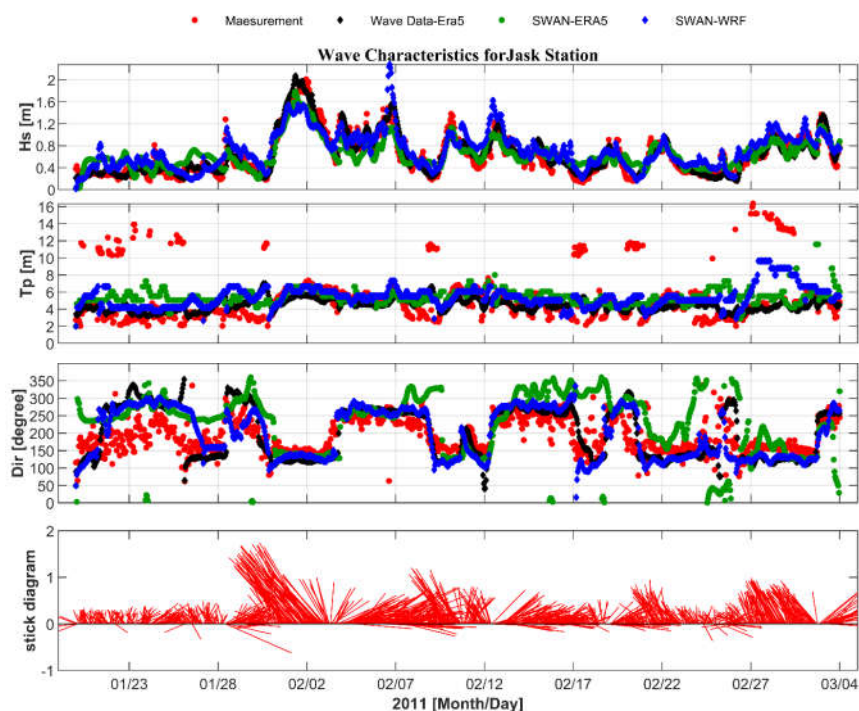
در این بخش نتایج شبیه‌سازی به کمک شبکه محاسباتی منتخب با مشخصات مشروح در بخش ۲-۳-۱، واداشت باد حاصل از مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF، داده‌های

در مقایسه ارتفاع موج مشخصه در نمودار Q-Q شکل ۸، بهبود نتایج برای تفکیک‌های ۰/۰۳ و ۰/۱ بهتر دیده می‌شود. نمودار تیلور برای ارتفاع موج مشخصه ایستگاه لارک در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر ضریب همبستگی در حدود ۰/۷۵ است. در جدول ۳ مقادیر

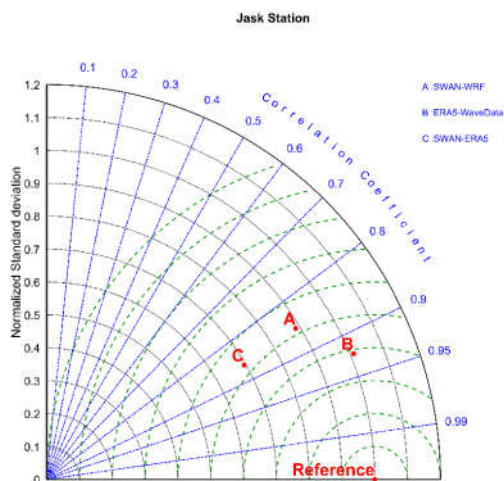
و داده‌های موج ERA5 تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در نمودار جهتی پایین شکل، چهار محدوده این رخداد برای بادهایی است که از سمت خلیج فارس وارد می‌شوند. رخداد بعدی در ۲۰۱۱/۰۲/۰۷ شبیه‌سازی با مدل SWAN و میدان باد حاصل از WRF تخمین بالا گرفته شده است و با توجه به نمودار جهتی ارتفاع مشخصه برای بادهایی است که از سمت دریای عمان وارد می‌شوند. در باقی محدوده شبیه‌سازی، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود. نمودار جهت و دوره تناوب برای شبیه‌سازی مدل SWAN با داده‌های میدان باد WRF و داده‌های موج ERA5 تطابق بهتری را نسبت به شبیه‌سازی با مدل SWAN و داده‌های باد ERA5 نشان می‌دهد.

میدان باد سطحی ERA5 از مرکز ECMWF و به‌کارگیری این داده‌ها به‌عنوان ورودی به مدل موج بررسی می‌شود. همچنین مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری برای بازه چهار روزه از ماه اول تا سوم سال ۲۰۱۱ و نتایج شبیه‌سازی به‌صورت نمودار و تحلیل آماری نشان داده شده و ارزیابی ارتفاع موج شاخص برای مدل موج با داده‌های اندازه‌گیری موجود برای دو ایستگاه جاسک و لارک انجام شده است.

در شکل ۱۰ نمودار سری زمانی ارتفاع موج مشخصه، دوره تناوب و جهت در ایستگاه جاسک ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، رخداد در تاریخ ۲۰۱۱/۰۲/۰۲ برای شبیه‌سازی با مدل SWAN و ورودی‌های میدان باد و موج ERA5 و همچنین شبیه‌سازی با مدل SWAN و میدان باد WRF تخمین پایین گرفته شده است



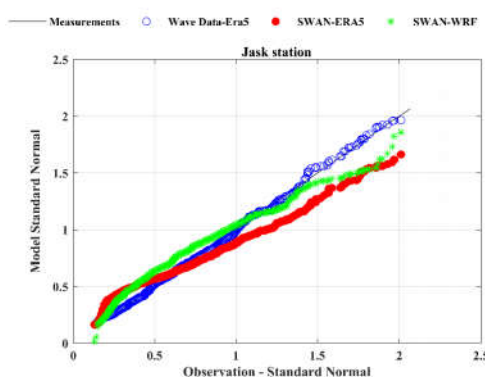
شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع مشخصه، دوره تناوب و جهت موج حاصل از مدل و اندازه‌گیری در ایستگاه جاسک. داده‌های مشاهداتی با دایره قرمز توپر، داده‌های موج ERA5 با مربع مشکی، شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و میدان باد ERA5 با دایره سبز توپر و شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و داده‌های باد WRF با مربع آبی نشان داده شده است. کادر پایین جهت موج مشخصه داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای تیلور برای ارتفاع موج مشخصه ایستگاه‌های جاسک. شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و ورودی میدان باد WRF با حرف A، داده‌های موج ERA5 با حرف B و شبیه‌سازی مدل SWAN و میدان باد ERA5 با حرف C نشان داده شده است.

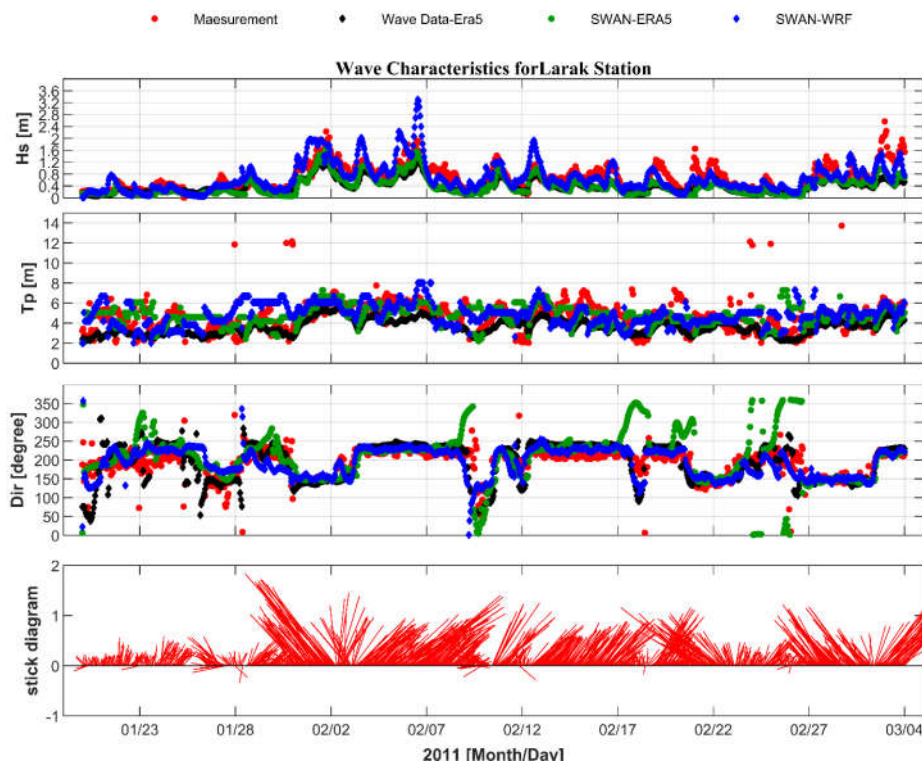
شکل ۱۳ نمودار سری زمانی ارتفاع موج مشخصه، دوره تناوب و جهت را در ایستگاه لارک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی با مدل SWAN و داده‌های باد سطحی ERA5 و داده‌های موج ERA5، هر دو رخداد تاریخ ۲۰۱۱/۲/۲ را تخمین پایین گرفته‌اند. امواج این بازه زمانی ناشی از بادهای خلیج فارس هستند. شبیه‌سازی مدل SWAN با داده‌های باد WRF، نتایج را بهبود بخشیده است. همچنین برای رخداد حدی تاریخ ۲۰۱۱/۲/۱۲ نتایج شبیه‌سازی SWAN با داده‌های باد WRF تخمین بالا می‌گیرد. امواج این بازه زمانی ناشی از بادهای دریای عمان است. در محدوده ۲۰۱۱/۲/۲۲ نیز دو شبیه‌سازی با کمک مدل SWAN و داده‌های باد ERA5 و داده‌های موج ERA5 تخمین پایین گرفته‌اند و در شبیه‌سازی با مدل SWAN با کمک داده‌های باد WRF این امر اصلاح شده و بهبود چشمگیری داشته است. در نمودار پایینی شکل ۱۳ برای دوره تناوب و جهت، نتایج اجرای مدل SWAN

شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای Q-Q برای ایستگاه جاسک را نشان می‌دهد که نتایج مطلوب‌تر برای داده‌های موج ERA5 با بیشترین همبستگی و کمترین ضریب پراکندگی حاصل شده است. مقادیر سنجه‌های آماری مربوط به این بخش در جدول ۲ ارائه شده است. پس از آن، نتایج شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و داده‌های باد WRF عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

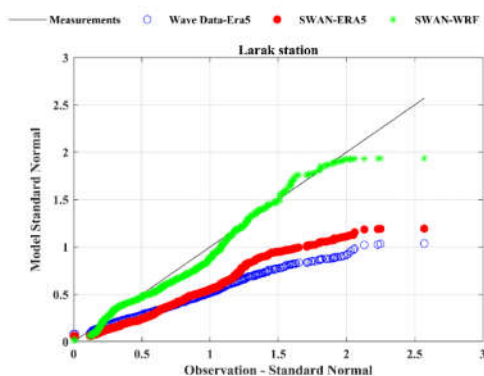


شکل ۱۱. نمودار Q-Q مقایسه ارتفاع موج مشخصه مدل و مشاهدات ایستگاه جاسک. داده‌های موج ERA5 با دایره آبی توخالی، شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و میدان باد ERA5 با دایره توپر قرمز و شبیه‌سازی داده‌های موج با مدل SWAN با داده‌های باد WRF با ستاره سبز نشان داده شده است.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری به کمک سنجه‌های آماری برای ایستگاه جاسک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ضریب همبستگی برای شبیه‌سازی A که معرف شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و مدل باد WRF است، در حدود ۰/۸۳، برای شبیه‌سازی B که نمایانگر داده‌های موج ERA5 است، حدود ۰/۹ و برای شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و داده‌های بازتحلیل ERA5 کمتر از ۰/۸۵ است. همچنین CRMSE و انحراف معیار برای A حدود ۰/۹، برای B حدود ۱ و برای C حدود ۰/۷ است.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع مشخصه، دوره تناوب و جهت موج حاصل از مدل و اندازه‌گیری در ایستگاه لارک. داده‌های مشاهده‌ای با دایره قرمز توپر، داده‌های موج ERA5 با مربع مشکی، شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و میدان باد ERA5 با دایره سبز توپر و شبیه‌سازی داده‌های موج با مدل SWAN و داده‌های باد WRF با مربع آبی نشان داده شده است. کادر پایین، جهت موج مشخصه داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. نمودار Q-Q مقایسه ارتفاع مشخصه مدل و مشاهدات ایستگاه لارک. داده‌های موج ERA5 با دایره آبی توخالی، شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و میدان باد ERA5 با دایره قرمز توپر و شبیه‌سازی داده‌های موج با مدل SWAN و داده‌های باد WRF با ستاره سبز نشان داده شده است.

و داده‌های باد WRF و داده‌های موج ERA5، همانند آنچه برای ایستگاه جاسک شرح داده شد، تطابق بهتری نسبت به اجرا با مدل SWAN و داده‌های ERA5 نشان داده است.

شکل ۱۴ نمودار Q-Q برای ایستگاه لارک و مقایسه هر سه شبیه‌سازی ذکر شده پیشین را برای ارتفاع موج مشخصه با داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد. نتایج، تخمین پایین را که شبیه‌سازی با مدل SWAN و با کمک داده‌های باد ERA5 و داده‌های موج ERA5 داشته است، به‌خوبی نشان می‌دهد. علاوه‌براین، بهبود نتایج شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و با داده‌های باد WRF مشهود است. با توجه به سنجه‌های آماری در جدول ۳، کاهش ضریب پراکندگی و اریبی و RMSE گواهی بر این بهبود است.

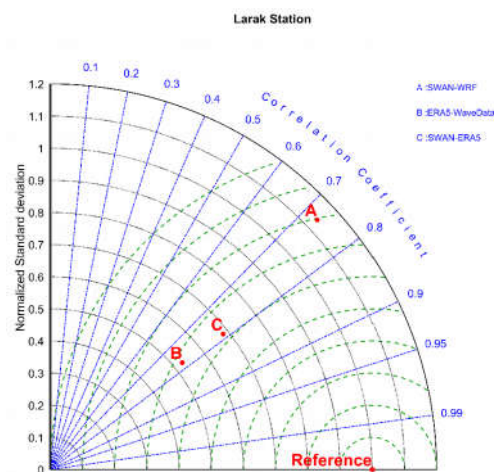
راهبردی‌ترین مسیرهای بین‌المللی کشتیرانی در جهان و دومین تنگه بین‌المللی پرتردد دنیا است و نقشی کلیدی در تأمین بی‌وقفه انرژی دنیا دارد. این ویژگی‌های مهم، ضرورت بررسی امواج در منطقه را دوچندان می‌کند. این تنگه تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، بر سامانه باد اثر می‌گذارد؛ از این رو، اهمیت تدقیق نتایج بیشتر می‌شود. به همین دلیل از مدل موج SWAN که با رویکرد استفاده در نواحی کم‌عمق توسعه یافته، برای دستیابی به نتایج بهتر استفاده شده است. همچنین برای تأمین داده‌های میدان باد، از نتایج مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF استفاده شد. این مدل، پدیده‌های ریزمقیاس حاکم بر منطقه را به خوبی نشان می‌دهد (نتایج شبیه‌سازی‌ها در نمودارهای بخش‌های قبلی بررسی شد).

بر اساس خروجی‌های به‌دست‌آمده از اجرای چهل روزه مدل، الگوی تغییرات ارتفاع موج مشخصه با کمک سنج‌های آماری بررسی و ارزیابی شد. برای راستی‌آزمایی دامنه تغییرات مقادیر، از داده‌های مشاهداتی موجود استفاده شد.

از دستاوردهای این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

➤ نتایج مقایسه‌های انجام‌گرفته به کمک سنج‌های آماری و نمودار تیلور برای تمام شبیه‌سازی‌ها و داده‌های موج ERA5 با داده اندازه‌گیری، نشان از تطابق ۰/۰۹ درصدی داده‌های موج ERA5 برای ایستگاه جاسک دارد. با توجه به واقع شدن ایستگاه جاسک در قسمت اقیانوسی منطقه مورد مطالعه و رویکرد مدل موج به‌کاررفته در شبیه‌سازی امواج با ECMWF با عملکرد بهتر در نواحی عمیق و دورتر از ساحل، نتیجه قابل قبول به نظر می‌رسد. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل تفکیک افقی ۰/۵ درجه داده‌های موج ERA5 که جهت مقایسه استفاده شده‌اند، نزدیک‌ترین نقطه به ایستگاه اندازه‌گیری انتخاب شده است؛ بنابراین دقیقاً همان موقعیت ایستگاه را

مقایسه‌های آماری انجام‌شده برای سه شبیه‌سازی مذکور با داده‌های اندازه‌گیری برای ارتفاع موج مشخصه در ایستگاه لارک به شرح زیر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. برای A که نمایانگر شبیه‌سازی با مدل موج SWAN داده‌های باد به‌دست‌آمده از مدل WRF بود، مقدار ضریب همبستگی حدود ۰/۷۵ و انحراف معیار و میانگین جذر خطای مربعات حدود ۱/۱ است. برای B که نمایانگر داده‌های موج ERA5 است، ضریب همبستگی حدود ۰/۸ و RMSE و انحراف معیار در حدود ۰/۵ است. برای C که نمایانگر شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و داده‌های باد ERA5 است، ضریب همبستگی حدود ۰/۸۳ و RMSE و انحراف معیار حدود ۰/۷ است.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه‌ای تیلور برای ارتفاع موج مشخصه ایستگاه لارک. شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و ورودی میدان باد WRF با حرف A، داده‌های موج ERA5 با حرف B و شبیه‌سازی مدل SWAN و ورودی میدان باد ERA5 با حرف C نشان داده شده است.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، بهبود نتایج شبیه‌سازی اولیه انجام شده در محدوده تنگه هرمز به کمک مدل موج SWAN و داده‌های ERA5، با کمک داده‌های باد حاصل از مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF است. تنگه هرمز یکی از

ندارد و این امر روی نتایج مقایسه‌ها بی تأثیر نیست.

➤ نتایج شبیه‌سازی برای ایستگاه لارک، که خود متأثر از دو رژیم باد خلیج فارس و دریای عمان است، بهبود یافته است. پیچیدگی‌های جغرافیایی خشکی‌های اطراف بر رژیم باد این منطقه تأثیر دارند. در این ایستگاه، شبیه‌سازی با مدل موج SWAN و داده‌های باد WRF عملکرد بهتری را نشان می‌دهد و تخمین پایین شبیه‌سازی‌ها با مدل موج SWAN و داده‌های باد ERA5 و داده‌های موج ERA5 را بهبود بخشیده است. میزان انحراف معیار و CRMSE از حدود ۰/۵ به حدود ۱/۱ رسیده و مقدار اریبی منفی به اریبی مثبت تغییر کرده و کاهش یافته است. RMSE نتایج شبیه‌سازی با مدل SWAN و داده‌های باد WRF به میزان ۱۰ درصد کاهش داشته است.

➤ نمودار سری زمانی از نتایج شبیه‌سازی شده با مدل موج SWAN و ورودی داده‌های باد حاصل از مدل WRF با تفکیک‌های ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۰۳ برای دو ایستگاه جاسک در قسمت شرقی تنگه هرمز و ایستگاه لارک در قسمت غربی تنگه هرمز نشان‌دهنده این است که افزایش تفکیک افقی شبکه باد ورودی به مدل موج، بهبود نتایج شبیه‌سازی را به دنبال دارد، ولی باید توجه داشت که این افزایش تا حدودی بهینه است و برای تفکیک بیشتر از ۰/۱ در روند نتایج تغییری ایجاد نمی‌کند؛ بنابراین شرط بهینه بودن و اقتصادی بودن اجراها ایجاب می‌کند همان شبکه‌ای به کار گرفته شود که با تفکیک ۰/۱ نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر آنند تا در خصوص تأمین و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری از سازمان بنادر و دریانوردی و سازمان نقشه‌برداری کشور کمال تشکر را به عمل آورند. همچنین از دانشگاه تهران جهت حمایت از این کار پژوهشی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- حافظ نیا، م.، ۱۳۷۸، خلیج فارس و نقش استراتژیک تنگه هرمز: انتشارات مهر.
- قادر، س.، یازجی، د.، سلطان‌پور، م.، نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۴، به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس: مجله هیدرو فیزیک، ۱، ۴۱-۵۴.
- محمد مهدیزاده، مهدی.، اسلامی، ف.، آبادی، م.، پاخیره زن، م.، ۱۳۹۳، شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در تنگه هرمز با استفاده از مدل عددی مایک، مطالعه موردی: جزیره لارک: شانزدهمین همایش صنایع دریایی، بندرعباس، انجمن مهندسی دریایی ایران.
- Al-Hajri, K., 1990, The circulation of the Arabian (Persian) Gulf: A model study of its dynamics: Ph.D. Dissertation, The Catholic University of America, Washington, D. C.
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J., and Mendoza, E. T., 2013, Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment: Applied Ocean Research, **39**, 20-30.
- Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J. R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J. M., and Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea: Ocean Engineering, **34**(3-4), 526-541.
- Booij, N., Ris, R., and Holthuijsen, L., 1999, A third-generation wave model for coastal regions I, Model description and validation: Journal of Geophysical Research, **104**, 7649-7666.10.1029/98JC02622.
- Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Bidlot, J. R., Breivik, Ø., Carniel, S., Jensen, R. E., Portilla-Yandun, J., Rogers, W. E., Roland, A., et al., 2018, Wave modelling in coastal and inner seas: Progress in Oceanography, **167**, 164-233.
- Cavaleri, L., and Bertotti, L., 2003, The characteristics of wind and wave fields modelled with different resolutions: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **129**(590), 1647-1662.

- Cavaleri, L., and Bertotti, L., 2006, The improvement of modelled wind and wave fields with increasing resolution: *Ocean Engineering*, **33**(5-6), 553-565.
- Chawla, A., Spindler, D. M., and Tolman, H. L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the climate forecast system reanalysis winds: *Ocean Model*, **70**, 189–206, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.07.005>.
- De León, S. P., Orfila, A., Gómez-Pujol, L., Renault, L., Vizoso, G., and Tintoré, J., 2012, Assessment of wind models around the Balearic Islands for operational wave forecast: *Applied Ocean Research*, **34**, 1-9.
- De León, S. P., and Soares, C. G., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea: *Coastal Engineering*, **55**(11), 920-929.
- Durrant, T. H., Greenslade, D. J., and Simmonds, I., 2013, The effect of statistical wind corrections on global wave forecasts: *Ocean Modelling*, **70**, 116-131.
- Ghader, S., Yazgi, D., Haghshenas, S. A., RazaviArab, A., Jedari Attari, M., Bakhtiari, A., Zinsazboroujerdi, H., 2016a, Hindcasting tropical storm events in the Oman Sea: *Journal of Coastal Research*, **75**(sp1), 1087-1091.
- Ghader, S., Yazgi, D., Soltanpour, M., and Nemati, M. H., 2016b, On the use of an ensemble forecasting for prediction of surface wind over the Persian Gulf: *Proceedings of the 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2016)*.
- Hagen, S. C., Zundel, A. K., and Kojima, S., 2006, Automatic, unstructured mesh generation for tidal calculations in a large domain: *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **20**(8), 593-608.
- Haghshenas, S. A., Ghader, S., Yazgi, D., Delkosh, E., Rashedi Birgani, N., Razavi Arab, A. N., Hajisalimi, Z., Nemati, M. H., Soltanpour, M., and Jedari Attari, M., 2018, Iranian seas waters forecast - Part I: An improved model for the Persian Gulf: *Journal of Coastal Research*, **85**, 1216-1220.
- Hersbach, H., and Dee, D., 2016, ERA5 reanalysis is in production: *ECMWF Newsletter*, **147**(7), 5-6.
- Kazeminezhad, M. H. and Siadatmousavi, S. M., 2017, Performance evaluation of WAVEWATCH III model in the Persian Gulf using different wind resources: *Ocean Dynamics*, **67**(7), 839-855.
- Kumar, R., Sarkar, A., Aggarwal, V., Bhatt, V., Bhaskaran, P., and Dube, S., 2000, Ocean wave model: sensitivity experiments: *Proceedings of the 5th International Conference PORSEC*, 621–626.
- Lavidas, G., Venugopal, V., and Friedrich, D., 2017, Sensitivity of a numerical wave model on wind re-analysis datasets: *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **77**, 1-16.
- Mariotti, G., Huang, H., Xue, Z., Li, B., Justic, D., and Zang, Z., 2018, Biased wind measurements in estuarine waters: *Journal of Geophysical Research, Oceans*, **123**(5), 10.1029/2017JC013748.
- Moeini, M. H., Etemad-Shahidi, A., and Chegini, V., 2010, Wave modeling and extreme value analysis off the northern coast of the Persian Gulf: *Applied Ocean Research*, **32**, 209–218.
- Moeini, M. H., Etemad-Shahidi, A., Chegini, V., Rahmani, I., 2012, Wave data assimilation using a hybrid approach in the Persian Gulf: *Ocean Dynamics*, **62**, 785–797.
- Nayak, S., Sandeepan, B. S., and Panchang, V., 2016, Effect of high resolution winds on wind-wave simulations in Arabian Gulf: *Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings 2016*, EEPP2869 <http://dx.doi.org/10.5339/qfarc.2016.EEPP2869>.
- GlobOcean., FaraDarya., Sogreah., DaryaNegar., 2010, *Monitoring and Modeling Studies of Coastal Zone of HORMOZGAN, Port and marine organization (PMO)*.
- Rasclé, N., and Ardhuin, F., 2013, A global wave parameter database for geophysical applications, Part 2: model validation with improved source term parameterization: *Ocean Modelling*, **70**, 174–188.
- Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1997. Spectral modelling of current induced wave-blocking. In *Coastal Engineering 1996* (pp. 1247-1254).
- Rogers, W.E., Wittmann, P.A., Wang, D.W., Clancy, R.M. and Hsu, Y.L., 2005. Evaluations of global wave prediction at the Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center. *Weather and forecasting*, **20**(5), pp.745-760.
- Sharifi, F. S., Ezam, M., and Karimi, K. A., 2012, Evaluating the results of Hormuz strait wave simulations using WAVEWATCH-III and MIKE21-SW: *International Journal of Marine Science and Engineering*, **2**, 163–170.
- Siadatmousavi, S., Jose, F., and Stone, G., 2009,

- Simulating hurricane Gustav and Ike wave fields along the Louisiana innershelf: implementation of an unstructured third-generation wave model: SWAN Proc. Oceans. Signell, R. P., Carniel, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Doyle, J. D., Pullen, J., and Sclavo, M., 2005, Assessment of wind quality for oceanographic modelling in semi-enclosed basins: Journal of Marine Systems, **53**(1-4), 217-233.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Duda, M., Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR.
- Stopa, J. E., and Cheung, K. F., 2014, Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF reanalysis interim and the NCEP climate forecast system reanalysis: Ocean Modelling, **75**, 65-83.
- Van Vledder, G. P., and Akpınar, A., 2015, Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields: Applied Ocean Research, **53**, 161-178.
- Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S. Z. X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J., 2010, User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Version 3.5, NCAR.
- World Meteorological Organisation, 2008, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO-No. **8**, Geneva, Switzerland.

Wave simulations under the effects of geographical complexity over the Strait of Hormuz

Fatemeh Ameri¹, Sarmad Ghader^{2*} and Seyyed Abbas Haghshenas³

¹M.Sc. Student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 02 March 2020, Accepted: 03 June 2020)

Summary

Reliable wave estimation in complex body of waters from geographical point of view is a matter of high importance. Main straits in the world, such as the Strait of Hormuz are major referent for this issue. Marine activities such as coastal management and ship routing, navigation, maintenance, and installation of offshore infrastructure are all greatly dependent on reliable wave estimations. Predicting waves in a region requires a well-developed wave model that can account for the shallow water wave mechanisms like their generation, propagation, and dissipation. On the other hand, reliable input wind data is a pre-requisite for realistic wave estimation, while the winds over such environments are highly affected by the land features around the straits. The wind data accuracy is also dependent on horizontal resolution of the models to capture the meso-scale dominant phenomena in the interest region.

This study aims to develop a wave model employing SWAN wave model, in order to improve wave estimations over the Strait of Hormuz, where is highly affected by geographical complexity. Initially, the simulation is carried out for more than one month from January to May for period of 40 days of 2011. The main parameters of the model were assigned based on a comprehensive sensitivity analysis study and the model performance was verified based on the available archive field data for two stations Jask and Larak in the eastern part and western part of Strait of Hormuz, respectively. The numerical modeling activities are conducted to adopt two sources of surface wind data. The first adopted dataset, ECMWF's hourly ERA5 product, is based on the presence of meso-scale locally convective phenomena such as land-seas breeze which is dominant in a water body like the Persian Gulf. ERA5 reanalysis dataset, which is the best available wind source, misses these features (because of low resolution) and in turn, when it is used to force the wave models, may result in predicting less accurate wave fields. For improving wind data accuracy, the second dataset, i.e., the high resolution meso-scale atmospheric model WRF was adopted to generate a more realistic wind field. This model reflects the meso-scale phenomena and using it to force the wave model, reflects more accurate wave fields over study area. Different model resolutions are also tested and the result showed that reducing the horizontal resolution for wind field improves the result. The final model results show a significant improvement in wave estimations in the middle of the Strait of Hormuz for coupling wave model SWAN and using WRF wind data. For Larak station, the RMSE decreases 10 percent in comparison to ERA5 wave data and CC (Corolation Coefficient) get to about 0.75. For Jask staion in eastern part of Strait of Hurmoz, ERA5 wave data CC is about 0.9 which is the best performance.

Keywords: Hurmoz Strait, wave simulation, SWAN model, WRF model, coupling

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir