

ارزیابی الگوی امواج تحت تاثیر باد موسمی در شمال غرب خلیج فارس با استفاده از شبیه‌سازی همزمان جو و موج

محمد پاخیره‌زن^۱، مریم راه‌بانی^{۲*}، حسین ملکوتی^۳

۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: mht_pa@yahoo.com
۲- دانشیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: maryamrahbani@yahoo.com
۳- دانشیار گروه هواشناسی و علوم جوی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: malakooti@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۳

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۳۰

چکیده

این مطالعه به منظور شبیه‌سازی الگوی امواج در مدت وزش باد شمال زمستانی در شمال غرب خلیج فارس انجام گرفت. به منظور ارزیابی الگوی امواج تحت تاثیر رخداد شمال زمستانی، از سیستم شبیه‌سازی همزمان جو و موج COWAST استفاده شد. بدین منظور، مدل جوی WRF و مدل موج SWAN به واسطه یک مدل هم‌پوشاننده MCT به طور همزمان اجرا شدند. باد شمال زمستانی، یک باد شمال غربی است که می‌تواند موجب افزایش قابل توجه در ارتفاع امواج شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی موج برای ارتفاع موج شاخص، یک جهش ارتفاعی را در شروع وزش باد شمال نشان داد. این موج نسبت به قبل از شروع آن اختلاف ارتفاعی در حدود ۱/۱ متر داشت و جهت غالب موج شمال تا شمال غربی بود که متاثر از جهت وزش باد شمال زمستانی است. محاسبه پارامترهای آماری برای باد و امواج شبیه‌سازی شده توسط مدل همزمان جو و موج COAWST به نسبت قابل ملاحظه‌ای، پیش‌بینی بهتری را نسبت به شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل‌های منفرد WRF (برای باد) و SWAN (برای موج) نشان دادند. بدین منظور می‌تواند مدلی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی در شرایط طوفانی باشد.

کلمات کلیدی: باد شمال، موج، COAWST، SWAN، WRF، خلیج فارس.

۱. مقدمه

شمال‌غربی هستند. در زمستان بین ماه‌های نوامبر تا فوریه، سرعت باد (بطور متوسط در حدود پنج متر بر ثانیه) نسبت به تابستان بین ماه‌های ژوئن تا سپتامبر (بطور متوسط در حدود سه متر بر ثانیه) شدیدتر است (Thoppil and Hogan, 2010a).

بادهایی که در فصول متضاد سال با جهت‌های مختلف می‌وزند بادهای موسمی^۱ هستند. باد شمال یک باد موسمی، سیستماتیک، مداوم و قوی در منطقه خلیج فارس است، که

خلیج فارس یک حوضه نیمه محصور کم‌عمق و یک قسمت بسیار مهم از آب‌های اقیانوسی است. آب و هوای خلیج فارس می‌تواند به دو فصل مهم و دو دوره گذار تقسیم بندی شود. فصل تابستان از ژوئن تا سپتامبر و گذار پاییزی از اکتبر تا نوامبر و همچنین فصل زمستان از دسامبر تا مارس و گذار بهاری از آوریل تا می می‌باشد (Walters and Sjoberg, 1990). بادهایی که روی خلیج فارس می‌وزند بطور عمده در طول سال از جهت

¹ Monsoon Wind

پیش‌بینی اقلیم موج تحت شرایط طوفان و باد شدید با بسترهای پیچیده در سیستم‌های ساحلی چالش برانگیز است، مدل موج SWAN یکی از مدل‌های مناسب برای مدلسازی موج در این مناطق به شمار می‌رود (Groeneweg et al., 2015).

در سال‌های اخیر دقت مدل‌های موج به طور قابل توجهی بهبود یافته است که علت آن، کیفیت بهتر میدان‌های بادی است که توسط شبیه‌سازی‌های عددی جوی با تفکیک فضایی بالا ارائه می‌شوند و عملکرد مدل‌های موج به شدت وابسته به این میدان‌های باد است (Ardhuin et al., 2007; Rusu et al., 2014). مدل هیدرودینامیکی منطقه‌ای WRF (Skamarock et al., 2005) به عنوان یک ابزار برای شبیه‌سازی عددی جو با وضوح زمانی و مکانی بالا طراحی و ارائه شده است (Toropov et al., 2012). از سوی دیگر در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای توسعه مدل‌های عددی به منظور مطالعه و پیش‌بینی پدیده‌های محیطی به صورت همزمان با مقیاس‌های زمانی و مکانی متنوع به عمل آمده است که از آن جمله می‌توان به مدلسازی با چند ابزار یا رویکرد شبیه‌سازی همزمان، اشاره نمود (Warner et al., 2008). همزمانی اجرای شبیه‌سازی‌های عددی موجب می‌شوند تحقیق‌های مرتبط، با دقت و پیچیدگی بیشتری انجام شوند. برای نمونه پیشرفت در ارائه دینامیک دریا در نزدیک ساحل به علت تلفیق مدل‌های موج و اقیانوس بدست آمده است (Lesser et al., 2004 و Warner et al., 2008). به علت نزدیک بودن به شرایط واقعی و قابل اعتماد بودن نتایج، اجرای همزمان شبیه‌سازی‌های جو و اقیانوس برای موارد واقعی و ایده‌آل، توسعه یافته‌اند و بکار گرفته می‌شوند (Chen et al., 2007; Bender et al., 2007).

در تحقیق حاضر نوعی از سیستم شبیه‌سازی همزمان برای تشخیص برهمکنش‌های فرآیندهای فیزیکی مختلف، به منظور تحلیل تاثیر بادهای سیستماتیک بر امواج به‌کار گرفته شد. بدین منظور، از سیستم شبیه‌سازی همزمان جو، اقیانوس و موج^۱ COAWST که توسط Warner و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است، استفاده گردید. این مجموعه به گونه‌ای توسعه یافته است که اجرای همزمان مدل موج با مدل‌های اقیانوسی و جوی امکان‌پذیر باشد که شامل برهمکنش اثرات دمای سطح دریا، سرعت، جهت باد و پارامترهای موج است. COAWST مدل پیش‌بینی و تحقیق آب و هوایی^۲ WRF، مدل نسل سوم امواج اقیانوسی^۱ SWAN و

می‌تواند چند روز بوزد و برابر با نیروی طوفان، امواجی به ارتفاع سه تا چهار متر در یک دریای باز ایجاد نماید (Glejin et al., 2013). باد شمال در دو نوع تابستانی و زمستانی است. باد شمال تابستانی عمدتاً 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 (Abdi Vishkaee et al., 2012). هنگام وقوع رخداد شمال زمستانی و همزمان با عبور یک جبهه سرد از شمال خلیج فارس، بادی که از سمت شمال‌غربی می‌وزد تا پنج برابر نسبت به سرعت اولیه خود قوی‌تر می‌شود و در مرکز خلیج فارس و نزدیک به سطح به مقدار ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه می‌رسد (Thoppil and Hogan, 2010b). الگوی فشاری خاص تراز پایین در فصل سرد، سبب ایجاد میدان باد شمال‌غربی در جنوب ترکیه، سراسر عراق و نهایتاً خلیج فارس می‌شود که عامل مهمی در برداشت و انتقال گردوغبار در این مناطق است (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۵).

امواج ناشی از باد معمولاً بیشترین اثر را بر فعالیت‌های بشری در محیط دریا دارند و لذا اطلاع از الگوی موج در دریا بسیار حائز اهمیت است. هنگامی که امواج به ساحل نزدیک می‌شوند، به علت تغییر در ارتفاع، شکست و تفرق موج، تحولاتی را تجربه می‌کنند که ناشی از تغییرات عمق و جریان آب در آن منطقه است (De Leon et al., 2011). از سویی توسعه پایدار فعالیت‌های اقتصادی در محیط‌های دریایی نیاز به داده‌های بلند مدت درباره شرایط محیطی مانند امواج ناشی از باد دارد. بر این اساس، دانستن اقلیم امواج ناشی از باد در مطالعاتی مانند طراحی سازه‌های ساحلی، انتقال رسوب، فرسایش سواحل و آلودگی در دریا ضروری است (Moeini and Etemadshahidi, 2007).

امروزه استفاده از روش‌های عددی برای پیش‌بینی وقایع طبیعی به امری رایج تبدیل شده است (Warner et al., 2010). مدل شبیه‌سازی امواج نزدیک ساحل (SWAN)، اگر چه در اصل برای محیط‌های ساحلی طراحی شده است، اما این مدل برای استفاده در محیط‌های نیمه بسته دریایی نیز بسیار ایده‌آل است (Rusu and Raileanu, 2016). پژوهشگران، تحقیقاتی از کاربری و یا ارتقاء این مدل شبیه‌سازی موج را ثبت کرده‌اند. به طور مثال Holthuijsen و همکاران (۲۰۰۰)، مدل SWAN را به عنوان یک مدل با تفکیک مکانی-زمانی بالا ارتقا دادند. این مدل دامنه وسیعی از گزینه‌های پیکربندی برای اجرای برنامه‌های متنوع را برای کاربر فراهم می‌کند (Dykes et al., 2002). با توجه به اینکه

¹ Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport

² Weather Research and Forecasting

انجام شد. نتایج نشان داد که اتلاف انرژی موج توسط مدل موج SWAN در تغییر جریان دریایی و بازخورد حرارتی بوسیله مدل WRF در تغییر دمای آب به علت گذر طوفان موثر است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس یک دریای حاشیه‌ای است و با خط ساحلی ۳۰۰۰ کیلومتر در جنوب ایران قرار دارد که بیشترین خط ساحلی متعلق به ایران است. طول متوسط آن در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر، بیشترین عرض آن ۳۳۶ کیلومتر و بیشترین عمق آن کمی بیشتر از ۹۰ متر است (Reynolds, 1993). منطقه مورد مطالعه در شمال غربی خلیج فارس تقریباً بین ۲۸ تا ۳۰/۵۰ درجه شمالی و ۴۷/۵۰ تا ۵۱/۵۰ درجه شرقی قرار دارد. مساحت آن در حدود ۱۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع است. عمق‌سنجی این منطقه با تفکیک مکانی-زمانی ۱ دقیقه از مجموعه داده‌های شبکه‌بندی ارتفاعی جهانی و از پایگاه http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi در دسترس قرار گرفت (شکل ۱).

۲-۲ باد شمال زمستانی

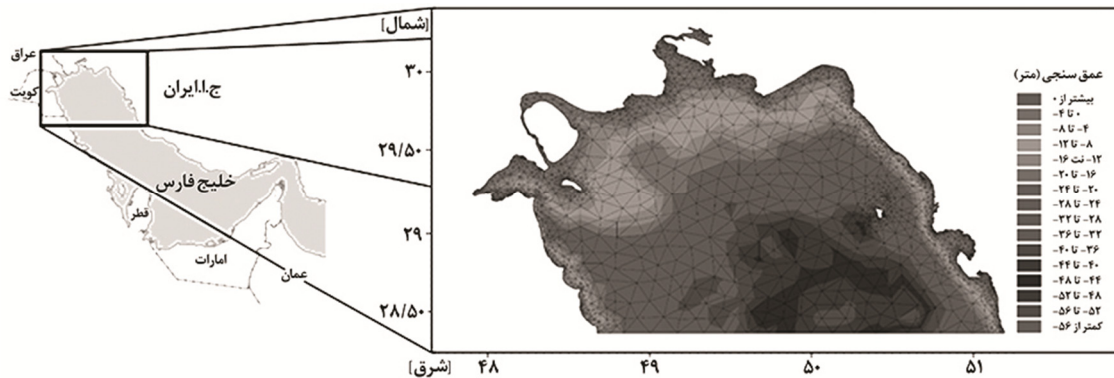
در فصل زمستان، یک جبهه پرفشار از شمال غربی تا جنوب شرقی خلیج فارس گسترش می‌یابد و همزمان یک الگوی کم‌فشار در سواحل شمالی خلیج فارس و میانه رشته کوه زاگرس به وجود می‌آید که نتیجه این توزیع فشار، بادهایی با جهت شمال و شمال‌غربی است (قادری و همکاران، ۱۳۸۹). همراه با قوت گرفتن الگوی پرفشار در جنوب‌غرب آسیا، بعد از گذشتن یک جبهه سرد هنگامی که الگوی کم‌فشار روی مناطقی از شمال و شرق خلیج فارس به حالت پایدار برسد، باد شمال زمستانی تشکیل می‌شود. این باد نسبتاً قوی به مدت ۳ تا ۵ روز روی خلیج فارس می‌وزد. در حالت کلی برای اینکه تشخیص داده شود که چه روزهایی در سال تحت تاثیر این پدیده قرار دارند یک معیار واقعی توسط محققین ارائه شده است که به عنوان "روز شمال" شناخته می‌شود. در روز شمال، جهت وزش باد سطحی از سمت شمال یا شمال‌غرب است و میانگین سرعت باد ۱۷ گره دریایی (معادل ۸/۵ متربرثانیه) یا بیشتر در حداقل سه ساعت از روز است (Pakhirehzan et al., 2018).

مدل اقیانوسی^۲ ROMS را توسط یک مدل واسطه^۳ MCT همپوشانی می‌کند. در این مطالعه، منطقه شمال غرب خلیج فارس با توجه به اهمیت و موقعیت شاخص و به منظور بررسی الگوی امواج تحت تاثیر برهمکنش پدیده بادشمال زمستانی بر سطح دریا انتخاب شد. با توجه به حوضه دوگانه جو-موج، مدل اقیانوسی ROMS در حالت خاموش قرار گرفت و از سیستم شبیه‌سازی همزمان جو و موج استفاده گردید. به منظور پیشبرد تحقیق با انجام مطالعات پایه‌ای در زمینه امواج ناشی از باد به صورت اجرای شبیه‌سازی همزمان جو و موج به وسیله COAWST و مقایسه نتایج با داده‌های مشاهداتی، آمار باد و موج موسسه پیش‌بینی میان مدت آب و هوا (ECMWF) و نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها به شکل انفرادی، دقت اجرای شبیه‌سازی همزمان و مشخصه‌های عمومی و الگوی آماری امواج در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شدند. در ادامه به برخی از مطالعات انجام گرفته در زمینه مدل‌سازی همزمان جو و موج هم‌راستا با تحقیق حاضر اشاره شده است. Warner و همکاران (۲۰۱۰) یک سیستم مدل‌سازی همزمان جو، اقیانوس و موج را به منظور شبیه‌سازی طوفان دریایی ایزابل که در سپتامبر ۲۰۰۳ اتفاق افتاد بکار گرفتند. نتایج تحقیقات این محققین نشان داد که شدت طوفان نسبت به دمای سطح دریا بسیار حساس است. شدت طوفان هنگامی که با مدل‌های جوی و اقیانوسی بطور همزمان اجرا می‌شود، کاهش می‌یابد که علت آن ارائه یک مقدار واقعی‌تر از دمای سطح دریا و همچنین تنش لایه مرزی است. Du و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی، یک سیستم مدل‌سازی همپوشان جو و موج برای شبیه‌سازی امواج ناشی از طوفان را ارائه نمودند. در تحقیق این محققین بطور عمده به دو موضوع وضوح مکانی و پارامتر سطح مشترک باد-موج (Z_0) پرداخته شد. آنها با استفاده از پارامتریزه کردن Z_0 اعلام کردند که سیستم شبیه‌سازی همزمان، مشخصه‌های موج و باد را برای شرایط اقیانوس باز نسبت به شرایط ساحلی به شکل دقیق‌تر ثبت می‌کند. همچنین مطرح کردند که ارتفاع موج به داده‌های عمق‌سنجی در مناطق ساحلی، بسیار حساس است. Ninomiya و همکاران (۲۰۱۲) با پارامتریزه کردن اثر متقابل جو و اقیانوس به شبیه‌سازی همزمان جو و موج اقدام نمودند. در این مطالعه، یک شبیه‌سازی عددی به صورت همزمان بین دو مدل WRF و SWAN برای طوفان Melor در سال ۲۰۰۹

¹ Simulating Waves Near shore

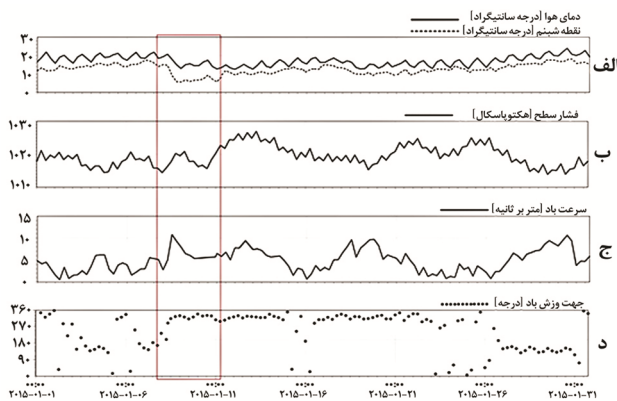
² Regional Ocean Modeling System

³ Model Coupling Toolkit



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه در شمال غرب خلیج فارس

دو دامنه تلسکوپی به منظور شبیه‌سازی مدل جوی طراحی شدند. با توجه به شکل ۳، دامنه بیرونی (Nx × Ny : ۱۳۰×۱۲۶) با تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر منطقه فعالیت باد شمال را پوشش می‌دهد و دامنه داخلی (Nx × Ny : ۴۳×۳۷) نیز با تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر منطقه دریایی به منظور شبیه‌سازی اثر باد شمال بر الگوی امواج را دربر می‌گیرد.



شکل ۲: الف) دمای هوا و نقطه شبنم، ب) فشار بارومتریک، ج) سرعت وزش باد و د) جهت وزش باد - ژانویه ۲۰۱۵ (حیطه وزش باد شمال زمستانی در پنجره نشان داده شده است)

SWAN یک مدل موج طیفی است که به طور خاص برای آب کم عمق طراحی شده است. این مدل معادله تکاملی طیف چگالی را حل می‌کند (Booij et al., 1999) و برای استفاده در محیط‌های نیمه بسته دریایی نیز بسیار ایده‌آل است. SWAN تولید و انتشار امواج ناشی از باد را در آب‌های ساحلی شبیه‌سازی می‌کند و شامل فرآیندهای انکسار، پراش، استهلاک ناشی از کم عمق شدن، برهمکنش‌های سه گانه و چهار گانه موج-موج، استهلاک در اثر ایجاد سفیدک قله موج، استهلاک ناشی از شکست موج و استهلاک

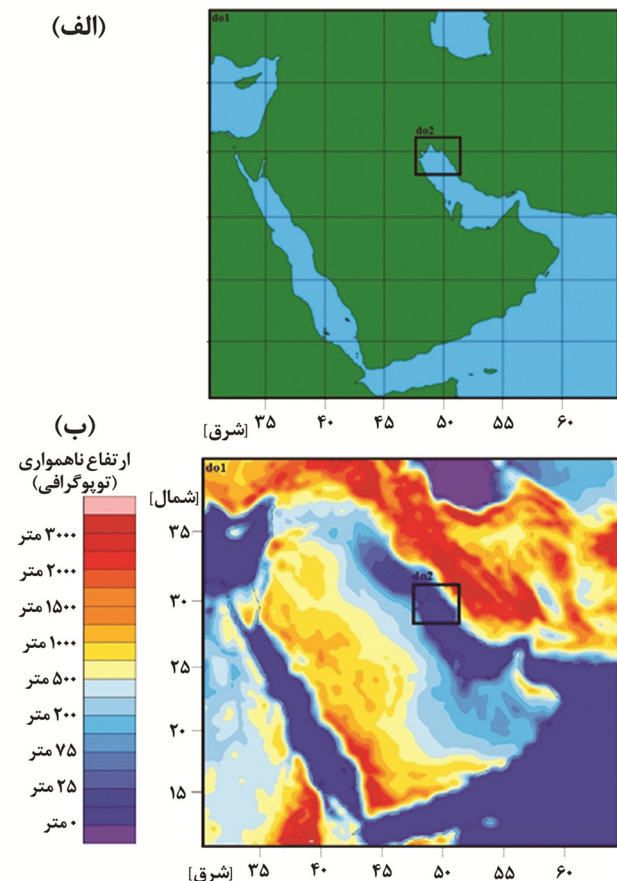
با تجزیه و تحلیل نمودارهای نشان داده شده در شکل ۲ می‌توان تاثیر وزش باد شمال زمستانی را بر منطقه مورد مطالعه بررسی نمود. بازه پنج روزه باد شمال زمستانی در شکل مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در یک بازه زمانی سه روزه از ۸ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵، علاوه بر افت دما، اختلاف دمایی نقطه شبنم با دمای هوا نسبت به سایر روزهای ماه بیشتر است (شکل ۲ الف). فشار جوی در ابتدای این بازه زمانی، افت قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۲ ب). همچنین سرعت باد در این مقطع یک مقدار بیشینه را نسبت به روزهای دیگر نشان می‌دهد (شکل ۲ ج). علاوه جهت وزش باد بطور عمده شمال و شمال غربی است (شکل ۲ د) که در مجموع نشان‌دهنده عبور یک جبهه سرد می‌باشد.

۳-۲ معرفی و پیگیرندی اجرای شبیه‌سازی همزمان بوسیله COAWST

به منظور بررسی اثرات باد شمال زمستانی بر الگوی امواج در شمال غرب خلیج فارس، مدل جوی پیش‌بینی آب و هوایی WRF و مدل موج طیفی SWAN با استفاده از ابزار اجرای همزمان MCT بعنوان یک همپوشاننده برای تبادل داده‌ها بین مدل‌های جو و موج، به طور همزمان اجرا گردیدند. WRF یک سامانه کارآمد پیش‌بینی عددی وضع هوا و شبیه‌سازی جو است که برای کاربردهای پژوهشی و عملیاتی طراحی شده است. عواملی همچون موقعیت و اندازه دامنه شبیه‌سازی، وضوح مکانی و شرایط اولیه می‌توانند بر نتایج شبیه‌سازی بوسیله WRF تاثیرگذار باشند. علاوه بر پیگیرندی دینامیک مدل، انتخاب طرح-واره‌های فیزیکی مناسب فصل و منطقه، جهت اجرای شبیه‌سازی‌ها ضروری است (جدول ۱).

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db} \quad \text{رابطه ۲}$$

که به ترتیب ورودی انرژی توسط باد (رشد خطی یا نمایی توسط باد- S_{wind})، انتقال غیرخطی انرژی موج تحت برهمکنش سه گانه (S_{nl3}) و چهارگانه (S_{nl4})، استهلاک موج در اثر سفیدک قله موج (S_{wc})، اصطکاک بستر (S_{bot}) و شکست موج ناشی از کاهش عمق (S_{db}) را نشان می دهد (رجبی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۳: دامنه های انتخابی: الف) توپوگرافی، ب) مدل جوی در شبیه سازی همزمان

با توجه به اینکه هدف از این مطالعه اجرای شبیه سازی همزمان مدل های جو و موج است، دامنه کوچک مدل WRF با دامنه مدل SWAN همپوشانی شدند. بدین منظور و با توجه به کدهای ارائه شده در مدل COAWST برای ساختن شبکه بندی، با استفاده از نرم افزار MATLAB، نسخه R2015a، در مختصات مکانی دامنه کوچکتر مدل WRF، فایل هایی با فرمت شبکه بندی و عمق سنجی برای استفاده در مدل SWAN استخراج شدند. شبکه محاسباتی مدل SWAN در این مطالعه به صورت منظم با طول

ناشی از اصطکاک بستر است. مدل موج SWAN معادله تعادل حرکت را به صورت رابطه ۱ حل می کند (Holthuijsen, 2000):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S(\theta, \sigma)}{\sigma} \quad \text{رابطه ۱}$$

جدول ۱: طرحواره های فیزیکی انتخاب شده برای اجرای مدل جوی در شبیه سازی همزمان

طرحواره	طرحواره فیزیکی انتخابی
میکروفیزیک ابر ^۱	WRF Single-Moment 3-class scheme (Hong, Dudhia and Chen (2004, MWR))
تابش طول موج کوتاه و بلند ^۲	Long Wave: RRTM (Mlawer et al. (1997, JGR))
لایه مرزی سیاره ای ^۳	Short Wave: Dudhia (Dudhia (1989, JAS)) YSU scheme (Hong, Noh and Dudhia (2006, MWR)), (bl_pbl_physics=1)
مدل سطحی خاک ^۴	MYNN scheme (Nakanishi, and Niino.,2006), (bl_pbl_physics=5) Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001)
لایه سطحی ^۵	MM5 Monin-Obukhov scheme
پارامترسازی ابرهای کومولوس ^۶	Kain-Fritsch scheme (Kain (2004, JAM))
فاصله افقی نقاط شبکه بندی ^۷	d01: 27km (130 × 126), d02: 9km (43 × 37)
فاصله عمودی نقاط شبکه بندی ^۸	30 full sigma levels / Model top level: 50 mb
گام زمانی ^۹	d01: 180s, d02: 60s
داده های تجزیه و تحلیل شده هدف ^{۱۰}	NCEP GFS data
داده های مشاهداتی ^{۱۱}	Iran Meteorological Organization
دوره اجرای مدل ^{۱۲}	2015-01-08_00:00 to 2015-01-13_18:00

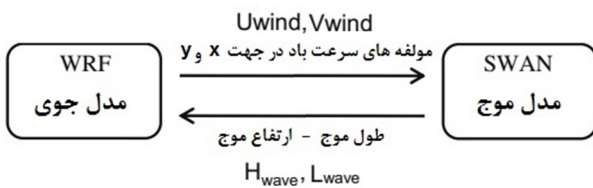
در رابطه ۱، $N(\sigma, \theta, x, y, t)$ طیف حرکت چگالی است؛ σ فرکانس نسبی رادیان است (همان طور که در یک قاب در حال حرکت با جریان اقیانوسی مشاهده می شود)؛ θ جهت عمود بر قله موج است؛ x و y مختصات مکان هستند (قابل بیان در هردو مختصات کروی و دکارتی) و t زمان است. C_x و C_y سرعت های انتشار در جهت x و y هستند. جمله $s(\sigma, \theta)$ معادله منبع چگالی انرژی است (فرجامی و همکاران، ۱۳۹۰). رابطه ۲ تمام فرآیندهای فیزیکی که موجب تولید، استهلاک یا بازپخش انرژی موج می شوند را نشان می دهد که در پارامتر S_{tot} خلاصه می شوند:

¹ Microphysics
² Short and Long Wave Radiation
³ Planetary Boundary Layer
⁴ Land Surface Model
⁵ Surface Layer
⁶ Cumulus Parameterization
⁷ Horizontal Spacing
⁸ Vertical Spacing
⁹ Time Step
¹⁰ Objective Analysis Data
¹¹ Observation Data
¹² Model Experiment Period

شبیه‌سازی همزمان، با توجه به داده‌های آماده شده توسط مدل موج، زبری بر اساس فرمول‌بندی Taylor و Yelland (۲۰۰۱) به صورت رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$z_0 = 1200.0 H_{\text{wave}} \left(\frac{H_{\text{wave}}}{L_{\text{wave}}} \right)^{4.5} + 0.11v / u_* \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴، H_{wave} ارتفاع موج شاخص و L_{wave} متوسط طول موج است.



شکل ۵: نمودار تبادل زمینه‌ها بین مدل‌های جوی و اقیانوسی

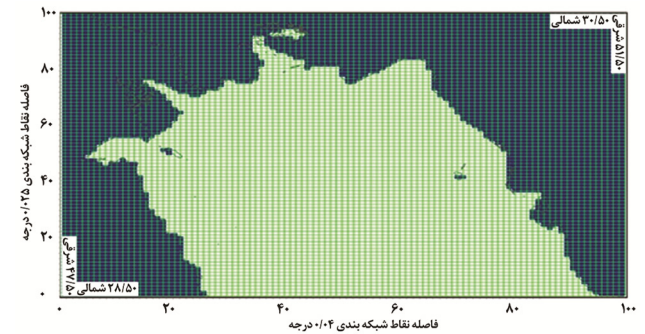
۲-۳-۲ صحت‌سنجی مدل

به منظور به حداقل رساندن مقدار خطای نتایج شبیه‌سازی، باید مدل COAWST برای یک دوره زمانی با توجه به داده‌های مشاهداتی صحت‌سنجی گردد. بدین 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 انتخاب شد. علت انتخاب این بازه زمانی در دسترس بودن داده‌های بویه موج‌نگار ساحلی بوشهر در موقعیت $28/83$ درجه شمالی و $50/74$ درجه شرقی است. برای صحت‌سنجی میدان باد توسط مدل، داده‌های سمت و سرعت باد که توسط بویه موج‌نگار در ارتفاع چهار متری ثبت شده است با استفاده از رابطه ۵ به باد در ارتفاع ۱۰ متری تبدیل شدند.

$$u_{10} = u_z \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \quad \text{رابطه ۵}$$

شرایط اولیه و مرزی برای مدل جوی از داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی GFS با وضوح $0/5$ درجه‌ای و از تجزیه و تحلیل نهایی NCEP^۱ بدست آمد. سیستم پیش‌بینی جهانی GFS یک مدل پیش‌بینی آب و هوا توسط مرکز ملی پیش‌بینی زیست محیطی (NCEP) است. این داده‌ها توسط سامانه داده‌گذاری

$4/00$ درجه و عرض $2/00$ درجه به 100 شبکه در طول و 100 شبکه در عرض تقسیم شد (شکل ۴). اندازه هر یک از شبکه‌های طولی 3590 متر ($0/04$ درجه) و هر شبکه در عرض 2500 متر ($0/25$ درجه) است. بیشترین عمق منطقه شبیه‌سازی موج در حدود 55 متر است.



شکل ۴: شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه در مدل موج SWAN (۱۰۰ واحد در طول - ۱۰۰ واحد در عرض)

۲-۳-۱ ابزار اجرای شبیه‌سازی همزمان MCT

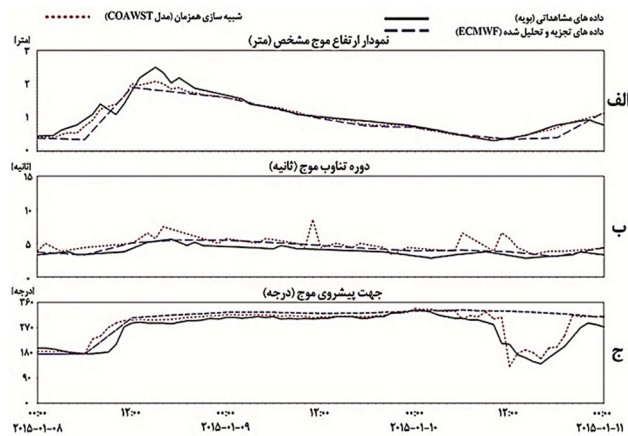
به منظور مبادله یا انتقال داده‌های مختلف بین مدل‌های جوی و موج، از ابزار اجرای همزمان MCT (Jacob et al., 2005) به عنوان یک رویکرد اجرای موازی استفاده شد. برنامه MCT به عنوان مجموعه‌ای از کتابخانه‌هایی که در طول اجرای مدل با هم مرتبط هستند گردآوری شده است. در ابتدا، هر مدل دامنه خود را به بخش‌هایی که در پردازنده‌ها برای هر مولفه اختصاص یافته است، تجزیه می‌کند. هر بخش از شبکه‌بندی در یک پردازنده در MCT شروع بکار می‌کند و MCT برای تعیین توزیع بخش‌های تجزیه شده اجرا می‌شود. متغیرهای مبادله شده در مدل‌سازی همزمان در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل جوی، مولفه‌های باد را در ارتفاع ۱۰ متری از سطح (u_{10}, v_{10}) برای مدل موج تهیه می‌کند و مدل موج ارتفاع موج شاخص (H_s) و طول موج (L) را برای مدل جوی آماده می‌کند. زبری سطح دریا (Z_0)، به منظور تاثیر بر نتایج مدل جوی، با توجه به رابطه ۳ محاسبه شد.

$$z_0 = \frac{C_a u_*^2}{g} + v / u_* \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، Z_0 زبری سطح، C_a ضریب Charnok در حدود $0/16$ که برای دریاها با خیزاب سریع می‌باشد. u_* تنش سطحی، g شتاب گرانشی و v لزجت می‌باشد. در هنگام

¹ National Centers for Environmental Prediction

پیش‌فرض‌های مدل استفاده گردید. نمودار پارامترهای موج در مقایسه با داده‌های مشاهداتی و آمار موج ECMWF در شکل ۷ نشان داده شده است. از داده‌های موسسه ECMWF، به منظور مقایسه و بررسی دقت آمار باد و موج آن با دقت شبیه‌سازی توسط مدل COAWST استفاده گردید.



شکل ۷: مقایسه (الف) ارتفاع موج شاخص، (ب) دوره تناوب، (ج) جهت موج با استفاده از داده‌های بویه موج‌نگار و شبیه‌سازی توسط مدل همزمان

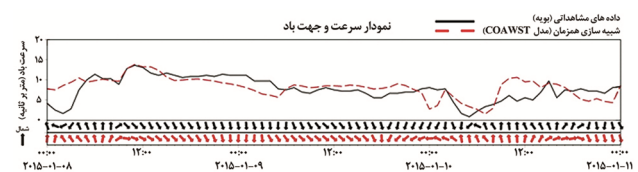
مقادیر خطاها پس از صحت‌سنجی مدل برای پارامترهای باد و موج در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه در یک شبیه‌سازی ایده‌آل، بایستی خطای اریبی و جزر میانگین مربعات کم، ضریب همبستگی زیاد و در مقابل ضریب پراکندگی کم باشد، می‌توان مشاهده نمود که در مدل COAWST ارتفاع موج شاخص و جهت پیشروی موج با دقت بالاتری نسبت به ECMWF شبیه‌سازی شده است، هرچند دوره تناوب موج دقت کمتری دارد.

جدول ۲: محاسبه خطای پارامترهای شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی مدل

ضریب پراکندگی (SI)	جزر میانگین مربع خطاها (RMSE)	ضریب همبستگی (CC)	اریبی (Bias)	پارامتر
۰/۳۲	۲/۵۲	۰/۵۸	۰/۳۹	سرعت باد
۰/۲	۰/۵۸	۰/۹	۹/۲	جهت باد
۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۹۷	۰/۰۹	ارتفاع موج شاخص
۰/۳۲	۱/۲۵	۰/۷۰	۱/۰۲	متوسط دوره تناوب موج
۰/۱۰	۲۸/۲۰	۰/۹۰	۱۵	متوسط جهت پیشروی موج
۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۹۳	۰/۱۵	ارتفاع موج شاخص
۰/۱۵	۰/۵۹	۰/۸۸	۰/۵۱	متوسط دوره تناوب موج
۰/۲۱	۵۷/۶۷	۰/۶۰	۳۷/۱۶	متوسط جهت پیشروی موج

جهانی^۱ GDAS تنظیم می‌شوند که پیوسته داده‌های دیده‌بانی جهانی را از سامانه تله متری جهانی^۲ GTS و منابع دیگر برای تحلیل‌های گوناگون دریافت می‌دارند. این داده‌ها برای سطح زمین و ۲۶ لایه قائم از ۱۰۰۰ میلی‌بار تا ۱۰ میلی‌بار در دسترس هستند. تعداد لایه‌های قائم در ترازهای پایین و نزدیک سطح زمین تراکم بیشتری دارند.

با استفاده از ابزار پیش پردازش WPS، شرایط برای شبیه‌سازی توسط WRF آماده شدند. پوشش مکانی منطقه شبیه‌سازی برای دو دامنه انتخابی به همراه توپوگرافی در شکل ۳ نشان داده شده است. دامنه بزرگ، منطقه فعالیت باد شمال را در بر می‌گیرد. داده‌هایی که برای ایجاد شرایط اولیه و مرزی در شبیه‌سازی با WRF به کار رفته‌اند از نوع GFS و دارای تفکیک ۰/۵ درجه هستند. اطلاعات سطح زمین USGS و MODIS که در اطلاعات پایه WRF موجود است، به منظور تهیه اطلاعات سطحی خاک مشتمل بر دسته‌بندی کاربری سطح، جنس خاک، توپوگرافی، سبزی‌نگی، دما و رطوبت متوسط سالانه در عمق مرجع، سپیدایی و گسیلندگی متوسط ماهانه روی نقاط شبکه در تفکیک‌های افقی پنج و ده دقیقه بکار گرفته شدند. نتایج دوره صحت‌سنجی مدل برای جهت و سرعت باد در موقعیت بویه موج‌نگار در منطقه دور از ساحل^۳ بوشهر در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه سرعت و جهت باد شبیه‌سازی شده بوسیله مدل COAWST با داده‌های سمت و سرعت باد بویه موج‌نگار بوشهر

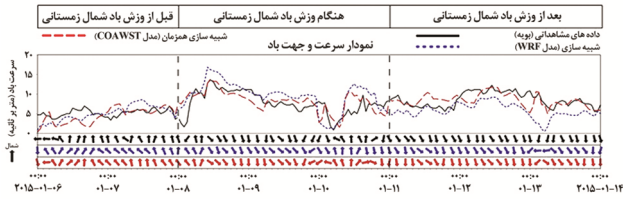
عموماً برای صحت‌سنجی مدل موج، از تغییر مقادیر مربوط به سفیدک قله موج و اصطکاک بستر استفاده می‌شود. در واقع مناسب‌ترین پارامتر برای صحت‌سنجی نتایج مدل موج در آب‌های نیمه عمیق و عمیق، سفیدک قله موج است. در این مطالعه علاوه بر سفیدک قله موج، با توجه به قرار گرفتن بویه در عمق ۲۰ متری، می‌توان از اصطکاک بستر نیز به عنوان یک گزینه کلیدی در صحت‌سنجی مدل بهره برد. برای سایر ضرایب از

¹ Global Data Assimilation System

² Global Telecommunications System

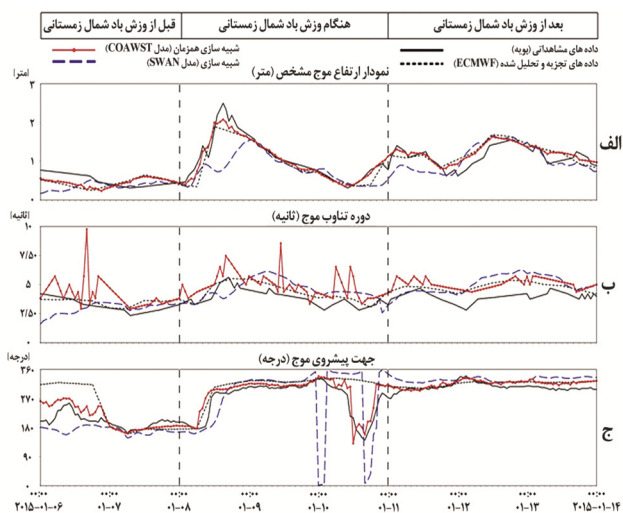
³ Offshore

۳. نتایج و بحث



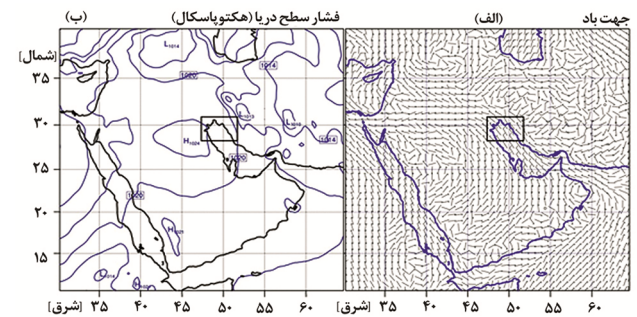
شکل ۹: سرعت و سمت باد شبیه‌سازی شده به وسیله COAWST در مقایسه با شبیه‌سازی توسط WRF و داده‌های مشاهداتی

به منظور دستیابی به تجزیه و تحلیل بهتر، خطای پارامترهای شبیه‌سازی شده در جدول ۳ ارائه شده است. بهترین هماهنگی برای ارتفاع موج مربوط به نتایج حاصل از شبیه‌سازی همزمان به وسیله COAWST است. اختلاف ارتفاع موج در شروع رخداد شمال زمستانی نسبت به پیش از شروع وزش آن در حدود ۱/۱ متر و در ۸ ژانویه ۲۰۱۵ برابر با مقدار ۲/۰۸ متر می‌باشد (شکل ۱۰ الف). سرعت و جهت وزش باد برای این زمان به ترتیب ۸/۷ متر بر ثانیه و ۳۳۰ درجه (شمال غربی) است (شکل ۹). دوره تناوب موج یک روند بسیار یکنواخت را نشان می‌دهد و بین ۴ تا ۱۵ ثانیه متغیر است، هرچند هماهنگی داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده در حد متوسط قرار دارند (شکل ۱۰ ب). جهت پیشروی موج محاسباتی عمدتاً از شمال و شمال‌غربی است و هماهنگی مطلوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد (شکل ۱۰ ج).



شکل ۱۰: مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی همزمان با داده‌های بویه موج نگار بوشهر (الف) ارتفاع موج شاخص، (ب) متوسط دوره تناوب موج، (ج) متوسط جهت پیشروی موج در قبل، شروع و در طول وزش باد شمال زمستانی - ژانویه ۲۰۱۵

در شبیه‌سازی به وسیله COAWST، دامنه مدل موج و دامنه کوچکتر مدل جوی بطور مستقیم و دامنه بزرگتر مدل جوی به عنوان محدوده عملکرد باد شمال زمستانی به شکل غیر مستقیم، زمینه‌های اثرگذار بر عملکرد مدل دیگر در بازه رخداد شمال زمستانی و بعد از آن را مبادله کردند. نتایج شبیه‌سازی جوی به صورت الگوی همدیدی تراز سطح دریا در بیشینه سرعت باد در شکل ۸ نشان داده شده است که یک سیستم چرخندی با فشار مرکزی ۱۰۱۰ میلی بار در مرکز ایران است. این سامانه با ناوه عمیق تراز بالا و حضور رودباد جبهه‌ای قطبی همراه است.



شکل ۸: الف) الگوی همدیدی شبیه‌سازی شده میدان باد در تراز ۱۰ متری، ب) نقشه توزیع فشار در سطح دریا - ۰۸ ژانویه ۲۰۱۵

شبیه‌سازی پارامترهای باد در مقایسه با داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی منفرد توسط مدل WRF در موقعیت بویه موج‌نگار بوشهر در شکل ۹ نشان داده شده است. برای اجرای مدل جوی در شبیه‌سازی همزمان از طرحواره MYNN و در اجرای منفرد مدل جوی از طرحواره YSU استفاده شده است (رجوع شود به جدول ۱). با توجه به شکل و محاسبه خطاها در جدول ۳، در بازه رخداد شمال زمستانی، هماهنگی بیشتر داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل همزمان نسبت به نتایج اجرای منفرد مدل WRF مشهود است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی WRF در قبل و بعد از رخداد شمال زمستانی در پایین دست و در بازه وزش شمال زمستانی در بالادست داده‌های مشاهداتی قرار دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی همزمان جو و موج به وسیله COAWST برای ارتفاع موج شاخص، دوره تناوب و جهت موج در مقایسه با داده‌های مشاهداتی و آمار موج ECMWF و نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج به وسیله مدل SWAN که از داده‌های باد مدل WRF استفاده کرده است، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

WRF نشان از افزایش ضریب همبستگی و کاهش خطای ریشه مربعات میانگین برای مدل COAWST دارد. در شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل WRF مشخص گردید که مدل در زمان افت سرعت باد مقادیری پایین‌تر و در زمان افزایش سرعت باد مقادیر بالاتر از مقدار ثبت شده میدانی را شبیه‌سازی می‌کند.

در زمینه شبیه‌سازی امواج با استفاده از سیستم مدل‌سازی همزمان COAWST، برای ارتفاع موج شاخص در شروع وزش شمال زمستانی یک جهش ارتفاعی مشاهده می‌شود که متناسب با شدت وزش باد است و جهت پیشروی موج شمال غربی است. بررسی داده‌های تجزیه و تحلیل شده ECMWF و نتایج حاصل از مدل موج طیفی SWAN روند مشابهی را نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده در زمینه دوره تناوب موج، همخوانی مناسبی با داده‌های مشاهداتی ندارد که می‌توان علت آنرا به طبیعت پیچیده دوره تناوب و ضعف مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی این پارامتر نسبت داد. محاسبه پارامترهای آماری امواج شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های COAWST، SWAN و ECMWF در مقایسه با داده‌های میدانی، نشان از بهبود قابل ملاحظه نتایج حاصل از مدل COAWST در مقایسه با دو مدل دیگر دارد. ارتفاع موج شاخص پیش‌بینی شده توسط این مدل با ضریب همبستگی و خطایی به ترتیب به مقدار ۰/۹۴ و ۰/۱۳ نشان می‌دهد که این مدل توانسته است نتایجی بسیار نزدیک به واقعیت را شبیه‌سازی کند. لذا شاید بتوان گفت که مدل COAWST می‌تواند به عنوان یک رویکرد قابل اعتماد در پیش‌بینی و شبیه‌سازی برهمکنش‌های مستقیم جو و موج به خصوص در مورد طوفان‌ها و سایر پدیده‌های جوی شدید، که تاثیر مستقیم بر سطح دریا، سازه‌ها و فعالیت‌های دریایی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- رجبی، س.؛ چگینی، و.؛ لاری، ک.؛ کامران زاد، ب.؛ حسینی، س.، ط.، ۱۳۹۲. مدلسازی امواج ناشی از باد در منطقه انزلی با استفاده از مدل عددی swan، نشریه اقیانوس شناسی، سال چهارم، شماره ۱۵، صفحات ۹۲-۸۳.
- فرجامی، ح.؛ حسینی، س.ط.؛ چگینی، و.؛ محمدی، س.، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی امواج ناشی از باد در خلیج بوشهر با استفاده از مدل عددی سوان، نشریه اقیانوس شناسی، سال دوم، شماره ۸، صفحات ۸۷-۷۹.

جدول ۳: محاسبه خطای پارامترهای شبیه‌سازی شده در بازه زمانی ۶-۱۴ ژانویه ۲۰۱۵

پارامتر	اریبی (Bias)	ضریب همبستگی (CC)	جزر میانگین مربع خطاها (RMSE)	ضریب پراکندگی (SI)
WRF	سرعت باد	۰/۵۰	۳/۲۳	۰/۳۹
	جهت باد	۵/۸۹	۲۳/۷۶	۰/۴۷
COAWST	سرعت باد	۰/۱۲	۲/۱۹	۰/۲۶
	جهت باد	۰/۲۹	۱۵/۴	۰/۴۴
ECMWF	ارتفاع موج شاخص	۰/۱۰	۰/۸۴	۰/۱۳
	متوسط دوره تناوب موج	۱/۰۵	۱/۲۰	۰/۳۱
SWAN	متوسط جهت پیشروی موج	۱۵/۱۰	۲۲/۳۴	۰/۰۷
	ارتفاع موج شاخص	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۲۰
SWAN	متوسط دوره تناوب موج	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۲۰
	متوسط جهت پیشروی موج	۲۵/۶۸	۴۲/۳۱	۰/۱۴
SWAN	ارتفاع موج شاخص	۰/۱۶	۰/۳۹	۰/۳۶
	متوسط دوره تناوب موج	۱/۰۲	۱/۱۹	۰/۳۰
متوسط جهت پیشروی موج	۴۰/۸۶	۰/۵۲	۶۸	۰/۲۳

۴. نتیجه‌گیری

باد شمال زمستانی بطور کلی منطقه غرب آسیا و به خصوص مناطق میانی فلات ایران، جنوب ترکیه، سراسر عراق و شمال خلیج فارس را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تجزیه و تحلیل پارامترهای مشاهداتی و نمودارهای هواشناسی نشان می‌دهد که رخداد شمال زمستانی بین سه تا پنج روز از ۸ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۱۵ در منطقه خلیج فارس اتفاق افتاده است. ابتدای شروع وزش شمال زمستانی و همزمان با عبور یک جبهه سرد، افزایش سرعت باد با جهت شمال تا شمال غربی، افت محسوس دما، زیاد شدن اختلاف دمای هوا و نقطه شبنم و افت ناگهانی فشار هوا رخ داده است.

در این تحقیق، شبیه‌سازی الگوی باد شمال زمستانی و امواج ناشی از آن در شمال غرب خلیج فارس، با استفاده از سیستم مدل‌سازی همزمان جو و موج COAWST به انجام رسید و نتایج حاصل از آن با داده‌های مشاهداتی، آمار باد و موج ECMWF و نتایج شبیه‌سازی با مدل جوی WRF و مدل موج طیفی SWAN به صورت انفرادی مقایسه گردید. شبیه‌سازی همزمان جو و موج با استفاده از COAWST نشان داد که در زمینه الگوی جوی، در محدوده عملکرد باد شمال زمستانی در غرب آسیا، یک سیستم چرخندی در قالب یک الگوی کم فشار در میانه فلات ایران شکل می‌گیرد. این سامانه با ناهمبستگی عمیق تراز بالا و حضور رودباد جبهه‌ای قطبی همراه است. همچنین جهت غالب باد روی خلیج فارس شمال غربی می‌شود. نمودار سرعت و جهت باد در مقایسه با داده‌های مشاهداتی برای نتایج حاصل از دو مدل COAWST و

- De Leon, S.P.; Bettencourt, J.H.; Kjerstad, N., 2011. Simulation of irregular waves in an offshore wind farm with a spectral wave model. *Continental Shelf Research*, 31(15): 1541-1557.
- Du, J.; Larsén, X.G.; Bolaños, R., 2015. A coupled atmospheric and wave modeling system for storm simulations. In *Proceedings of EWEA offshore conference*, 10-12 March, Copenhagen, Denmark: 1-10PP.
- Dykes, J.D.; Hsu, Y.L.; Rogers, W.E., 2002. The development of an operational SWAN model for NGLI. In *OCEANS'02 MTS/IEEE*, (2): 859-866.
- Glejin, J.; Kumar, V.S.; Nair, T.B.; Singh, J.; Mehra, P., 2013. Observational evidence of summer SHAMAL swells along the west coast of India. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(2): 379-388.
- Groeneweg, J.; van Gent, M.; van Nieuwkoop, J.; Toledo, Y., 2015. Wave propagation into complex coastal systems and the role of nonlinear interactions. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141(5): 04015003.
- Holthuijsen, L.H.; Booij, N., 2000. Oceanic and nearshore white-capping effects in SWAN. In *Proc. 6th Int. Conference on Wave Hindcasting and Forecasting*, 362-368P.
- Jacob, R.; Larson, J.; Ong, E., 2005. 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*, 19(3): 293-307.
- Lesser, G.R.; Roelvink, J.V.; Van Kester, J.A.T. M.; Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9): 883-915.
- Moeini, M.H.; Etemad-Shahidi, A., 2007. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29(3): 137-145.
- صفاریان، ر.؛ مشایخی، ن.، ۱۳۸۶. بررسی و طبقه‌بندی شاخص کیفیت آب رودخانه کارون (محدوده زرکان، ام‌الطیر) و مقایسه آن با وضعیت شاخص کیفیت آب رودخانه‌های مارون و زهره. دهمین همایش ملی بهداشت محیط همدان. صفحات ۳۵-۲۳.
- قادری، ز.؛ فتوحی، ن.؛ حسینی بندرآبادی، س.، م.، ۱۳۸۹. مقایسه الگوی جهتی باد و موج خلیج فارس با استفاده از داده‌های میدانی، نهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، تهران، صفحات ۵-۱.
- ملکوتی، ح.؛ پاخیرهزن، م.؛ حسینی، و.، ۱۳۹۵. رفتار مشاهداتی و همدیدی باد شمال در سواحل شمال غرب خلیج فارس (بوشهر، ۲۰۱۰)، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحات ۱۷۴-۱۵۹.
- Abdi Vishkaee, F.; Flamant, C.; Cuesta, J.; Oolman, L.; Flamant, P.; Khaledifard, H.R., 2012. Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter SHAMAL: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D03201): 1-14.
- Ardhuin, F.; Bertotti, L.; Bidlot, J.R.; Cavaleri, L.; Filipetto, V.; Lefevre, J.M.; Wittmann, P., 2007. Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, 34(3-4): 526-541.
- Bender, M.A.; Ginis, I.; Tuleya, R.; Thomas, B.; Marchok, T., 2007. The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system and a summary of its performance. *Monthly Weather Review*, 135(12): 3965-3989.
- Booij, N.R.R.C.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7649-7666.
- Chen, S.S.; Price, J.F.; Zhao, W.; Donelan, M.A.; Walsh, E.J., 2007. The CBLAST-Hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(3): 311-318.

- surface roughness on the height and steepness of the waves. *Journal of Physical Oceanography*, 31(2): 572-590.
- Thoppil, P.G.; Hogan, P.J., 2010a. Persian Gulf response to a wintertime SHAMAL wind event. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(8): 946-955.
- Thoppil, P.G.; Hogan, P.J., 2010b. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9): 2122-2134.
- Toropov, P.A.; Myslenkov, S.A.; Shestakova, A.A., 2012. Numerical simulation of Novorossiysk bora and related wind waves using the WRF-ARW and SWAN models. *Russian Journal of Earth Sciences*, 12(6): 1-7.
- Walters Sr, K.R.; Sjoberg, W.F., 1990. The Persian Gulf region. A climatological study (No. USAFETAC/TN-88/002). Air Force Environmental Technical Applications Center Scott Afb Il.
- Warner, J.C.; Armstrong, B.; He, R.; Zambon, J.B., 2010. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 35(3): 230-244.
- Warner, J.C.; Sherwood, C.R.; Signell, R.P.; Harris, C.K.; Arango, H.G., 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, 34(10): 1284-1306.
- Ninomiya, J.; Mori, N.; Yasuda, T.; Mase, H.; Kihara, N., 2012. Improvement of storm surge simulation upon parameterizations of coupled air-sea interactions. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33): 57-65.
- Pakhirehzan, M.; Rahbani, M.; Malakooti, H., 2018. Numerical study of winter shamal wind forcing on the surface current and wave field in Bushehr's offshore using MIKE21. *International Journal of Coastal & Offshore Engineering*, 2(2): 57-65.
- Reynolds, R.M., 1993. Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman- Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*, 27: 35-59.
- Rusu, L.; Bernardino, M.; Guedes Soares, C., 2014. Wind and wave modelling in the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 7(1): 5-20.
- Rusu, E.; Raileanu, A., 2016. A multi-parameter data-assimilation approach for wave prediction in coastal areas. *Journal of Operational Oceanography*, 9(1): 13-25.
- Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.M.; Wang, W.; Powers, J.G., 2005. A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center for Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Taylor, P.K.; Yelland, M.J., 2001. The dependence of sea