

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1400.7.1.1.2](https://doi.org/10.24767/131.1400.7.1.1.2)

درصد همانندی: ۲٪

تدقیق شبیه‌سازی موج آب کم عمق بوشهر از طریق تولید باد محلی با تکنیک شبکه عصبی مصنوعی

فرشته کمیجانی^{۱*}، مسعود منتظری نمین^۲، مهدی کبریایی^۳، محمدحسین نعمتی^۴، حمید خلیلی^۵

fereshtekomijani@gmail.com

^{۱*} نویسنده مسئول، دکتری فیزیک دریا، شرکت نو اندیشان محیط‌های رودخانه و دریا، تهران

mnamin@ut.ac.ir

^۲ دکتری مهندسی عمران، شرکت نو اندیشان محیط‌های رودخانه و دریا، تهران

mehdy.kebriaee@gmail.com

^۳ کارشناس ارشد، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران

nemati@pmo.ir

^۴ کارشناسی ارشد فیزیک دریا، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران

khalili@pmo.ir

^۵ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱

چکیده

امواج روی حرکات عمودی شناورها اثر می‌گذارند و از این طریق ایمنی تردد آن‌ها در آب‌های ساحلی را به خطر می‌اندازند. این تحقیق با هدف پیش‌بینی دقیق امواج در محل کانال کشتی‌رانی بندر بوشهر برای تأمین ایمنی حمل‌ونقل دریایی آب‌های این منطقه صورت گرفته است. در ابتدا شبیه‌سازی موج با استفاده از نرم‌افزار PMODynamicsI و به کارگیری میدان باد قابل پیش‌بینی GFS انجام شده که پس از انجام حساسیت‌سنجی‌ها، واسنجی مدل روی ضرایب و فاکتورهای مختلف همچون ضریب زبری، گام زمانی، گام‌های طیفی شبکه محاسباتی و غیره انجام شود. با اعمال تنظیمات بهینه در مدل و مقایسه نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده موج در محل کانال کشتی‌رانی، دقت نتایج مرحله راستی‌آزمایی برابر ۷۰٪ به دست آمد. نتایج نشان داد، استفاده از باد با مقیاس بزرگ و جهانی سبب پایین شدن ارتفاع موج و نبود دقت مناسب در شبیه‌سازی جهت موج در زمان رخداد توفان‌هایی با تغییر جهت ناگهانی شده که با توجه به اهمیت بحث امنیت دریانوردی تدقیق نتایج از طریق تولید باد با دقت محلی مورد توجه قرار گرفته است. این امر از طریق تکنیک شبکه عصبی مصنوعی و طراحی سناریوهای مختلف صورت گرفته که با آموزش میدان باد جهانی GFS از اطلاعات باد ایستگاه هواشناسی، باد با دقت محلی تولید شده است. این باد به‌عنوان مولد در مدل موج بوشهر به کار گرفته شده که به افزایش ۲۵ و ۱۵ درصدی دقت به ترتیب برای جهت موج و ارتفاع موج مدل‌سازی و کاهش ۱۰ درصدی جذر میانگین مربع خطا منجر شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی امواج، نرم‌افزار PMODynamicsI، تولید باد محلی، شبکه عصبی مصنوعی

۱. مقدمه

این مقاله به ارائه نتایج شبیه سازی امواج مورد استفاده در تهیه ماژول «تصمیم یار بارگیری و تردد کشتی در بندر بوشهر» (PMOSHADES) اختصاص دارد. این ماژول با هدف افزایش ایمنی حمل و نقل دریایی و بهره برداری بهینه از ظرفیت بندر، با نظارت سازمان بندر و دریانوردی طراحی شده است. اساس ماژول مبتنی بر محاسبه به هنگام و دقیق عمق دینامیکی آب زیر بدنه کشتی^۱ (UKC) در طول کانال کشتی رانی بوشهر، تحت تأثیر شرایط محیطی (موج، جریان، باد و جزرومد) و غیر محیطی (ساختار بدنه شناور و آب نگاری^۲) است. بر اساس پیش بینی شرایط دریایی و محاسبه UKC، کم عمق شدگی های مسیر حرکت کشتی در طول کانال، شناسایی و مسیر ایمن تردد تعیین می شود. همچنین با این محاسبات می توان ظرفیت بهینه حمل بار کشتی ها را تعیین و موجب استفاده حداکثری از ظرفیت بندر را فراهم آورد. اهمیت این مسائل کسب بیشترین درجه دقت در پیش بینی شرایط دریا را ایجاب می نماید. در این مطالعه سعی شده با استفاده از تکنیک های نوین ترکیبی، خطای شبیه سازی عددی امواج به حداقل رسانده شود و تدقیق پیش بینی ها در کانال کشتی رانی بوشهر صورت پذیرد.

در مورد چگونگی اثر موج بر حرکت کشتی بیان می شود که از ۶ درجه آزادی حرکت کشتی، حرکات قائم^۳، غلتش طولی^۴ و غلتش عرضی^۵ آن [۱]، به طور مستقیم تحت نفوذ امواج قرار دارند. موج از طریق ارتفاع و زاویه برخوردش با جهت حرکت کشتی، بر این حرکات اثر می گذارد و به منزله یک نیروی خارجی با ایجاد مقاومت اضافی می تواند سبب خارج شدن کشتی از حالت تعادل شود. بنابراین موج و به خصوص امواج عمود بر کشتی، می تواند سبب به مخاطره انداختن ایمنی و پایداری کشتی شوند [۱]؛ از این رو بررسی وضعیت امواج، شبیه سازی دقیق ارتفاع و جهت موج از لحاظ دریامانی مهم است.

استفاده از مدل های عددی مانند سوان^۶، مایک ۲۱^۷ و ویو واچ^{۸۳} برای پیش بینی امواج از قرن بیستم رواج یافته [۲] و در مطالعات مختلفی مانند [۳-۵] به کار برده شده اند. با وجود

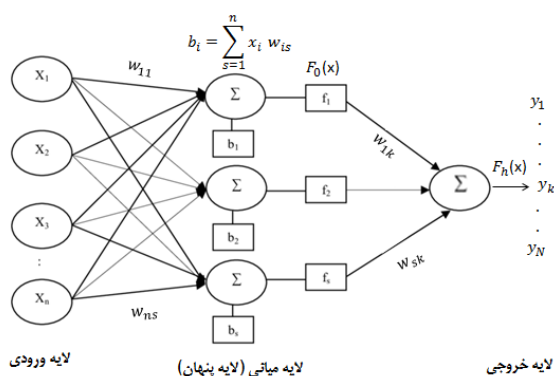
توانمندی مدل ها، اغلب پیچیدگی هایی در اجرا دارند و نیازمند ورودی های دقیقی مانند آب نگاری منطقه هستند، که تهیه آن کار ساده ای نیست [۶]. همچنین وجود ترم های غیر خطی در معادله های حاکم بر رشد و انتقال امواج، مدل سازی رفتارهای تصادفی امواج را دشوار می کند [۷]. اما شبکه عصبی مصنوعی^۹ که کاربری آن در پیش بینی و حل مسائل مهندسی دریا از اواخر ۱۹۸۰ رواج یافته [۸] در شبیه سازی رفتارهای تصادفی امواج قابلیت دارند [۷] و بدون نیاز به آگاهی قبلی از روابط متقابل بین عناصر یک سامانه، در مدل سازی رفتارهای غیر خطی توانمندند [۹]، از این رو به موازات مدل های عددی در مطالعاتی مانند ارزیابی پایداری موج شکن ها [۱۰]، پیش بینی جزرومد [۱۱]، تراز آب [۱۲]، جریان [۱۳] و امواج [۱۴] استفاده می شوند. در دو تحقیقی که طالقانی و همکارش [۱۵] و زمانی و همکارش [۷] انجام داده اند، به پیش بینی امواج دریای خزر با کمک شبکه عصبی پرداخته اند. آن ها با طراحی یک شبکه سه لایه پیشرو^{۱۰} که داده های ورودی آن از ارتفاع موج اندازه گیری شده در زمان های گذشته تأمین شده، پیش بینی ارتفاع موج برای دوره های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت آینده انجام شده است. انطباق خوب نتایج حاصل از شبکه و اندازه گیری های موج بر اساس معیارهایی مانند ضریب همبستگی^{۱۱} (CC) و جذر میانگین مربع خطا^{۱۲} (RMSE)، کارآمدی شبکه عصبی برای پیش بینی امواج به ویژه در زمان های کوتاه (مانند ۳ ساعت) را مشخص کرد [۷، ۱۵]. مشابه این بررسی در بندر انزلی و با به کارگیری شبکه عصبی دو لایه توسط قانع صورت گرفت که همبستگی و تطابق بالای بین پیش بینی و اندازه گیری ها، گویای دقت قابل قبول شبکه عصبی در پیش بینی امواج است [۱۶]. کارآمدی شبکه عصبی مصنوعی سه لایه پیشرو در مقایسه با مدل عددی سوان برای مدل سازی امواج خلیج فارس [۲] و بوشهر [۱۷] توسط کامران زاد و همکار انجام شد. بررسی ها نشان داد که مدل سوان در شبیه سازی امواج کم ارتفاع، تخمین دست پایینی به دست می دهد، در حالی که به کارگیری شبکه عصبی نتایج قابل قبول تری داشته که این مسئله با سهولت و کمتر بودن زمان اجرای شبکه عصبی، اولویت استفاده از آن نسبت به مدل سوان را توصیه می نماید

از آن به‌عنوان خروجی لایه پنهان به لایه خروجی داده می‌شود (شکل ۱). در صورتی که s نرون در لایه پنهان و N نرون در لایه خروجی قرار گرفته باشد، خروجی y_k شبکه با رابطه (۱) به دست می‌آید [۷]:

$$y_k = F_0 \left[\sum_{j=1}^s W_{kj} F_h \left(\sum_{i=1}^n W_{ji} x_i \right) \right] \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

در این رابطه F_0 و F_h توابع انتقال به ترتیب در لایه‌های پنهان و خروجی هستند.



شکل ۱. شبکه عصبی سه لایه پیشرو (مورد استفاده در مطالعه حاضر) [۲۰]

شبکه‌های عصبی بر اساس مسیر پردازش اطلاعات به دو دسته شبکه عصبی پیشرو^{۱۸} و برگشتی^{۱۹} تقسیم می‌شوند [۲۱]. به کارگیری شبکه‌های عصبی پیشرو (MLP) که در آن هر نرون از هر لایه به تمام نرون‌های لایه قبل متصل است [۱۹]، برای مدل‌سازی فرایندهای دینامیک دریا رواج بیشتری دارند [۲، ۱۷] و در ۸۰ درصد کاربردها از آن استفاده می‌شود [۲۲].

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

بندر بوشهر با عمق متوسط ۷ متر در شمال غربی خلیج فارس قرار دارد و تردد دریایی آن از طریق کانال کشتی‌رانی به عمق ۱۰ متر انجام می‌شود که از دو بخش داخلی و خارجی به عرض ۱۵۰ متر تشکیل شده‌اند (شکل ۲). نقاط a ، b و c در شکل ۲ برای مقایسه نتایج مرحله حساسیت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳ که بر اساس داده‌های باد جمع‌آوری شده در مطالعه حاضر ترسیم شده، مشاهده می‌شود که باد غالب این منطقه از راستای شمال‌غربی

[۲، ۱۷]. ملک‌محمدی و همکاران در مطالعه خود به ارائه رویکردی نوین حاصل از تلفیق روش عددی و شبکه عصبی برای پیش‌بینی امواج پرداختند [۱۸]. اهمیت استفاده از روش ترکیبی برای انجام پیش‌بینی این است که در برخی مطالعات استفاده از روش‌های عددی به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن توصیه نمی‌شود و روش شبکه عصبی نیز به دلیل نیاز به بانک اطلاعاتی بلندمدت، که در همه مناطق فراهم نیست یا تهیه آن گران است، کاربرد نیست [۱۸]. بنابراین به‌عنوان روش ترکیبی، از شبکه عصبی‌ای استفاده می‌شود که داده‌های لازم برای آموزش یا یادگیری شبکه^{۱۳} از خروجی‌های یک مدل عددی تهیه شود. از این روش در شبیه‌سازی امواج دریاچه اسپرپور^{۱۴} و اقیانوس آرام استفاده شده و امواج، که اندازه‌گیری آن هزینه‌بردار است، با مدل ویواج^۳ تولید و با باد برای یادگیری الگوی رفتار بین موج و باد به شبکه عصبی وارد شده است [۱۸]. مقایسه موج حاصل از مدل عددی و روش ترکیبی با موج واقعی، نشان داد که دقت روش ترکیبی نسبت به مدل عددی ویواج^۳ قابل قبول است و اقتصادی بودن آن، کاربرد آن نسبت به مدل عددی را در حل مسائل دریایی توصیه می‌کند [۱۸].

۱-۱. شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی بر مفهوم نرون^{۱۵} پایه‌ریزی شده‌اند [۷] و ساختار آن‌ها از لایه ورودی، لایه میانی (لایه پنهان)^{۱۶} و لایه خروجی تشکیل شده است. لایه ورودی، لایه انتقال‌دهنده داده‌هاست [۱۹]، آخرین لایه یا لایه خروجی مقادیر پیش‌بینی شده که خروجی شبکه محسوب می‌شود را به دست می‌دهد [۱۹] و لایه میانی، محل پردازش داده‌هاست. انتقال اطلاعات بین نرون‌های ورودی (x) و نرون خروجی (y) با تابع انتقال (f) و مقادیر عددی به نام وزن‌های سینپتیک^{۱۷} (w) انجام می‌شود [۱۹]. توابع انتقال متفاوتی مانند رابطه خطی یا پله‌ای وجود دارد [۷] که رایج‌ترین آن‌ها تابع سیگموئید است [۱۹]. برای شبکه پیشرو سه لایه با n ورودی x_1 تا x_n ، هر کدام از ورودی‌ها در وزن‌های بین نرون‌های دو لایه ورودی و لایه پنهان w_{ns} ضرب می‌شوند و پس از آن مجموع ورودی‌های وزن‌دار شده در اختیار تابع f قرار گرفته [۷] و مقدار حاصله

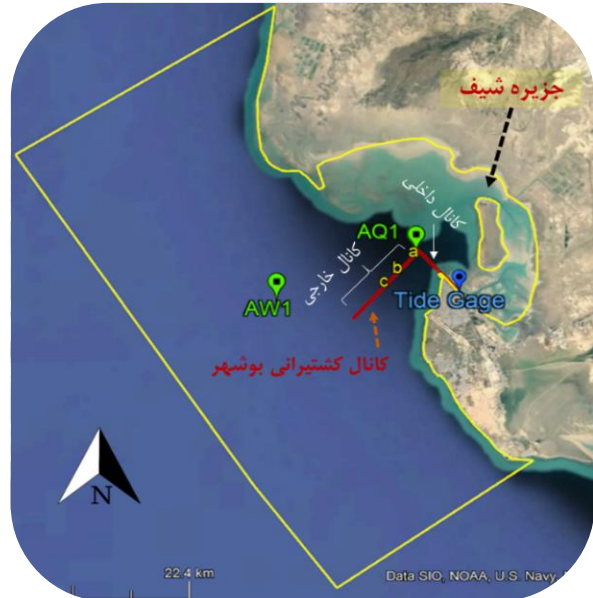
از آنجاکه اساس مدل‌سازی‌های پروژه PMOSHADES بر پایه پیش‌بینی شرایط دریا قرار دارد، بنابراین در ابتدا میدان باد از طریق بادهای قابل پیش‌بینی که در مقیاس جهانی در اختیارند مانند (GFS^۲) تهیه شده و بر اساس آن‌ها تمام مراحل مدل‌سازی از قبیل؛ حساسیت‌سنجی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل موج با حداکثر دقت انجام شد تا بهترین تنظیمات در مدل صورت گیرد. با وجود مناسب بودن نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج، اهمیت بحث تأمین امنیت حمل‌ونقل دریایی، نیازمند تلاش برای به حداکثر رساندن دقت و کمینه‌سازی خطاهای مدل‌سازی است. با شناسایی علت خطاها، که در به کارگیری باد مقیاس جهانی بوده، تدقیق نتایج از طریق تهیه باد قابل پیش‌بینی با دقت محلی صورت گرفته که برای این امر، تکنیک شبکه عصبی مصنوعی، به موازات روش عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱. جمع‌آوری و پردازش اطلاعات مورد نیاز

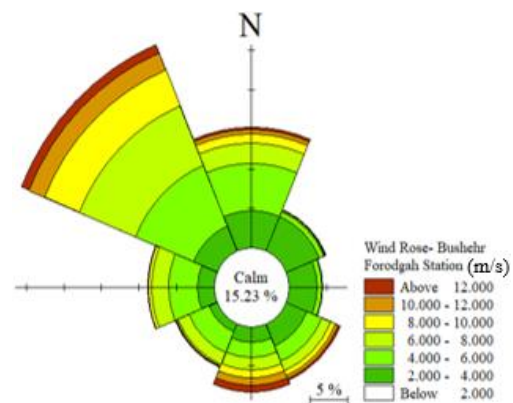
برای راه‌اندازی مدل اطلاعات مختلفی مانند باد، موج مرزی، آب‌نگاری، تراز آب و غیره نیاز است که در تهیه آن‌ها دارا بودن دقت بالا به همراه به‌روز بودن مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاکه هر ۱۰٪ خطا در داده باد، ۲۰٪ خطا در موج شبیه‌سازی ایجاد می‌کند، برای تعیین میدان باد قابل پیش‌بینی به‌عنوان مولد موج بوشهر، بررسی‌های جامعی بین بادهای پیش‌بینی شده موجود شامل ECMWF^۱ و GFS صورت گرفته که از جمله می‌توان به بررسی گلبادهای، بررسی روند الگوی تغییرات مؤلفه‌های سرعت باد برای شرایط مختلف از قبیل طوفانی، آرام و مقایسه هم‌زمان آن‌ها با باد ایستگاه هواشناسی بوشهر برای بازه سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۴ اشاره کرد. نمونه این مقایسه‌ها برای نقطه بادی واقع در ۵۱° شرقی و ۲۸/۵° شمالی، نزدیک‌ترین نقطه بادی از میدان باد GFS و ECMWF به ایستگاه هواشناسی بوشهر، در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

این بررسی‌ها برای باد سال‌های مختلف صورت گرفت که نمونه آن در شکل ۵ نشان داد که در مجموع افت‌وخیزهای سرعت باد GFS (با دقت مکانی ۰/۵ درجه) نسبت به

می‌وزد که شامل قوی‌ترین بادهاست و با تولید امواج عمود بر کشتی‌های عبوری از کانال، مستعد وارد نمودن بیشترین نوسانات به حرکات کشتی‌ها هستند. علاوه بر این باد، بادهای شمالی، جنوبی و جنوب‌شرقی نیز اهمیت و قدرت زیادی دارند و در تولید امواج منطقه تأثیر به‌سزایی دارند.



شکل ۲. بندر بوشهر و کانال کشتی‌رانی با جانمایی دستگاه اندازه‌گیری موج و تراز آب- نقاط a تا c برای حساسیت‌سنجی مدل استفاده شده‌اند.



شکل ۳. گلباد ترسیم‌شده برای ایستگاه هواشناسی بوشهر بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در مطالعه حاضر برای سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۱

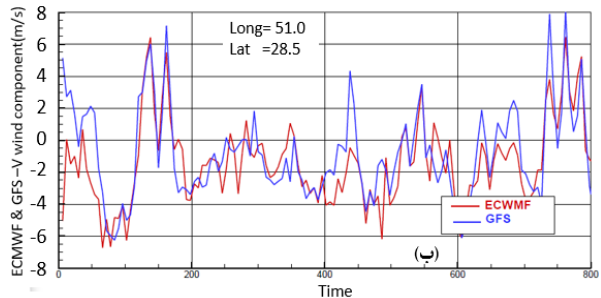
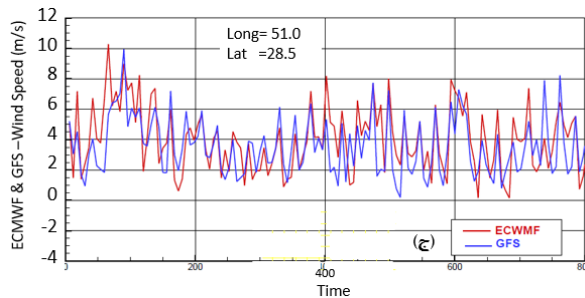
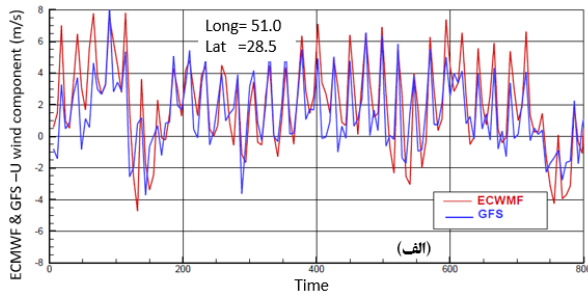
۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، شبیه‌سازی امواج بوشهر به‌وسیله زیربرنامه موج طیفی از نرم‌افزار PMODynamicsI انجام شده و به دلیل اهمیت کانال کشتی‌رانی در مطالعه حاضر، واسنجی و صحت‌سنجی مدل در این مکان صورت گرفته است.

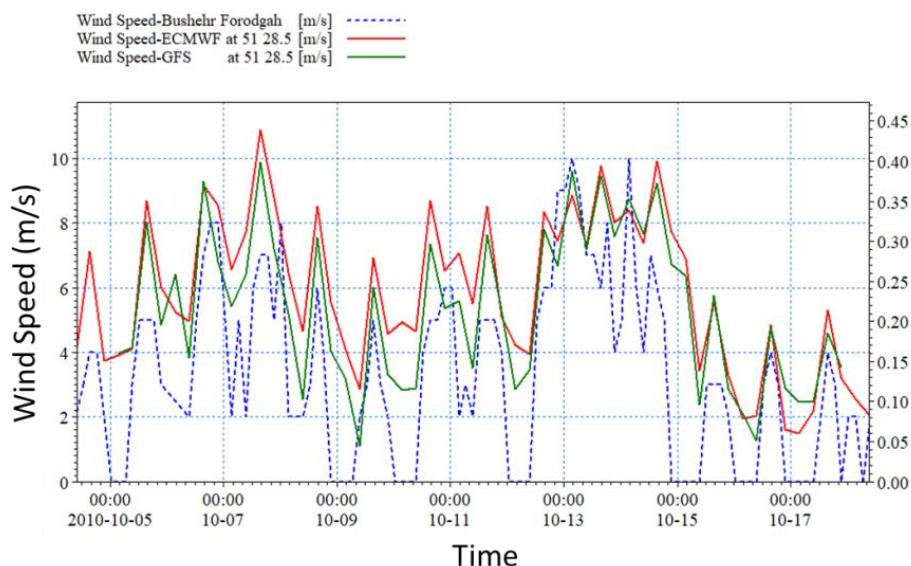
داد که باد نقاط نزدیک‌تر به بوشهر نسبت به نقاط دورتر، در تولید امواج این منطقه تأثیرگذارترند. بنابراین نقاط بادی GFS اطراف بوشهر (شکل ۶)، در نظر گرفته شده تا در شبیه‌سازی امواج به‌عنوان نیروی مولد موج به مدل PMODynamics اعمال شود.

ECMWF (با دقت‌های مکانی ۰/۵ درجه و بیشتر) شباهت بیشتری به روند باد ایستگاه هواشناسی بوشهر دارد و این امر برای جهت باد نیز تکرار شده است. همچنین مقایسه‌های آماری بین بادهای مانند (جدول ۱) نیز دقت بالاتر باد GFS به مقادیر باد ایستگاه بوشهر را نشان می‌دهد.

بررسی‌های دیگر با انجام شبیه‌سازی موج با در نظر گرفتن نقاط بادی مختلف میدان باد GFS به‌عنوان مولد موج، نشان



شکل ۴. نمونه‌ای از مقایسه سری زمانی مؤلفه‌های سرعت باد میدان باد GFS و ECMWF در نقطه‌ای به مختصات $28/5^{\circ}$ شمالی و $51/0^{\circ}$ شرقی



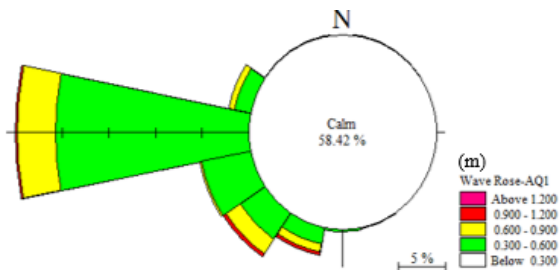
شکل ۵. مقایسه سری زمانی سرعت باد ایستگاه هواشناسی با دو باد GFS و ECMWF در نقطه‌ای

به مختصات $28/5^{\circ}$ شمالی و $51/0^{\circ}$ شرقی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر در سال ۲۰۱۰

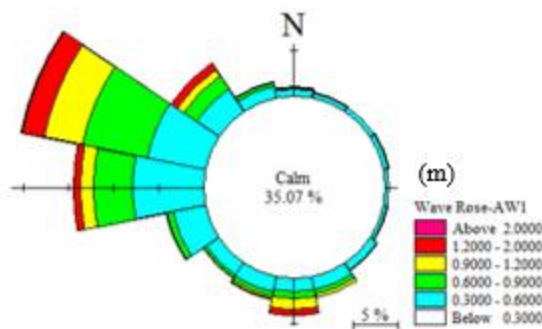
بالا پردازش‌هایی از قبیل؛ حذف اعداد پرت (نویزها) و درون‌یابی زمانی برای ایجاد پیوستگی اطلاعات، صورت گرفته است.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری مشخصه امواج در بوشهر

عمق	موقعیت جغرافیایی	دستگاه
۵ متر	۲۹/۰۱۹۶° شمالی و ۵۰/۸۰۳° شرقی	AQ1
۲۵ متر	۲۸/۹۷۷° شمالی و ۵۰/۶۶۰° شرقی	AW1
-	۲۸/۹۸۱° شمالی و ۵۰/۸۴۵° شرقی	Tide Gauge



(الف)



(ب)

شکل ۷. گلموج ترسیم‌شده بر اساس اندازه‌گیری امواج صورت گرفته در مطالعه حاضر در محل دو دستگاه الف) آب کم عمق (AQ1) و ب) آب عمیق (AW1)

بر اساس شکل ۷ جهت موج غالب آب عمیق، راستای غرب-شمال غربی دارد که با پیشروی به محل دستگاه آب کم عمق بر اثر وقوع پدیده انکسار، ارتفاع موج کوتاه‌تر و جهت آن به راستای غربی تغییر یافته است. شکل ۸ نشان می‌دهد که بادهای جنوب و جنوب شرقی با وجود فراوانی اندک، به دلیل شدت بالا قادرند امواجی مرتفع در آب کم عمق بوشهر ایجاد نمایند.

اطلاعات آب‌نگاری منطقه با دقت بسیار بالا (۱:۱۰۰۰) در کانال کشتی‌رانی) برای سال ۱۳۹۶ تهیه شد. موقعیت جغرافیایی نقاط خط ساحلی مورد نیاز برای ساخت شبکه محاسباتی، با دقت ۴۰۰ متر با برنامه گوگل ارت ۲۲ تهیه و آماده‌سازی شد.

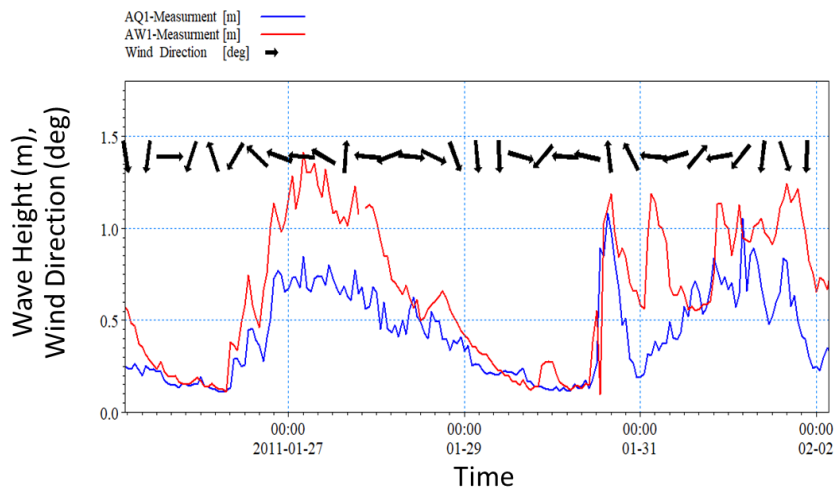
جدول ۱. مقادیر آماری مربوط به مقایسه باد ایستگاهی با باد GFS و ECMWF برای بخش‌هایی از سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۱

مقایسه باد ایستگاه هواشناسی بوشهر با مواقعی که اختلاف جهت بادها با باد اندازه‌گیری کمتر از ۲۰ درجه باشد	RMSE	CC	مقایسه باد ایستگاه هواشناسی بوشهر با باد GFS در نقطه ۵۰/۵° شرقی و ۲۹/۵° شمالی
۰/۲۳	٪۰/۴۷	٪۰/۸۷	مقایسه باد ایستگاه هواشناسی بوشهر با باد ECMWF در نقطه ۵۱° شرقی و ۲۸/۵° شمالی
۰/۲۹	٪۰/۲۸	٪۰/۸۱	

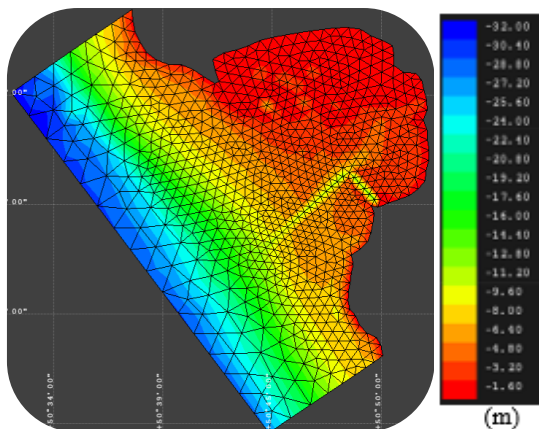


شکل ۶. موقعیت ایستگاه هواشناسی بوشهر (آبی‌رنگ) با نقاط بادی میدان GFS (سبز رنگ) موجود در اطراف بوشهر

داده دستگاه اندازه‌گیری موج آب عمیق AW1 (در عمق ۲۵ متر) به منظور تأمین شرایط مرزی مدل امواج و داده دستگاه موج‌نگار AQ1 در عمق ۵ متری برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شده‌اند. گلموج‌های این نقاط بر اساس داده سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۱ در شکل ۷ ترسیم شده و موقعیت این ایستگاه‌ها با محل ثبت داده تراز آب (TideGage) در شکل ۲ و جدول ۲ قرار دارد. روی داده‌های



شکل ۸. سری زمانی ارتفاع موج اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر به وسیلهٔ دستگاه‌های AWI و AQI با جهت باد



شکل ۹. شبکهٔ محاسباتی نهایی بوشهر با ابعاد ۶۰۰ متر در محدودهٔ کانال و ۲ کیلومتر برای آب عمیق بوشهر، رنگ‌های مختلف گویای مقادیر عمق هستند.

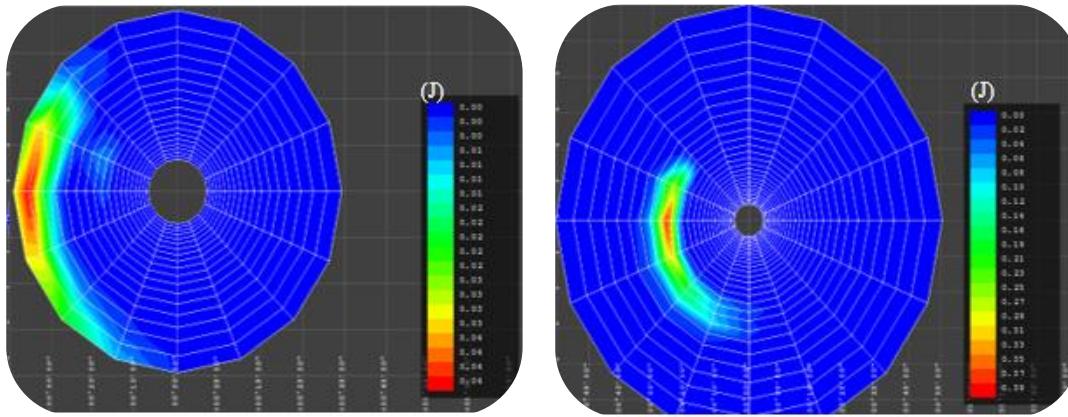
با تکمیل حساسیت‌سنجی‌ها و ارزیابی نتایج، انتخاب‌های نهایی برای برخی تنظیمات مدل شامل موارد زیر امکان‌پذیر شد: تعیین شبکه فرکانسی - جهتی انرژی موج با فرکانس کمینه 0.0769 هرترز در 27 گام فرکانسی و 16 گام جهتی، انتخاب گام زمانی 10 دقیقه برای انجام محاسبات، انتقال انرژی موج با روش‌هایی به دقت مرتبه اول، سوم و دوم به ترتیب برای فضای جغرافیایی، فرکانسی، جهتی امواج و تعیین ضریب گامای 0.8 برای شکست موج. علاوه بر آن چنین به دست آمد که نیاز است که برهمکنش سه گانه و چهارگانه به‌طور هم‌زمان در مدل فعال شوند.

۳. شبیه‌سازی امواج با مدل PMODynamicsI

۳-۱. آماده‌سازی مدل

در مرحله نخست، شبکه محاسباتی بندر بوشهر با استفاده از زیربرنامه‌های مدل PMODynamicsI، به‌صورت بدون‌ساختار^{۲۳} و مثلثی ساخته شده که برای توضیحات ساختار مدل به [۲۲] مراجعه شود. تحلیل‌های لازم برای تعیین زوایای مناسب گوشهٔ مثلث‌ها، کنترل مقدار سطح مقطع سلول‌ها و پرهیز از ایجاد نوع خیلی کوچک آن‌ها که می‌توانند در مدل ناپایداری ایجاد کنند، از طریق ایجاد خطوط راهنما^{۲۴} و نقاط راهنما^{۲۵} انجام شد. پس از انجام حساسیت‌سنجی مدل نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی با شبکه‌هایی به ابعاد مختلف 2 ، 4 و 6 کیلومتری و بررسی نتایج در نقاط a، b و c (شکل ۲)، در نهایت شبکه عمق‌سنجی با ابعاد تقریبی 2 کیلومتر برای مناطق آب عمیق بوشهر و 600 متر در منطقه آب کم‌عمق (شکل ۹) بهینه ارزیابی شد.

در ادامه، حساسیت مدل نسبت به موارد مختلف مانند گام زمانی محاسبات، شرایط مرزی، ساختار بندی طیف انرژی در فضای فرکانس و جهت، ضریب شکست و زبری بستر صورت گرفته است. در شکل ۱۰ نمونه مقایسه نتایج برای نقطه a و در ساختار بندی‌های مختلف طیف انرژی موج نشان داده شده است.

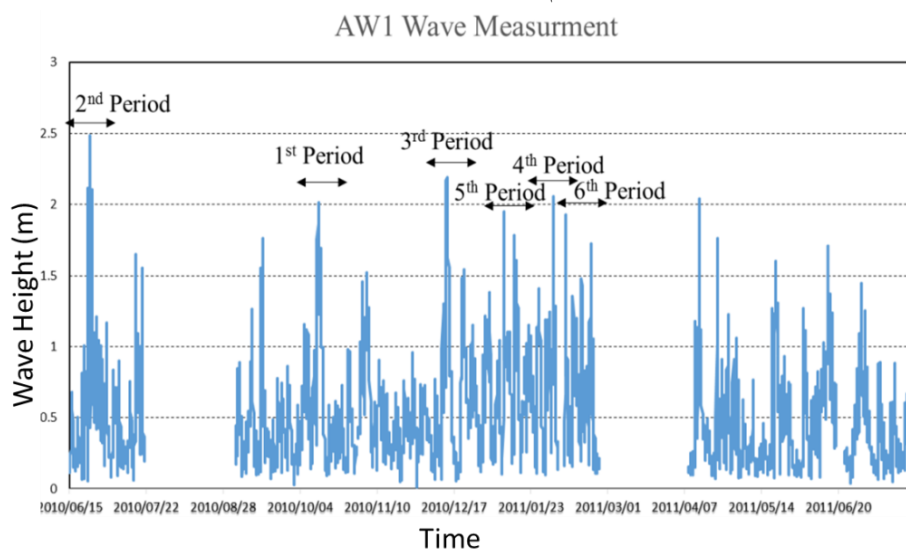


شکل ۱۰. طیف دوبعدی انرژی موج (در فضای فرکانسی-جهتی) در نقطه a برای مدل با فرکانس کمینه ۰/۰۷۶۹ و ۲۷ گام فرکانسی (سمت راست) و مدل با فرکانس کمینه ۰/۱۱۷۶ و ۱۸ گام فرکانسی (سمت چپ) که گویای مناسب‌تر بودن طیف انرژی سمت راست نسبت به سمت چپ است.

(شکل ۱۱). این دوره‌ها شرایط اقلیم باد و امواج بوشهر را پوشش می‌دهند، به طوری که در برخی، موج و باد غالب منطقه حکم فرماست و در برخی دیگر بادهایی با فراوانی هرچند اندک، اما قوی در تولید موج وزش دارند. واسنجی با استخراج نتایج مدل در نقطه‌ای معادل AQ1 و مقایسه هم‌زمان ارتفاع، پرید و جهت موج با اندازه‌گیری‌های موج این محل صورت گرفته است.

۲-۳. واسنجی و صحت‌سنجی مدل موج

واسنجی مدل نسبت به مواردی مانند نوع تابع رشد موج، ضریب زبری بستر، اعمال یا عدم اعمال تراز آب، اعمال نقاط بادی مختلف GFS برای تعیین نهایی نقطه بادی مولد موج، محل مرزهای باز و نوع شرایط مرزی و غیره صورت گرفته که برای طولانی نشدن مقاله از آوردن نمودارهای آن اجتناب شد. واسنجی برای دوره‌های زمانی ۱۰ تا ۲۰ روزه به‌عنوان نماینده فصل‌های مختلفی از سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۱ انجام شد



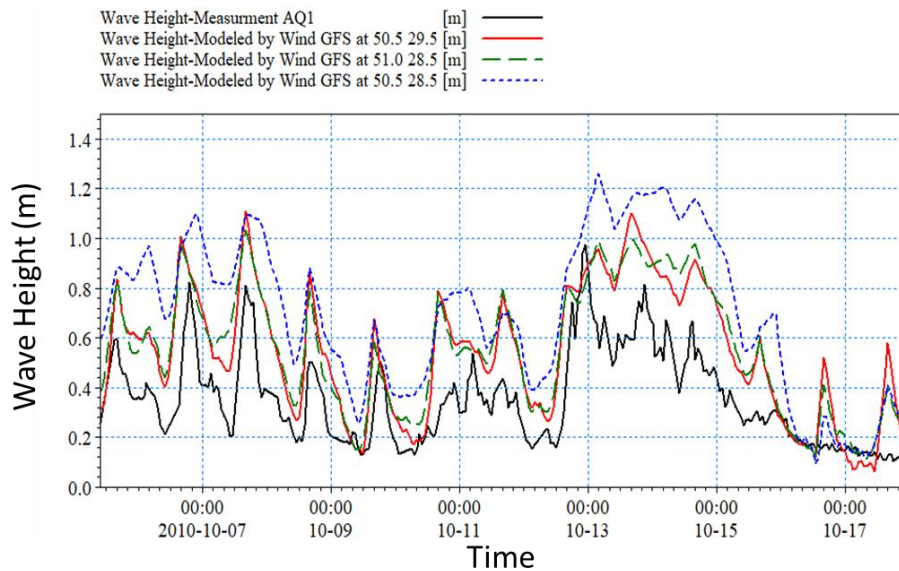
شکل ۱۱. ارتفاع موج اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر با AW1 به همراه نمایش دوره‌های زمانی واسنجی مدل

شرقی- $28/5^{\circ}$ شمالی و $50/5^{\circ}$ شرقی- $29/5^{\circ}$ شمالی، که نسبت به سایر نقاط بادی در فاصله نزدیک‌تری به ساحل قرار دارند، روند ارتفاع موج مشابه‌تری به موج اندازه‌گیری در

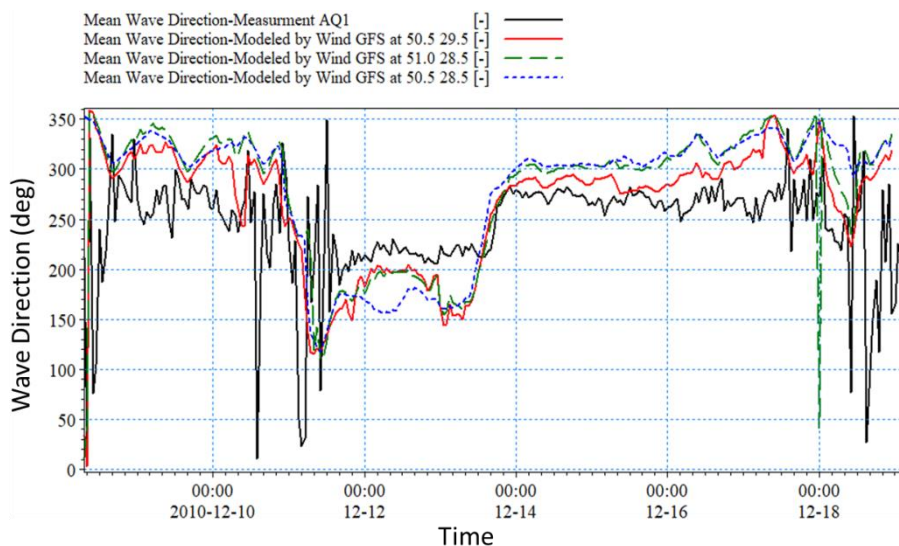
نمودارهای مربوط به ارتفاع و جهت موج مدل‌سازی شده با اعمال باد نقاط مختلف از میدان GFS به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهد که به کارگیری باد در مختصات 51°

میانگین مربع خطای ارتفاع موج شبیه‌سازی شده نسبت به سایر مدل‌ها کمتر بوده و در آن فراوانی وقوع موج‌هایی که اختلاف جهت آن با اندازه‌گیری کمتر از ۲۰ درجه بوده تا ۳۵ درصد بیشتر از سایر مدل‌ها بوده که انتخاب این نقطه بادی برای ادامه شبیه‌سازی‌های موج را در پی داشته است.

AQ1 به دست داده و پراکندگی جهت موج حاصله نیز کمتر از مدل‌هایی با باد واقع شده در میانه دریا هستند (شکل ۱۳). نتایج آماری ارائه شده در جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که گرچه مقدار همبستگی ارتفاع موج مدل‌سازی شده با باد نقاط مختلف نسبت به اندازه‌گیری مشابه یکدیگرند، اما برای مدل با نیروی باد نقطه $50/5^{\circ}$ شرقی و $29/5^{\circ}$ شمالی، همواره جذر



شکل ۱۲. ارتفاع موج واسنجی شده نسبت به نقاط بادی مختلف GFS در نقطه AQ1- دوره زمانی اول واسنجی



شکل ۱۳. نتایج جهت موج واسنجی شده نسبت به نقاط بادی مختلف GFS در نقطه AQ1- دوره زمانی چهارم واسنجی

جدول ۳. مقادیر آماری مربوط به مقایسه نتایج موج مدل شده با نیروی باد نقاط بادی مختلف از میدان GFS نسبت به اندازه گیری در AQI

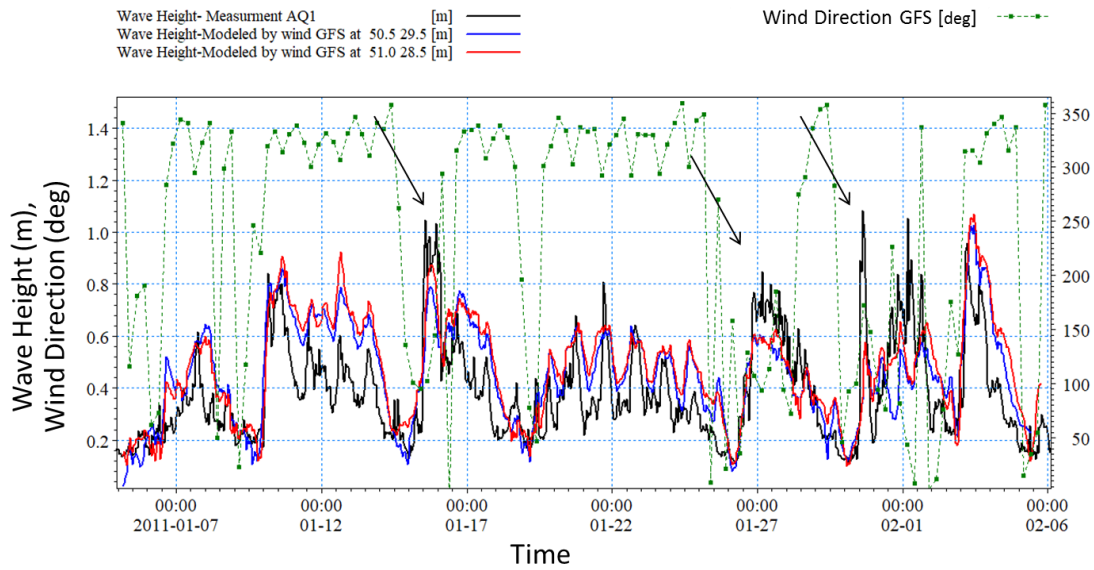
دوره های زمانی انجام واسنجی مدل				نتایج مدل و اندازه گیری
دوره اول	دوره سوم	دوره پنجم	دوره ششم	
٪۸۷	٪۷۶	٪۷۲	٪۵۸	ضریب همبستگی بین ارتفاع موج مدل ۱ و اندازه گیری
٪۸۵	٪۷۲	٪۷۵	٪۵۹	ضریب همبستگی بین ارتفاع موج مدل ۲ و اندازه گیری
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۲۳	مجدور میانگین مربع خطا بین ارتفاع موج مدل ۱ و اندازه گیری
۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۶	مجدور میانگین مربع خطا بین ارتفاع موج مدل ۲ و اندازه گیری
٪۴۷	٪۳۰	٪۴۳	٪۴۷	موقعی که اختلاف جهت موج مدل ۱ و اندازه گیری $20 < \Delta\theta < 0$ است
٪۳۰	٪۱۵	٪۲۵	٪۱۶	موقعی که اختلاف جهت موج مدل ۲ و اندازه گیری $20 < \Delta\theta < 0$ است

*: مدل ۱: با میدان باد GFS در نقطه $50/5^\circ$ شرقی و $29/5^\circ$ شمالی **: مدل ۲: با میدان باد GFS در نقطه 51° شرقی و $28/5^\circ$ شمالی

هستند، به سرعت از سوی شمال غربی به جنوب شرقی تغییر مسیر داده، ارتفاع موج شبیه سازی شده نسبت به اندازه گیری دست پایین بوده و این نتیجه مستقل از مختصات نقطه ی بادی به کار برده شده در مدل است (شکل ۱۴). همچنین با وجود اینکه روند جهت موج شبیه سازی شده تقریباً مشابه مقادیر اندازه گیری به دست آمده (شکل ۱۵) اما همین خطای تا حدود 50° درجه ای، می تواند در تخمین حرکات نوسانی وارده از طرف موج بر کشتی خطا ایجاد می کند. با علم به این که تنظیمات مدل موج بهینه انتخاب شده و تغییر در آن بر دقت نتایج نمی افزاید، علت خطاهای مدل سازی در میدان باد GFS مورد استفاده شناسایی شده است. گرچه این باد در شبیه سازی شرایط امواج آب کم عمق بوشهر توانایی داشته، اما از آنجا که مدل های آب و هوایی جهانی^{۲۶} با تفکیک مکانی بزرگ (حدود 50 کیلومتر) تهیه می شوند [۲۳]، قادر به تعیین ویژگی های مهم و ریزمقیاس محلی نیستند و این امر عامل ایجاد خطا در شبیه سازی امواج منطقه بوده است. بنابراین به منظور دستیابی به دقت حداکثری و حداقل نمودن خطا، تولید باد قابل پیش بینی با دقت محلی با روش داده کاوی و به کارگیری تکنیک شبکه عصبی مصنوعی مورد توجه قرار گرفته است.

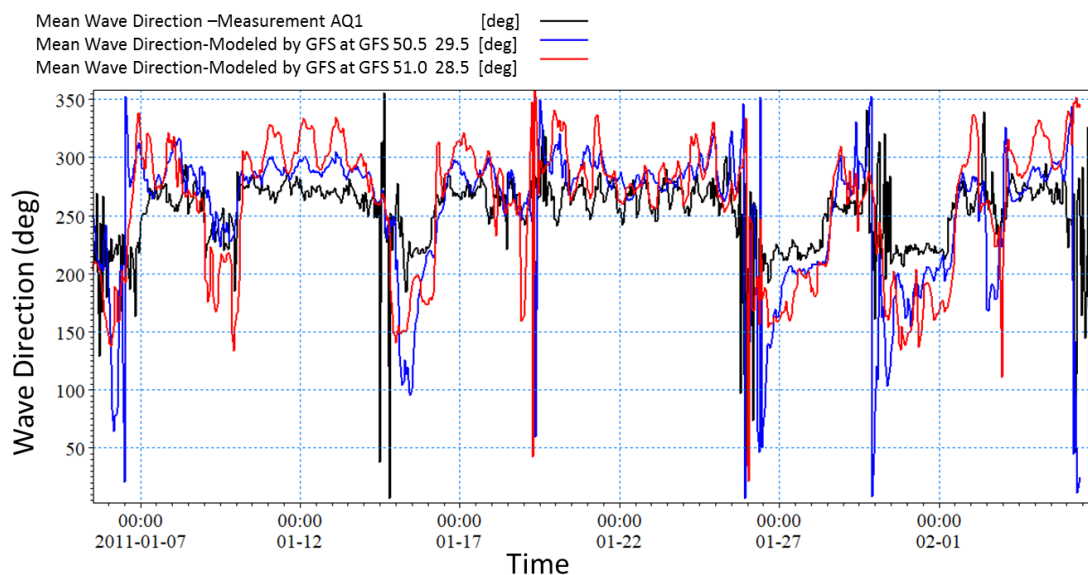
از دیگر نتایج واسنجی مدل می توان به تنظیم نهایی فاصله 5 و 8 کیلومتری به ترتیب برای مرزهای شرقی و غربی (مرزهای عمود به ساحل) از بخش امگا شکل بندر با شرط مرزی Lateral برای آنها، تأمین شرط مرزی متغیر در زمان و ثابت در مکان با مشخصه موج دستگاه AWI برای مرز موازی ساحل و عدم تأثیر تراز آب (عدم تأثیر جزرومد) بر امواج در محل کانال کشتی رانی اشاره کرد. با این تنظیمات، صحت سنجی انجام شده طی دوره تصادفی یک ماهه، نشان داد که شبیه سازی ارتفاع و پیروی موج همبستگی 70% و جذر میانگین خطای $0/16$ نسبت به مقادیر اندازه گیری در محل کانال کشتی رانی دارند و در 48% مواقع اختلاف جهت موج شبیه سازی شده از اندازه گیری کمتر از 20° درجه بوده است. با وجود دستیابی به چنین نتایج مناسب و قابل پذیرشی، اهمیت پیش یابی دقیق شرایط امواج برای پیش بینی دقیق UKC و تعیین ایمن یا نایمن بودن شرایط دریانوردی بوشهر ایجاب کرد تا با شناسایی منبع خطاها، با انتخاب رویکردی مناسب بر میزان دقت نتایج افزوده شود.

بررسی ها نشان داد که در زمان های وزش باد شمال غربی (باد غالب منطقه)، نتایج مدل سازی مناسب بوده اما در مواقعی که بادی که قدرت زیادی داشته و مستعد ایجاد امواج مرتفع



شکل ۱۴. نتایج ارتفاع موج برای صحت‌سنجی مدل موج محلی بوشهر

زمان‌های دست پایین بودن ارتفاع موج به علت تغییر جهت ناگهانی باد به جانب جنوب شرقی با فلش‌ها مشخص شده است.

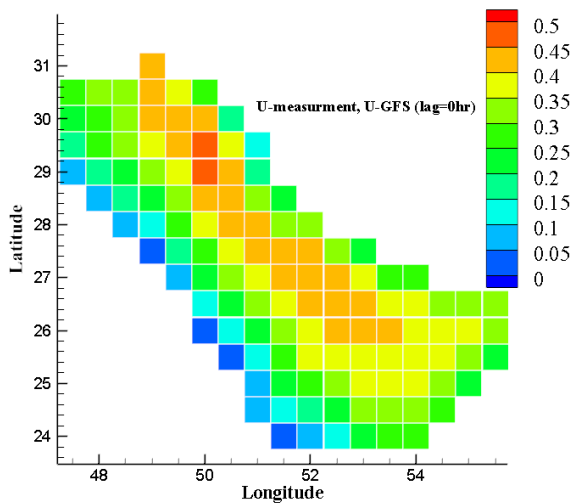


شکل ۱۵. نتایج جهت موج برای صحت‌سنجی مدل موج محلی بوشهر

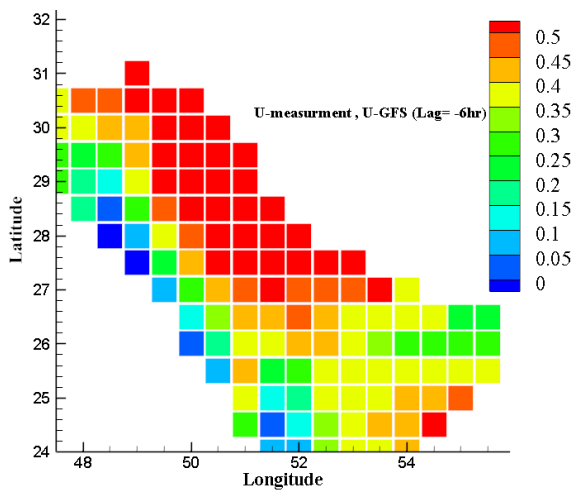
آن، در ازای تأمین مقادیر ورودی جدید مربوط به داده‌های زمان آتی باد GFS، باد با دقت محلی مربوط به زمان آینده را در لایه خروجی پیش‌بینی نماید. مجموعه اطلاعات باد که در بازه سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۶ تهیه شده در نسبت ۷۰ به ۳۰ به ترتیب برای آموزش و ارزیابی شبکه اختصاص داده شده [۷، ۱۹] و توابع انتقال سیگموئید در لایه پنهان و خروجی، انتخاب شده است. آموزش شبکه بر اساس الگوریتم تکرار صورت گرفته و معیار توقف آن، کاهش تفاضل خروجی

۴. داده‌کاوی میدان باد

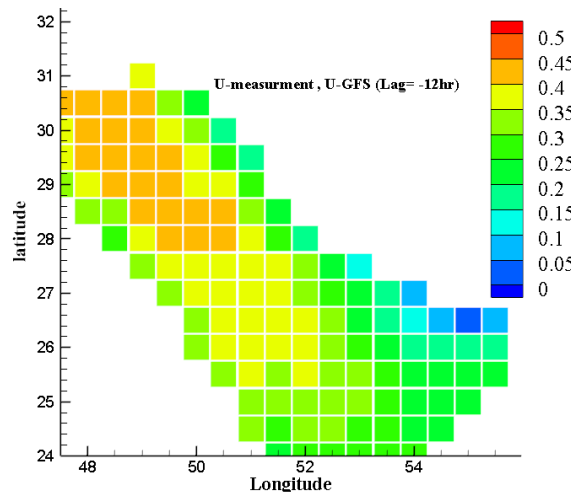
در تحقیق حاضر بر اساس تجارب قبلی [۷، ۲۵، ۱۵] از شبکه عصبی سه لایه پیشرو MLP برای تولید میدان باد استفاده شده و اجرای آن با نرم‌افزار Qnet انجام شده است [۲۵]. داده مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی شبکه (به‌عنوان پیش‌بینی شونده‌ها) به ترتیب از اطلاعات باد GFS (باد مقیاس جهانی) و باد ایستگاه هواشناسی بوشهر (باد محلی) تأمین شده تا شبکه الگوی رفتاری بین آن‌ها را فرا گیرد [۲۶] و بر اساس



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۶. نقشه پراکنش مکانی همبستگی مؤلفه U سرعت باد GFS نسبت به مقدار اندازه گیری در ایستگاه هواشناسی بوشهر (الف) بدون تأخیر زمانی، (ب) با تأخیر زمانی ۶ ساعت و (ج) تأخیر زمانی ۱۲ ساعت

شبکه (y_n) از مقدار هدف در همان گره (y_t) در نظر گرفته شده است [۱۸] که گاهی برای رسیدن به این منظور، تعداد تکرار به ۱۰۰۰ دور نیز رسیده است.

$$Er = \sum [y_n - y_t]^2 \quad (2)$$

۴-۱. انتخاب متغیرهای ورودی شبکه عصبی

برای انتخاب پارامترهای مؤثر و مناسب به عنوان ورودی شبکه، شاخص ضریب همبستگی بین مؤلفه‌های U و V باد GFS نسبت به باد ایستگاه هواشناسی بوشهر که هم‌زمان‌سازی مبنای ساعت GTM برای آن‌ها صورت گرفته، در کل خلیج فارس محاسبه و پهنه مکانی تغییرات آن ترسیم شده است. این شاخص برای سه تأخیر زمانی ۰، ۶ و ۱۲ ساعت محاسبه شده است، بدان معنا که با در نظر گرفتن اطلاعات باد ایستگاه هواشناسی در زمان x، همبستگی آن با باد GFS در زمان‌های x، x-6hr و x-12hr محاسبه شده است. علت این است که در مطالعه حاضر بررسی امواج مورد توجه است و موج با تأخیر زمانی نسبت به باد تولید می‌شود [۲۷]. در شکل ۱۶ شاخص همبستگی بادهای راستای U ارائه شده است. دامنه رنگ‌های گرم با تغییر تأخیر زمانی از ۰ به ۶ ساعت افزوده شده که به معنای افزایش دامنه تأثیر این اطلاعات برای پیش‌بینی دقیق باد است. از این شکل استنتاج می‌شود که دامنه تغییرات شاخص همبستگی بین متغیر ورودی و خروجی از ۰/۰۱ تا ۰/۴۵ تغییر می‌کند.

در شکل ۱۷، شاخص همبستگی بین سرعت بادهای راستای V نمایش داده شده است. دامنه تغییرات عددی این شاخص نسبت به شکل ۱۶ رشد تقریبی ۲۰ درصد داشته و بیشینه آن به ۰/۷۵ نیز می‌رسد که گویای ارزش اطلاعاتی بیشتر این دسته از متغیرهای ورودی (بردارهای V) نسبت به متغیرهای ورودی سابق (بردارهای U) است. اما در هر دو، شاخص همبستگی با افزایش تأخیر زمانی اطلاعات از ۶ به ۱۲ ساعت، کاسته شده که به معنی کاهش تأثیر دامنه این اطلاعات و احتمال کمتر به کارگیری آن‌ها نسبت به داده‌ها با تأخیرهای زمانی صفر و ۶ ساعت، برای پیش‌بینی باد بوشهر است.

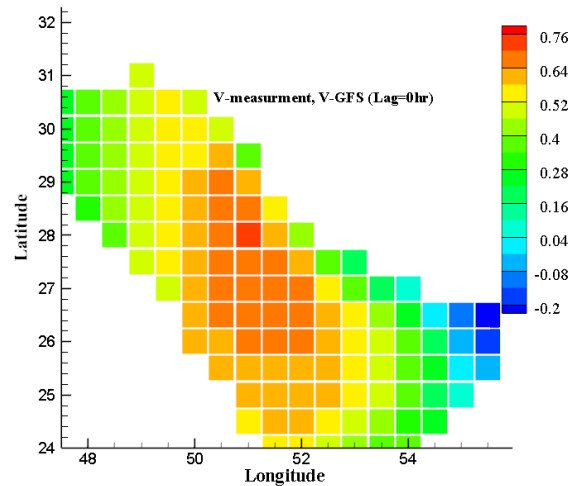
۴-۲. طراحی سناریوها

روش اتخاذ شده در این مطالعه، طراحی شبکه‌های جداگانه برای پیش‌بینی هر مؤلفه سرعت باد است تا از این طریق امکان مانور بیشتر برای افزایش دقت فراهم شود. پیشتر بیان شد که برای نرون‌های ورودی شبکه از داده باد GFS و برای خروجی شبکه از باد ایستگاه هواشناسی بوشهر استفاده شده است. از آنجا که تعداد متغیرهای لایه ورودی در رفتار شبکه‌های عصبی نقش عمده‌ای دارد [۲۹]، بنابراین کارایی شبکه‌های عصبی مختلف با تعداد متفاوت از نرون‌های ورودی با طراحی سناریوهای مختلف بررسی شد. انتخاب تعداد متغیرهای ورودی به این صورت بوده که ابتدا با تعداد متغیر کم شروع شده، سپس بر تعداد آن‌ها افزوده شده تا دقت مطلوب حاصل شد. بیش از ۵۰ سناریو طراحی شد مانند (جدول ۴) که ارزیابی کارایی آن‌ها با مقایسه ضریب همبستگی (رابطه ۳) و جذر میانگین مربعات خطا (رابطه ۴) بین باد پیش‌بینی شده از هر سناریو و باد واقعی ایستگاه بوشهر در هر دو مجموعه‌های آموزشی و ارزیابی صورت گرفته است.

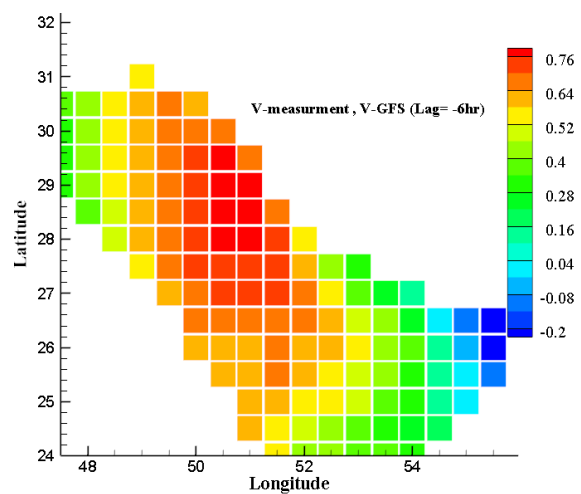
$$CC = \frac{\sum_i (t_i - \bar{t})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_i (t_i - \bar{t})^2 \sum_i (a_i - \bar{a})^2}} \quad [۲۹] \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2}{N}} \quad [۳۰] \quad (۴)$$

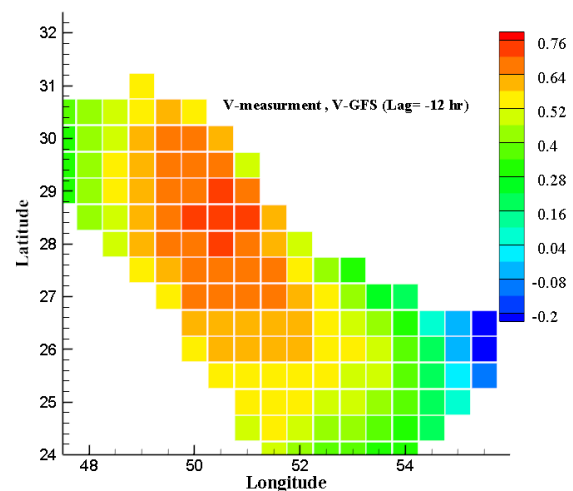
که \bar{t} و \bar{a} به ترتیب متوسط مقادیر خروجی شبکه، اندازه‌گیری و N تعداد داده‌هاست. ارزیابی سناریوهای مختلف نشان داد که طرح‌واره‌هایی که در آن تأخیر زمانی اطلاعات نرون‌های ورودی نسبت به زمان حال بیشتر باشد مانند (سناریوی ۳ نسبت به سناریوی ۱، ۲ و ۴)، ضریب همبستگی کمتر و جذر میانگین مربع خطا بیشتر است که به معنی خطای بیشتر در باد پیش‌بینی شده است. بدان معنا که هرچه دوره‌های زمانی پیش‌بینی در بازه ساعت‌های کوتاه‌تری از آینده انتخاب شود، نتایج مطلوب‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت خواهد بود. بر اساس نتایج آماری جدول ۴، سناریوی ۴ بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی باد دارد. با وجود این برای تأیید سناریوی مناسب که باد تولید شده از آن موج آب کم‌عمق بوشهر با کمترین خطا را پیش‌بینی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷. نقشه پراکنش مکانی همبستگی مؤلفه V سرعت باد GFS نسبت به مقدار اندازه‌گیری در ایستگاه هواشناسی بوشهر الف) بدون تأخیر زمانی، ب) با تأخیر زمانی ۶ ساعت و ج) تأخیر زمانی ۱۲ ساعت

دست آمد که باد حاصل از سناریوی ۴ در شبیه‌سازی دقیق‌تر موج آب کم‌عمق بوشهر نسبت به سایر سناریوها موفق‌تر است، بنابراین شبکه عصبی‌ای با ویژگی‌های ارائه‌شده در جدول ۵ به‌عنوان طرح‌واره نهایی پیش‌بینی باد محلی بوشهر انتخاب شده است.

نماید، باد حاصل از هر سناریو به‌عنوان نیروی خارجی به مدل موج بوشهر اعمال شد. شبیه‌سازی تولید امواج در هر سناریو، برای چندین دوره زمانی (مشخص شده در شکل ۱۱) صورت گرفت. بر اساس مقایسه نتایج موج مدل‌سازی از هر سناریو با موج اندازه‌گیری شده در محل دستگاه AQ1 (که برای طولانی نشدن مقاله از آوردن آن‌ها خودداری شده) چنین به

جدول ۴. مشخصات برخی سناریوهای طراحی شده برای پیش‌بینی باد محلی با مقایسه آن‌ها با مؤلفه‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده

سناریو	متغیر ورودی ۱	متغیر ورودی ۲	متغیر ورودی ۳	همبستگی و جذر میانگین مربع خطا	
				مرحله آموزش	مرحله ارزیابی
سناریوی ۱	51.0°E 29.0°N, U, LAG= 0 hr	51.0°E 29.5°N U, LAG= 0 hr		۷۴٪ و ۲/۹۳	۷۹٪ و ۲/۵۶
	51.0°E 29.0°N, V, LAG= 0 hr	51.0°E 29.5°N V, LAG= 0 hr		۸۲٪ و ۳/۰۸	۸۴٪ و ۲/۷۴
سناریوی ۲	51.0°E 29.0°N, U, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N U, LAG= 0 hr	51.0°E 28.5°N U, LAG= -6 hr	۷۲٪ و ۳/۰۲	۷۸٪ و ۲/۸۴
	51.0°E 29.0°N, V, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N V, LAG= 0 hr	51.0°E 28.5°N V, LAG= -6 hr	۷۸٪ و ۳/۳۴	۷۹٪ و ۳/۱۷
سناریوی ۳	51.0°E 29.0°N, U, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N U, LAG= -6 hr	51.5°E 28.5°N V, LAG= -12	۴۷٪ و ۳/۸۴	۴۵٪ و ۳/۴
	51.0°E 29.0°N, V, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N V, LAG= -6 hr	51.5°E 28.5°N U, LAG= -12 hr	۵۲٪ و ۳/۷۳	۵۹٪ و ۳/۲
سناریوی ۴	51.0°E 29.0°N, U, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N U, LAG= -6 hr	50.5°E 29.5°N V, LAG= 0 hr	۸۳٪ و ۲/۹۵	۸۵٪ و ۲/۶۹
	51.0°E 29.0°N, V, LAG= -6 hr	51.0°E 29.5°N V, LAG= -6 hr	50.5°E 29.5°N U, LAG= 0 hr	۷۰٪ و ۲/۸۲	۷۴٪ و ۲/۳۸

جدول ۵. معماری نهایی شبکه تولید میدان باد محلی بوشهر برای استفاده در مدل موج محلی بوشهر

متغیرهای ورودی هر شبکه			شبکه مؤلفه U
29°N و 51°E U, LAG= -6 hr	29.5°N و 51.0°E U, LAG= -6 hr	29.5°N و 50.5°E V, LAG= LAG=-0 hr	
متغیرهای ورودی هر شبکه			شبکه مؤلفه V
29°N و 51°E V, LAG= -6 hr	29.5°N و 51.0°E V, LAG= -6 hr	29.5°N و 50.5°E U, LAG= -0 hr	
سیگموئید			
تابع انتقال			
یک لایه ورودی، یک لایه میانی و یک لایه خروجی			
تعداد لایه‌ها			
برای لایه ورودی مؤلفه U: ۳ گره - لایه میانی: ۳ گره - لایه خروجی: ۱ گره			
برای لایه ورودی مؤلفه V: ۳ گره - لایه میانی: ۳ گره - لایه خروجی: ۱ گره			
تعداد گره‌ها			
پیش‌بینی مؤلفه‌های سرعت باد به‌منظور اعمال آن به مدل موج محلی بوشهر			
هدف			

نرون‌های ورودی شبکه، امکان پیش‌بینی باد محلی بوشهر فراهم شده است. برای ارزیابی کارایی باد محلی تولیدشده نسبت به باد GFS در تدقیق شبیه‌سازی امواج آب‌های بوشهر، چندین دوره زمانی با شرایط مختلف جوی انتخاب و علاوه بر تهیه باد GFS در آن دوره‌ها، باد محلی نیز با شبکه عصبی

۵. یافته‌ها و بحث

پس از بررسی‌های مختلف روی ساختار شبکه‌های عصبی متفاوت، طرح‌واره مناسب برای داده‌کاوی باد جهانی GFS برای تولید باد محلی بوشهر انتخاب شده است. بنابراین با تهیه داده‌های باد جدید GFS از زمان‌های آتی در محل

کاربرده شده به مدلی با باد GFS حداکثر تا ۲۵ درصد افزایش یافته است. بررسی سری زمانی نتایج به دست آمده از دو مدل و مقایسه هم‌زمان با اندازه‌گیری موج آب کم‌عمق بوشهر در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیز انطباق بیشتر نتایج مدل با باد محلی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری را نشان داد. این مسئله هم در زمان وزش باد غالب منطقه (در جهت شمال‌غربی) و هم دوره وزش بادهای قوی جنوب شرقی، که باد GFS در شبیه‌سازی امواج این بادهای توانمندی لازم را نداشت، به دست آمده که گویای صحت عملکرد باد محلی تولیدشده از شبکه عصبی در تدقیق شبیه‌سازی امواج محلی بوشهر است. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، Wind ANN معرف باد تولیدشده با شبکه عصبی است. لازم به یادآوری است که دقت نتایج برای پررود موج در هر دو مدل تغییر قابل توجهی نداشته و حدود ۷۰٪ به دست آمده است.

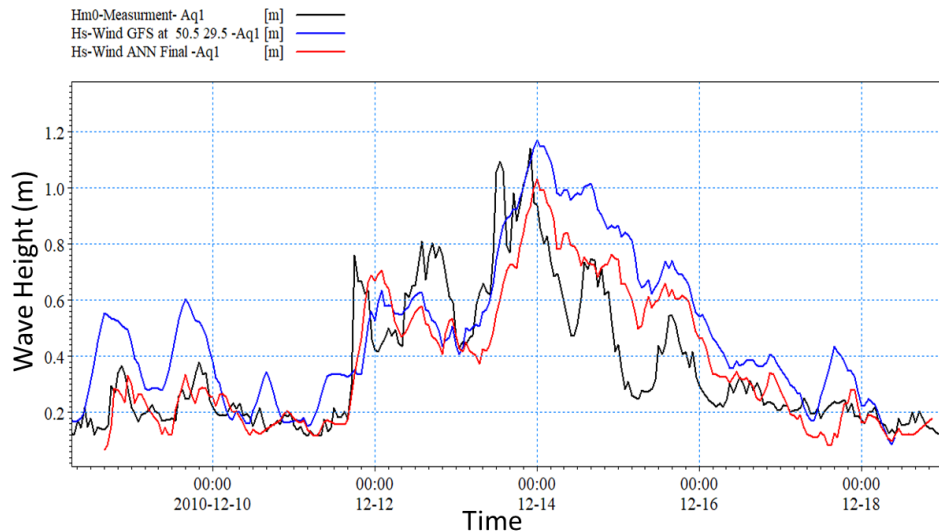
نهایی تولید و هر دو به‌عنوان نیروی مولد با شرایط بیان‌شده در جدول ۶ به مدل PMODynamicsI اعمال شدند و نتایج در محل آب کم‌عمق بوشهر مقایسه شد. شاخص‌های آماری نتایج این ارزیابی در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت نتایج مدلی که در آن از باد محلی تولیدشده با شبکه عصبی استفاده‌شده بیشتر از مدل با به‌کارگیری میدان باد GFS بوده و این امر از ضریب همبستگی بالاتر و جذر میانگین خطای کمتر ارتفاع موج مدل‌شده نسبت به اندازه‌گیری در محل دستگاه AQI مشهود است. به‌علاوه، جهت موج مدل‌سازی شده با نیروی باد محلی نیز دقیق‌تر از جهت موج به دست آمده از مدل با نیروی باد GFS بوده است. به صورتی که درصد فراوانی زمان‌هایی که اختلاف جهت موج اندازه‌گیری شده با مقدار مدل‌سازی کمتر از بیست درجه باشد، از مدلی که باد محلی در آن به

جدول ۶. شرایط نهایی تنظیمات مدل موج محلی بوشهر

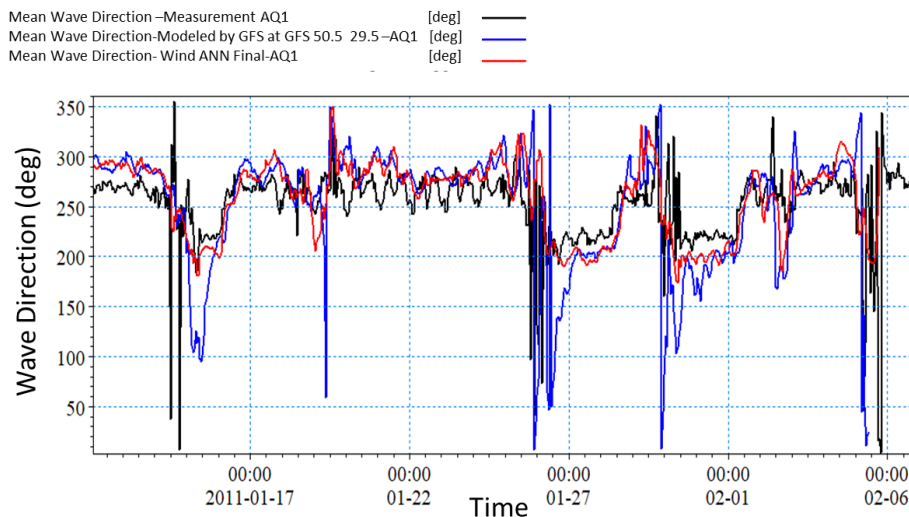
توضیحات	شرایط مرزی	نیروی باد	روش انتقال انرژی
(۱) زبری Collins با مقدار ۰/۰۰۳ (۲) سفیدک رأس موج با ضرایب $\Delta=8$ و $Cdis=2$ (۳) شرایط اولیه با طیف صفر، ضریب شکست موج ۰/۸ (۴) شبکه عمق‌سنجی با ابعاد ۶۰۰ متر در اطراف کانال کشتی‌رانی (۵) ساختار شبکه محاسباتی طیف انرژی در فضای فرکانس با کمینه ۰/۰۷۶۹ هرتز و ۲۷ گام فرکانس در کل جهات با ۱۶ گام جهتی	در مرز شرقی و غربی: Lateral در مرز جنوبی: تأمین‌شده از مشخصات موج AWI	باد GFS و میدان باد تولیدشده از شبکه عصبی با طرح‌واره ارائه‌شده در جدول ۵ و در نظر گرفتن تابع Holthuijsen برای رشد موج ناشی از باد	در فضای جغرافیایی: دقت مرتبه اول در فضای فرکانس: دقت مرتبه سوم (PPM) در فضای جهت: دقت مرتبه دوم (FROMM)

جدول ۷. مقایسه آماری نتایج موج مدل بوشهر با نیروهای باد GFS و ANN نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در محل دستگاه AQI

دوره زمانی	نیروی باد	ضریب همبستگی نسبت به اندازه‌گیری		جذر میانگین مربع خطا نسبت به اندازه‌گیری		درصد مواقعی که جهت موج مدل و اندازه‌گیری در بازه $20 < \Delta \theta < 40$ قرار دارد
		Hs	Tp	Hs	Tp	
دوره زمانی ۲۰۱۲/۱۲/۸ تا ۲۰۱۲/۱۲/۱۸ (باد غالب دوره: غرب-شمال‌غربی)	GFS	٪۷۷	٪۵۶	۰/۲۱	۱/۳	٪۴۲
	WIND ANN	٪۸۶	٪۵۴	۰/۱۳	۱/۴	٪۶۶
دوره زمانی ۲۰۱۱/۱/۲۵ تا ۲۰۱۱/۲/۵ (باد غالب دوره: جنوب شرقی)	GFS	٪۶۵	٪۷۶	۰/۱۸	۱/۰	٪۴۴
	WIND ANN	٪۷۲	٪۷۰	۰/۱۷	۱/۰	٪۵۶



شکل ۱۸. نمونه تدقیق نتایج ارتفاع موج شبیه‌سازی شده- در دوره زمانی ۲۰۱۰/۱۲/۸ تا ۲۰۱۰/۱۲/۱۸ که باد شمال غربی حاکم است.



شکل ۱۹. نمونه تدقیق جهت موج شبیه‌سازی شده- در دوره زمانی ۲۰۱۱/۱/۱۴ تا ۲۰۱۱/۲/۵ که فراوانی باد جنوب شرقی قابل توجه است.

راهکارهایی نوین برای کاهش مقدار آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، به کارگیری باد قابل پیش‌بینی GFS برای شبیه‌سازی امواج بوشهر با مدل PMODynamicsI همبستگی‌ای در حدود ۷۰٪ نسبت به اندازه‌گیری‌های موج به دست داد که با وجود دقت قابل قبول، کاربری آن در پروژه PMOSHADES دقت بیشتری را می‌طلبد. این امر استفاده از میدان باد با دقتی بیشتر و در مقیاس محلی را ایجاب نمود؛ زیرا بادهای مقیاس جهانی قادر به دیدن پدیده‌های ریزمقیاس نیستند. از آنجاکه تهیه باد محلی و قابل

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه به ارائه راهکاری از تلفیق روش عددی و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق شرایط امواج بندر بوشهر، با تمرکز بر محدوده آب کم عمق، اختصاص دارد. محوریت پیش‌بینی امواج در پروژه PMOSHADES، استفاده از داده‌های باد پیش‌بینی را ایجاب نموده که اغلب در مقیاس جهانی موجودند؛ بنابراین می‌توانند خطاهایی را در شبیه‌سازی امواج ایجاد نمایند. این خطاها در مطالعاتی مانند تعیین شرایط ایمن یا نایمن دریانوردی تحت تأثیر امواج می‌تواند اثرات مخربی به همراه داشته باشد و نیاز است

ترکیبی با شبکه عصبی مصنوعی در مطالعه [۱۸] نشان داد که دقت روش ترکیبی نسبت به مدل عددی فوق قابل قبول است و به‌عنوان روش اقتصادی استفاده از آن در حل مسائل امواج پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[۱] شادکام سعید، رابعی غلامی اعتمادالدین، آل علی نسیم. کاهش غلشش عرضی شناورها با استفاده از حل معادلات روش‌های مخازن کنترل‌شده فعال و ژيروسکوپ ضد غلشش. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳۹۵؛ ۴(۱۵): ۹۷-۱۰۳.

[۲] کامران‌زاد بهاره، اعتماد شهیدی امیر. مقایسه مدل SWAN و شبکه عصبی مصنوعی در پس‌بینی ارتفاع موج در خلیج فارس. مجموعه مقالات نهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی؛ ۱۳۸۹ آذر ۱۰-۸؛ تهران.

[3] Moeini MH, Etemad-Shahidi A, Chegini, V. Wave modeling and extreme value analysis off the northern coast of the Persian Gulf. Applied Ocean Research. 2010;32: 209-218.

[4] Moeini MH, Etemad-Shahidi A. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. Applied Ocean Research. 2007 Jul 1;29(3):137-45.

[5] Rogers WE, Kaihatu JM, Hsu YL, Jensen R, Dykes JD, Holland T. Forecasting and hindcasting with the SWAN model in the Southern California Bight. Coastal Engineering. 2007;54(1):1-15.

[6] Browne M, Castelle B, Strauss D, Tomlinson R, Blumenstein M, Lane C. Near-shore swell estimation from a global wind-wave model: Spectral process, linear, and artificial neural network models. Coastal Engineering. 2007 May 1;54(5):445-60.

[۷] زمانی احمدرضا، عظیمیان احمدرضا. پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مجموعه مقالات نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها؛ ۱۳۸۳ اسفند؛ شیراز، دانشگاه شیراز.

[8] Thirumalaiah K, Deo MC. River stage forecasting using artificial neural networks. Journal of Hydrologic Engineering. 1998 Jan;3(1):26-32.

[9] Mahjoobi J, Etemad-Shahidi A, Kazeminezhad MH. Hindcasting of wave parameters using different soft computing methods. Applied Ocean Research. 2008 Feb 1;30(1):28-36.

پیش‌بینی با روش‌های عددی زمان‌بر بوده و نیاز به صرف هزینه زیاد دارد، روش شبکه عصبی مصنوعی که توانایی تشخیص الگو بین متغیرهای ورودی و خروجی را دارد و به‌عنوان روشی سریع و با سهولت در اجرا معرفی می‌شود [۳۰] برای تولید باد محلی بوشهر به کار برده شده است. از این طریق، بر اساس آموزش شبکه عصبی پیشرو سه لایه MLP از نحوه تغییرات باد GFS نسبت به باد ایستگاهی رابطه بین آن‌ها تبیین شده و با تأمین ورودی شبکه از باد ساعات آتی GFS، باد محلی پیش‌بینی و در مدل عددی امواج استفاده شد. با طراحی سناریوهای مختلف از شبکه عصبی با تعداد نرون‌های ورودی متفاوت از پایگاه GFS که در بازه‌های زمانی مختلف در نظر گرفته شده‌اند، چنین به دست آمد که شبکه عصبی‌ای که به پیش‌بینی باد در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر اختصاص دارد، باد تولیدشده انطباق بیشتری با باد واقعی داشته که این نتیجه در مطالعات [۷، ۱۵] نیز به دست آمده است. باد پیش‌بینی‌شده با روش گفته‌شده به‌عنوان مولد موج به مدل عددی PMODynamicsI اعمال و پیش‌بینی امواج در بوشهر صورت گرفته است. این روش به‌عنوان روشی تلفیقی از مدل عددی و شبکه عصبی، با تأمین ورودی مدل عددی از شبکه عصبی دقت شبیه‌سازی امواج را در بوشهر افزایش داده است. به‌طوری‌که نتایج موج شبیه‌سازی‌شده با روش تلفیقی نسبت به مدل عددی PMODynamicsI افزایش دقت ۱۵ و ۲۵ درصدی به ترتیب برای ارتفاع و جهت موج را در پی داشته است. به‌عبارت‌دیگر در مدل تلفیقی ضریب همبستگی ارتفاع موج نسبت به اندازه‌گیری‌ها به حدود ۸۵٪ رسیده و درصد فراوانی زمان‌هایی که اختلاف جهت موج اندازه‌گیری شده با مقدار متناظر مدل‌سازی شده کمتر از بیست درجه باشد، از ۴۰٪ در مدل عددی به ۶۰٪ در مدل تلفیقی افزایش یافته که کارآمدی این رویکرد در افزایش دقت نتایج مدل تلفیقی نسبت به مدل عددی را نشان می‌دهد. مشابه این نتیجه در مطالعه [۳۱] نیز به دست آمد که نشان داد، استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب آن با مدل عددی سوان، به پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار غیرخطی امواج می‌انجامد. همچنین مقایسه موج حاصل از اجرای مدل عددی و یوواج ۳ و روش

- [20] Khairunniza-Bejo S, Mustaffha S, Ismail WI. Application of artificial neural network in predicting crop yield: A review. *Journal of Food Science and Engineering*. 2014 Jan 1;4(1):1.
- [21] بیرانوند شاهین، صحرائیان کیانا. انواع شبکه عصبی و کاربرد آن‌ها. مجموعه مقالات سومین همایش بین‌المللی پژوهش‌های مدیریت و علوم انسانی؛ ۱۳۹۷ تیر ۱۴؛ تهران.
- [22] منهای محمدباقر. مبانی شبکه عصبی (هوش محاسباتی). مرکز نشر دانشگاه امیرکبیر؛ ۱۳۸۴. ۷۱۲ صفحه.
- [23] Mike 21 SW [computer program]. *Spectral Wave FM model, User Guide*. DHI;2014.
- [24] Agrawal JC, Deo Mc. *Online Wave prediction*. Maine Structures. Elsevier: Oxford: 2004. P. 28.
- [25] Qnet Users Guides. Winnetka, IL. Vesta Services, Inc; 1999.
- [26] Wilamowski B, Iplikci M, Kaynak S, Efe O. An algorithm for fast convergence in training neural networks. *Proceedings of international joint conference on neural networks*; 2001 July 15-19; Washington DC, USA.
- [27] Army Coastal Engineering Research Center. *Shore protection manual*. 6th ed. Fort Belvoir: Coastal Engineering Research Center (U.S.); 1973.
- [28] غفارپورجهرمی سعید، شرف‌الدین محمد. استفاده از نتایج آزمون دینامیکی PDA در تعیین باربری شمع تکی در سازه‌های دریایی به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی. نشریه مهندسی دریا. ۱۳۹۹؛ ۱۶(۳۱):۱۳۱-۱۳۸.
- [29] تهورعلیرضا، حیدری شاهین، زرین‌چنگ پویا. مدل‌سازی سامانه کنترل ارتفاع با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. نشریه ماشین‌های کشاورزی. ۱۳۹۵؛ ۶(۲):۳۵۰-۳۶۱.
- [30] Borhani Daryan AR, Fatehi Marj A. Application of artificial neuron network in estimation of river flow using climatic indices in Nazolchai Watershed. *Economical Research Journal*. 2008. 12:50-63.
- [31] Mandal S, Prabakaran N. Ocean Wave Prediction Using Numerical and Neural Network Models. *The Open Ocean Engineering Journal*. 2010; 3: 12-17.
- [10] Mase H, Sakamoto M, Sakai T. Neural network for stability analysis of rubble-mound breakwaters. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. 1995 Nov;121(6):294-9.
- [11] Tsai CP, Lee TL. Back-propagation neural network in tidal-level forecasting. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1999 Jul;125(4):195-202.
- [12] Makarynskyy O, Makarynska D, Kuhn M, Featherstone WE. Predicting sea level variations with artificial neural networks at Hillarys Boat Harbour, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2004 Oct 1;61(2):351-60.
- [13] Babovic V. Subsymbolic process description and forecasting using neural networks. In: Garcia-Navarro P, Playan E, editors. *Proceedings of the international workshop; Numerical modelling of hydrodynamic systems*. Saragossa, Spain: University of Saragossa; 1999. p. 57-79.
- [14] Makarynskyy O, Pires-Silva AA, Makarynska D, Ventura-Soares C. Artificial neural networks in wave predictions at the west coast of Portugal. *Computers & geosciences*. 2005 May 1;31(4):415-24.
- [۱۵] طالقانی محمد، امیر تیموری علیرضا. پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از شبکه مصنوعی عصبی. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن (ریاضیات کاربردی). ۱۳۸۷؛ ۵(۱۸): ۴۷-۳۹.
- [۱۶] قانع حمیدرضا، پیش‌بینی ارتفاع موج در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مجموعه مقالات پنجمین همایش بین‌المللی صنایع فراساحل؛ ۱۳۹۱؛ تهران.
- [۱۷] کامران‌زاد بهاره، اعتماد شهیدی امیر. پیش‌بینی مشخصات امواج در بندر بوشهر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران؛ ۱۳۸۸ آذر ۲۴؛ تهران.
- [18] Malekmohamadi I, Ghiassi R, Yazdanpanah MJ. Wave hindcasting by coupling numerical model and artificial neural networks. *Ocean Engineering*. 2008; 35:417-425 .
- [۱۹] عزیزی حمیدرضا، منتظری مجید. پیش‌بینی دمای ماهانه ایستگاه‌های همدید منتخب استان اصفهان، با استفاده از شبکه مصنوعی عصبی پرسپترون چندلایه. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۱۳۹۴؛ ۳۰(۳): ۲۴۱-۲۵۸.

پی‌نوشت‌ها

1. Under Keel Clearance
2. Hydrography
3. Heave
4. pitching
5. Rolling
6. SWAN
7. MIKE21
8. WAVEWATCHIII
9. Artificial Neural Networks (ANN)
10. Feed Forward Neural Networks
11. Correlation Coefficient
12. Root Mean Square Error
13. Training Set
14. Superior
15. Neuron
16. Hidden Layer
17. Synoptic
- 18 Multi-Layer Perceptron (MLP)
19. Recurrent Networks
20. Global Forecast System
21. European Center for Medium-Range Weather Forecasts
22. Google Earth
23. Unstructured Mesh
24. Guide Line
25. Guide Point
26. Global Climate Models (GCMs)