

کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی نتایج پیش‌بینی مدل دینامیک امواج دریا

فرشته کمیجانی^{۱*}، مسعود منتظری‌نمین^۲، اصغر بهلولی^۳

۱- دکتری فیزیک دریا، شرکت نوآندیشان محیط‌های رودخانه و دریا، پست الکترونیکی: [feshhtekomijani@gmail.com](mailto:freshhtekomijani@gmail.com)

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، پست الکترونیکی: mnamin@ut.ac.ir

۳- استادیار مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، پست الکترونیکی: bohluhy@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۲۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۸/۵/۹

چکیده

در این تحقیق، تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌های امواج مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا مدل هیدرودینامیکی PMODynamicsI برای مدل‌سازی موج بوشهر اجرا گردید که پس از واسنجی و اعمال تنظیمات بهینه، چنین حاصل گردید که مدل عددی در شبیه‌سازی امواج با ارتفاع کمتر از یک متر دقت بالایی دارد (همبستگی ۷۰ درصد) ولی در مواقع رخداد امواج توفانی سمت شرق و جنوب‌شرقی، به دلیل کمتر بودن مقدار سرعت باد مولد (GFS) نسبت به واقعیت، ارتفاع موج تا ۷۵ سانتی‌متر دست‌پایین برآورد شده است. به منظور تدقیق شبیه‌سازی‌ها، یک سیستم شبکه عصبی مصنوعی بر پایه معماری MLP سه لایه طراحی گردید که با لحاظ نمودن ارتفاع موج مدل‌سازی‌شده و باد به عنوان ورودی‌های آن، به پیش‌بینی خطای ارتفاع موج پرداخته شده است. ترکیب نتایج شبکه عصبی مصنوعی با نتایج حاصل از مدل عددی، به عنوان مدل ترکیبی، حاکی از افزایش ۹۰ درصدی دقت و کاهش جذر میانگین مربع خطا از ۰/۳۱ در مدل عددی تنها به ۰/۲۲ در مدل ترکیبی بوده به طوری که در حدی‌ترین شرایط، ارتفاع موج حاصل از مدل ترکیبی تا ۶۰ سانتی‌متر به واقعیت نزدیک‌تر شده که نشان‌دهنده عملکرد صحیح شبکه عصبی مصنوعی در بهبود پیش‌بینی‌های موج است.

کلمات کلیدی: مدل PMODynamicsI، شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های ترکیبی، شبیه‌سازی امواج، بوشهر.

۱. مقدمه

سازه‌های دریایی (محمد پاخیره‌زن و همکاران، ۱۳۹۷) در صورت اقدام به‌هنگام برای تعطیلی موقت بنادر^۱ دارد. به دلایل مختلف مانند ماهیت پیچیده امواج غیرخطی، پیش‌بینی‌های عددی با خطا همراه است که در بحث‌های راهبردی نیاز است مقدار آن کمینه گردد. پیشرفت تکنولوژی، روش‌های نوینی مانند شبکه عصبی مصنوعی^۲ را توسعه داده (دستورانی، ۱۳۸۵) که به علت

یکی از فاکتورهای مهم در بحث مدیریت و تأمین امنیت دریانوردی در محدوده بتادر، شرایط امواج منطقه است. لذا پیش‌بینی صحیح موج و به خصوص امواج مرتفع به وسیله مدل‌های عددی (Warner et al., 2010؛ حسنی، ۱۳۹۵) نقش مهمی در به حداقل رساندن خسارات وارده بر کشتی‌ها و

¹ Port Close

² Artificial Neural Network (ANN)

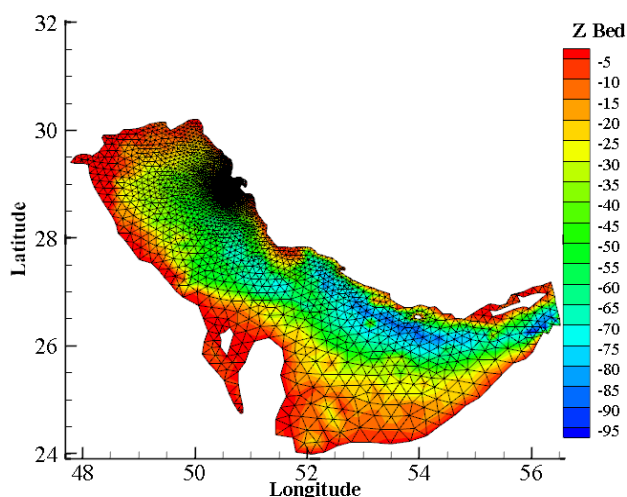
گردید و پیش از به‌کارگیری داده‌ها، اعداد پرت آنها حذف و جهت ایجاد پیوستگی، گپ‌هایی موجود در یک یا دو گام زمانی از طریق درون‌یابی جایگزین شده‌اند.



شکل ۱: نمایش محدوده‌ی محاسباتی در خلیج فارس (نقاط با رنگ قرمز) به همراه موقعیت بویه موج‌نگار بوشهر (نقاط با رنگ زرد)

۲-۲ اجرای مدل عددی PMODynamicsI

با کمک زیربرنامه‌های مدل PMODynamicsI، شبکه محاسباتی به صورت بدون‌ساختار مثلثی تهیه (شکل ۲) و تحلیل‌های لازم برای بهینه نمودن زاویه گوشه مثلث‌ها و اندازه سطح مقطع المان‌ها صورت گرفته است.



شکل ۲: شبکه محاسباتی نهایی خلیج فارس که مقادیر عمق‌ها با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است

پس از ساخت شبکه محاسباتی مربوط به میدان باد GFS، حساسیت‌سنجی مدل نسبت به مواردی همچون: ابعاد المان‌ها،

توانمندی در مدل‌سازی مسائل غیرخطی در عرصه‌های گوناگون مانند بررسی مسائل هیدرودینامیک آب‌ها و مهندسی دریا به عنوان روش تکمیلی برای بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شوند.

۲. روش کار

حوضه مورد مطالعه، گستره‌ی غرب خلیج فارس تا تنگه هرمز با تمرکز بر آب‌های بوشهر است. ابتدا شبیه‌سازی عددی امواج با کمک مدل موج طیفی PMODynamicsI^۱ انجام شده و خطاهای شبیه‌سازی شناسایی شده است. بر اساس روش شبکه عصبی مصنوعی و بر اساس ارتباط مستقیم بین باد و موج، به پردازش انبوه اطلاعات غیرخطی میان موج و باد GFS^۲ پرداخته شده و با طراحی سناریوهای مختلف تلاش گردید تا مقدار عددی متناظر با این خطا محاسبه گردد. طی مرحله آموزش شبکه عصبی، فرایند حل مسئله بارها صورت گرفته تا از این طریق رابطه نهفته‌ی بین داده‌های موج و باد به دقت یافت شود (Tokar et al., ۱۹۹۹) و شبکه اطلاعات مفیدی از پدیده را کسب نماید تا به جواب‌های قابل قبول‌تر و دقیق‌تری دست یابد. با تلفیق نتایج به دست آمده از شبکه عصبی به نتایج مدل عددی، رویکرد استفاده از مدل ترکیبی برای پیش‌بینی امواج به کار برده شده است.

۲-۱ تهیه داده‌ها

برای راه‌اندازی مدل PMODynamicsI هیدروگرافی به‌روز و دقیق خلیج فارس برای سال ۱۳۹۶ از سازمان بنادر و دریانوردی دریافت گردید و موقعیت مکانی خط ساحل (نقاط قرمز در شکل) با کمک تصاویر هوایی تعیین شده است. اندازه‌گیری موج طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۵ در ایستگاه موج‌نگار در مختصات (N ۲۸/۸۵۳۷ و E ۵۰/۷۲۸۲) و عمق ۲۶ متر به منظور واسنجی نتایج صورت گرفته است.

به علت اهمیت تأثیر باد بر موج (Ardhuin et al., ۲۰۰۷)، میدان سرعت باد قابل پیش‌بینی GFS به صورت دو بُعدی با دقت مکانی-زمانی نیم‌درجه-شش‌ساعته تهیه

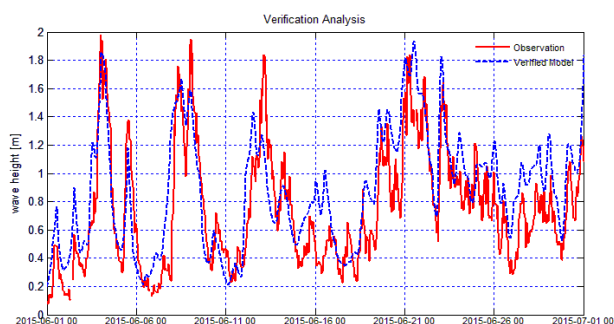
^۱ Persian Model for Ocean Dynamics (Version 1)

^۲ Global Forecast System

جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مقایسه سری زمانی ارتفاع موج حاصل از شبیه‌سازی دوره صحت‌سنجی و اندازه‌گیری در شکل نمایش داده شده است.

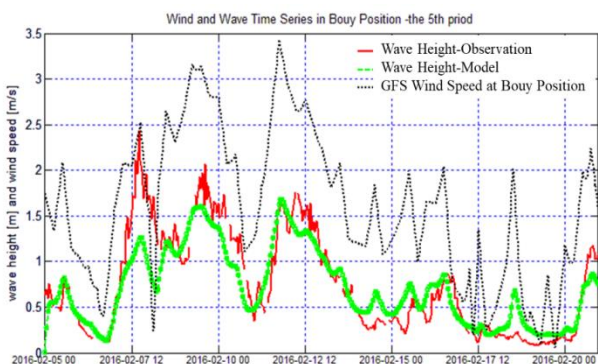
جدول ۱: مقادیر آماری مربوط به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده موج طی دوره صحت‌سنجی

پارامتر	ضریب همبستگی (درصد)	جذر متوسط مربع خطا	ضریب پراکندگی	اریبی
ارتفاع موج	۷۳	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۱۳
جهت موج	۷۶	۲۵/۲۷	۰/۰۷۳	۱۴/۷۱

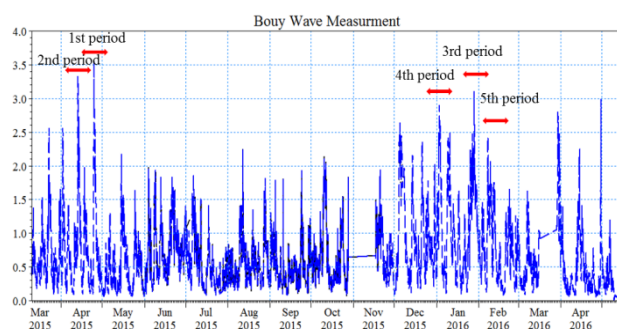


شکل ۴: مقایسه نتایج ارتفاع موج حاصل از اندازه‌گیری توسط بویه موج‌نگار و مدل عددی PMODynamicsI صحت‌سنجی شده

بر اساس جدول ۱ و شکل نتایج مدل عددی به خصوص در زمان‌هایی که موج اندازه‌گیری در ارتفاعی کمتر از ۱ متر قرار دارد در همبستگی مناسبی با مدل‌سازی‌ها قرار دارند. اما بررسی‌های جامع‌تر نشان داد که مدل عددی در زمان‌های وقوع امواج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر که از سوی شرق تا جنوب‌شرقی به منطقه وارد می‌شوند، مقادیر دست‌پایینی پیش‌بینی نموده است (مراجعه شود به شکل و شکل). از آنجا که این امواج به علت دارا بودن ارتفاع بالا از اهمیت ویژه برخوردارند، تلاش شده با کمک روش ANN خطای شبیه‌سازی آنها کمینه گردد.



گام زمانی محاسبات، شرایط مرزی، بخش‌بندی طیف انرژی موج، ضرایب شکست و زبری بستر ارزیابی گردید. نهایی شدن شبکه با المان‌هایی به ابعاد ۲ تا ۸/۳ کیلومتر به ترتیب برای اطراف بوشهر و سایر مناطق، تعیین گام زمانی محاسباتی ۱۰ دقیقه‌ای و شرایط مرزی از نوع بسته برای تنگه هرمز از سنجش حساسیت مدل عددی به دست آمده است. به طور مثال مدل با گام زمانی از ۲ تا ۲۰ دقیقه اجرا شد که پس از ۱۰ دقیقه حساسیتی به گام زمانی نشان نداد. واسنجی مدل طی دوره‌های زمانی ۷ تا ۱۵ روزه به عنوان نماینده فصول مختلف صورت گرفته است (شکل). در این دوره‌ها امواج توفانی و آرام با ارتفاع‌ها و جهات مختلف به منطقه وارد شده تا از این طریق تمام شرایط محیطی در مدل‌سازی‌ها وارد گردد.



شکل ۳: ارتفاع موج اندازه‌گیری‌شده توسط بویه موج‌نگار به همراه نمایش دوره‌های زمانی برای انجام واسنجی مدل

بر اساس مقایسه نتایج واسنجی مدل با موج اندازه‌گیری‌شده، تنظیمات نهایی مدل عددی به صورت زیر به دست آمد:

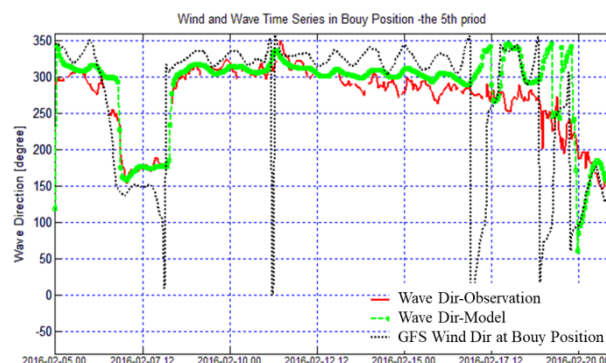
- عدم نیاز به در نظر گرفتن شکست موج، به کارگیری میدان باد دوبعدی GFS به صورت متغیر در زمان و مکان
- در نظر گرفتن رابطه زبری با فرمولاسیون Collins و ضریب ۰/۰۱۵، اعمال شرایط اولیه از طریق طیف Zero
- در نظر گرفتن همزمان برهمکنش سه‌گانه و چهارگانه امواج، در نظر گرفتن سفیدک رأس موج با ضرایب $\Delta=0/8$ و $Cd=2$
- انتقال انرژی موج با روش‌های مرتبه اول، مرتبه دوم و مرتبه سوم به ترتیب در فضای جغرافیایی، فرکانسی و جهتی

با در نظر گرفتن این تنظیمات، مدل برای دوره زمانی دلخواه (جدا از دوره‌های واسنجی نشان داده شده در شکل ۳) به عنوان دوره صحت‌سنجی اجرا و نتایج آماری مربوط به این دوره در

ذکر است که، به دلیل وجود تأخیر زمانی بین باد و موج تولید شده، این شاخص‌ها برای باد و موج با تأخیرهای زمانی ۰، ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت نیز محاسبه شده‌اند.

تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش اختلاف زمانی از ۰ به ۱۸ ساعت، به علت کاهش همبستگی‌ها (مقایسه نمودار الف و ب شکل ۷) در نظر گرفتن باد با تأخیرهای زمانی بالاتر، به عنوان ورودی شبکه مناسب نبوده و همچنین به علت بیشتر بودن ۵۰ درصدی شاخص AMI و همبستگی مولفه V نسبت به U باد (مقایسه نمودار الف و ب شکل ۸)، به کارگیری آن در طراحی شبکه به نتایج دقیق‌تری خواهد رسید.

شکل ۵: سری زمانی ارتفاع موج اندازه‌گیری‌شده و مدل عددی PMODynamicsI به همراه مقدار سرعت باد GFS

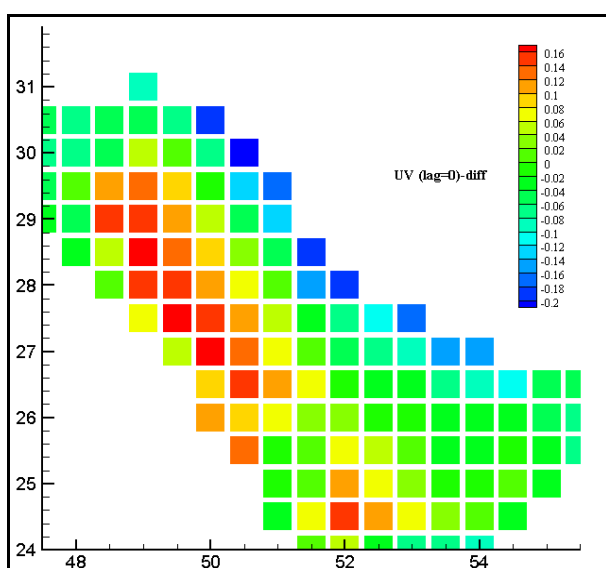


شکل ۶: سری زمانی جهت موج اندازه‌گیری و مدل عددی PMODynamicsI به همراه جهت باد GFS

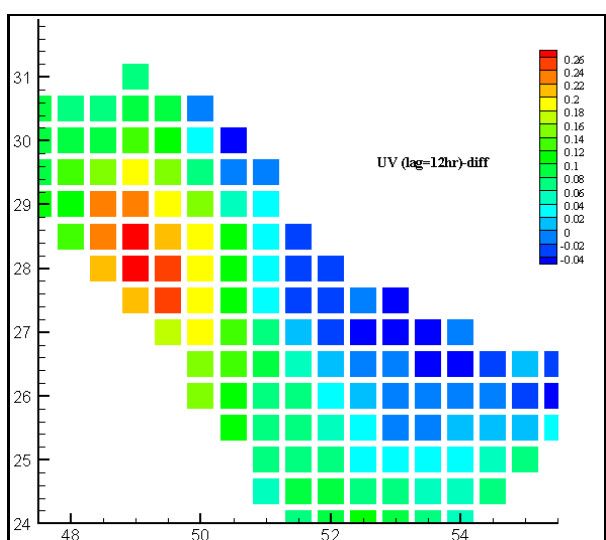
۳-۲ ساختار شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه شبکه عصبی پیش‌خور^۱ سه لایه‌ای با الگوی MLP بر اساس قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی پدیده‌های غیرخطی (دستورانی، ۱۳۸۹) استفاده گردید که صحت عملکرد این روش در پیش‌بینی امواج دریایی خزر (طالقانی و امیرتیموری، ۱۳۸۷)، بندر انزلی (قانع، ۱۳۹۱) و بندر بوشهر (کامران‌زاد و اعتماد شهیدی، ۱۳۸۸) از طریق انطباق خوب شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری از پیش مشخص شده است.

در تحقیقاتی با هدف پیش‌بینی امواج از طریق روش ANN، به علت تأثیر مستقیم باد بر شکل‌گیری امواج، داده سرعت باد در نرون‌های لایه ورودی و ارتفاع موج در لایه خروجی لحاظ شده است (کامران‌زاد و اعتماد شهیدی، ۱۳۸۹ و ۱۳۸۸). در این مطالعه که ترکیب روش‌های عددی و ANN جهت بهینه‌سازی پیش‌بینی امواج مورد استفاده قرار گرفته، علاوه بر داده‌های سرعت باد، امکان تأمین داده نرون‌های شبکه از میان ارتفاع موج اندازه‌گیری (X_{Obs}) ، ارتفاع موج شبیه‌سازی با مدل عددی PMODynamicsI (X_{Model}) و خطای ارتفاع موج $(E_{P1} = X_{Obs} - X_{Model})$ بررسی شده است. این امر از طریق محاسبه شاخص میانگین اطلاعات متقابل^۲ و همبستگی بین پارامترها با کمک نرم‌افزار Tecplot و همچنین طراحی سناریوهای مختلف صورت گرفته است. قابل



(الف)



(ب)

¹ Feed Forward Neural Net

² Average Mutual Information (AMI). <https://rdrr.io/cran/nolinearTseries/man/mutualInformation.html>

سناریوی اول، داده مولفه V سرعت باد در ۶ مختصات مکانی (شامل ۲۹,۰°N و ۵۰,۰°E)، (۲۹,۰°N و ۴۸,۵°E)، (۲۹,۰°N و ۲۸,۵°E و ۴۹,۵°E)، (۲۹,۰°N و ۴۷,۵°E)، (۲۹,۰°N و ۵۰,۵°E) و (۲۷,۵°N و ۴۹,۰°E)) به عنوان نرون‌های لایه ورودی لحاظ شده و تعداد نرون لایه میانی با استفاده از روش سعی و خطا انتخاب شده است.

جدول ۲: ساختار سناریوهای مختلف طراحی شده برای دستیابی به سناریو بهینه شبکه عصبی مصنوعی

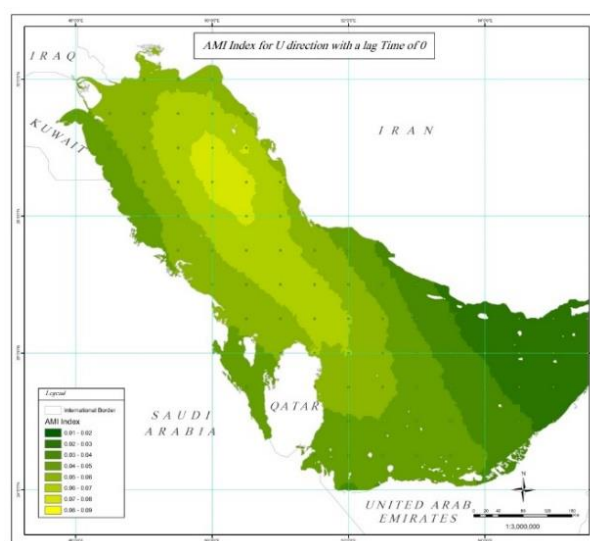
پیش‌بینی شونده هر شبکه	تعداد نرون لایه میانی	نوع نرون‌های لایه ورودی			سناریو
		باد GFS		ارتفاع موج مدل PMODynamicsI	
		تعداد مولفه U	تعداد مولفه V		
خطای مدل عددی PMODynamicsI	۱۶	۰	۶	×	سناریو ۱
خطای مدل عددی PMODynamicsI	۱۸	۲	۵	✓	سناریو ۲
ارتفاع موج اندازه‌گیری شده	۱۴	۲	۴	×	سناریو ۳
ارتفاع موج اندازه‌گیری شده	۱۴	۲	۴	✓	سناریو ۴

در مرحله آموزش هر سناریو، مقادیر ورودی توسط نرون لایه آغازین دریافت و پردازش می‌شوند تا خروجی آن لایه (out) را تولید نمایند که از ترکیب آن با وزن نرون‌های دو لایه متوالی (w_{ji})، ورودی خام raw_{ji} به دست آمده (رابطه ۱) (Wu, ۱۹۹۴); (Kosko, ۱۹۹۲). ورودی موثر که از ترکیب raw_{ji} شکل گرفته (رابطه ۲) در تابع انتقال سیگموئید (رابطه ۳) قرار داده شده تا مقدار نرون‌های لایه بعدی تولید گردد. این فرایند بارها تکرار شده تا با بهینه‌سازی وزن‌ها، شبکه به درستی الگوی موجود بین داده‌های را دریافت و اختلاف خروجی شبکه و بردار هدف کمینه گردد (رابطه ۴، Wasserman, ۱۹۹۳). محاسبات نهایی در نرون‌های لایه خروجی، پاسخ شبکه عصبی به محیط محسوب می‌شود. این مرحله بر اساس به کارگیری ۷۰ درصد از مجموع داده‌ها صورت گرفته و با ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها، ارزیابی صحت عملکرد شبکه‌ی هر سناریو، صورت گرفته تا از این طریق استقلال داده‌های آموزش از ارزیابی جهت رعایت شیوه عملکرد صحیح شبکه انجام گیرد.

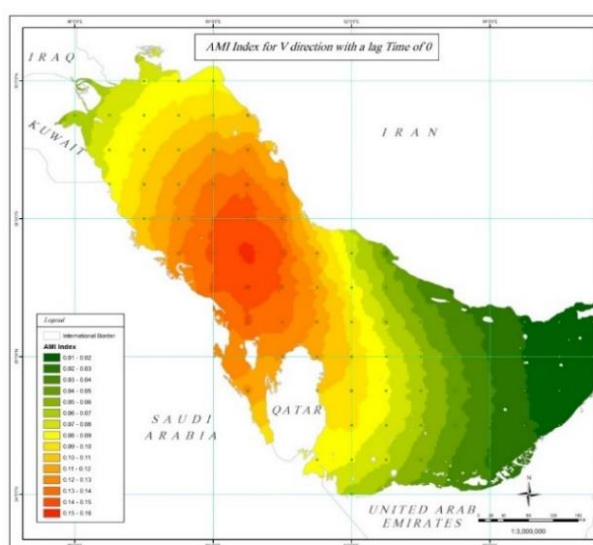
$$raw_{ji} = out_i w_{ji} \quad (1)$$

$$net_j = \sum_{i=1}^m raw_{ji} \quad (2)$$

شکل ۷: نقشه پراکنش همبستگی بین خطای ارتفاع موج مدل و اندازه سرعت باد GFS (الف) همزمان با موج و (ب) ۱۲ ساعت قبل از رخداد موج



(الف)

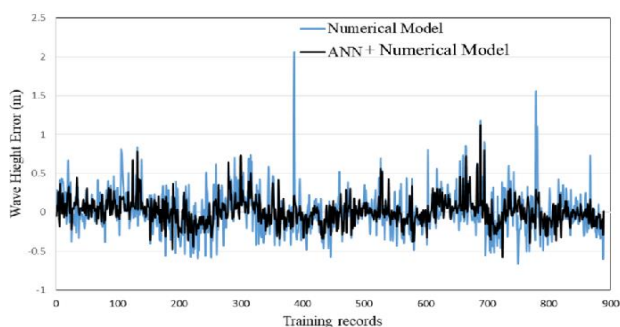


(ب)

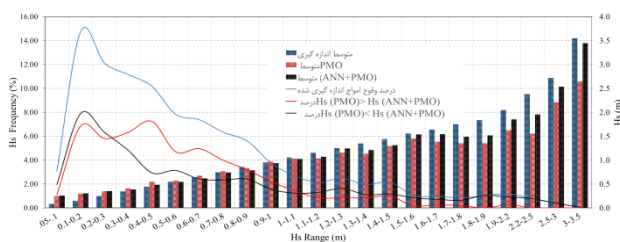
شکل ۸: پراکنش AMI بین ارتفاع موج اندازه‌گیری و مولفه U (الف) و V (ب) باد GFS (الف) همزمان با موج

همان طور که بیان گردید، به منظور تعیین بهترین معماری برای شبکه عصبی با داده‌های مناسب برای نرون‌های ورودی و خروجی، ۴ سناریو مختلف (با مشخصات بیان شده در جدول ۲) طراحی گردید که معیار مناسب‌ترین شبکه در کاهش میانگین مربع خطا و کاهش خطای پیش‌بینی قرار داده شده است. در ارتباط با جدول ۲ لازم به توضیح است که به طور مثال در

پرداخته شده است. شکل نشان داد که برای ارتفاع موج بین ۰/۱ تا ۰/۳ متر، نتایج مدل ترکیبی تقریباً برابر مدل عددی و در بیشینه حالت تا ۲۰ سانتی‌متر بیشتر از اندازه‌گیری است. برای ارتفاع موج ۰/۵ تا ۱ متر، مدل ترکیبی نسبت به مدل عددی، نتایج نزدیک‌تر به واقعیت ارائه نموده و با افزایش ارتفاع از ۱/۱ تا ۳/۵ متر، در حالی که اختلاف نتایج مدل عددی PMODynamicsI با اندازه‌گیری به تدریج افزایش و به ۷۵ سانتی‌متر رسیده، مدل ترکیبی تخمین دقیق‌تری از ارتفاع موج داشته است. شباهت روند درصد وقوع موج اندازه‌گیری با مدل ترکیبی در شکل ۱۰ نیز گواهی بر عملکرد مناسب‌تر آن نسبت به مدل عددی تنها است. بررسی مقدار خطای مدل‌ها در شکل ۱۱ نیز نشان داد که حداکثر فراوانی خطای مدل ترکیبی در بازه کمتر از ۰/۱ متر قرار دارد در حالی که برای مدل عددی تنها خطای ارتفاع با مقدار ۰/۴۵ متر بیشترین فراوانی را دارد که نشان دهنده افزایش دقت پیش‌بینی‌ها در مدل ترکیبی است که این مسئله در شکل ۱۲ به خصوص برای موج با ارتفاع بیش از ۱/۵ متر مشهود است.



شکل ۹: مقایسه میزان خطای E_p مدل عددی PMODynamicsI (نمودار آبی) و مدل ترکیبی ANN + PMODynamicsI (نمودار مشکی)



شکل ۱۰: مقایسه درصد فراوانی موج اندازه‌گیری‌شده، مدل PMODynamicsI و مدل ترکیبی ANN + PMODynamicsI

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۳ نیز، دقت مدل ترکیبی نسبت به مدل عددی تنها از ۷۳ به ۹۰ درصد و جذر میانگین مربع خطا از ۰/۳۱ به ۰/۲۲ کاهش یافته که نشان دهنده

$$out_j = \frac{1}{1 + \exp(-net_j)} \quad (۳)$$

$$Er(q) = \sum_{k=1}^p [T_k(q) - out_k(q)]^2 \quad (۴)$$

در این روابط z شماره نرون گیرنده، i شماره نرون فرستنده، p تعداد نرون لایه خروجی، q شماره الگوی آموزشی و T تابع هدف هستند.

با تکمیل مراحل آموزش و ارزیابی سناریو یک، خطای پیش-بینی شده حاصل از شبکه، مستقیماً با ارتفاع موج حاصل از مدل عددی PMODynamicsI ترکیب شده که مقایسه آن با اندازه-گیری‌ها کاهش خطای ۱۵ درصدی نتایج این مدل ترکیبی نسبت به مدل عددی تنها را نشان داد. کاهش خطای مدل ترکیبی نسبت به مدل عددی برای هر یک از سناریوهای دو، سه و چهار به ترتیب، ۲۳٪، ۱۱٪ و ۱۳٪ بوده که گویای عملکرد مناسب‌تر سناریو دو نسبت به سایر سناریوها است.

۳. نتایج و بحث (ترکیب مدل‌های PMODynamics و ANN)

با انتخاب رویکرد مشابه سناریو دو، شبکه‌های مختلفی با مولفه‌های متعدد باد GFS در نقاط مختلف خلیج فارس طراحی گردید و آموزش و ارزیابی هر یک صورت گرفت تا مناسب‌ترین طراحی برای شبکه نهایی تعیین گردد. آموزش‌های مختلف، شبکه‌ای متشکل از ۶ مولفه سرعت باد GFS واقع در طول جغرافیایی بین ۴۸ تا ۵۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰/۵ درجه شمالی همراه با موج مدل‌شده‌ی عددی را به بهترین معماری شبکه منجر نمود که بر اساس آن خطای ارتفاع موج پیش‌بینی شده است. تلفیق نتایج به دست آمده از شبکه عصبی با مدل PMODynamicsI به عنوان مدل ترکیبی به کاهش خطای پیش‌بینی موج مدل ترکیبی نسبت به مدل عددی تنها و به عبارت دیگر بهبود پیش‌بینی امواج در مدل ترکیبی منجر گردید (شکل ۹). تحقیقات دهه اخیر نیز نشان داد که به کارگیری روش‌های ترکیبی حاصل از مدل عددی و شبکه عصبی سبب بهبود نتایج مدل‌هایی هیدرودینامیک و از جمله مدل جریان رودخانه‌ای شده است (Dastorani and Wright, ۲۰۰۴).

جهت بررسی بیشتر نتایج، به مقایسه دسته‌بندی‌های مختلف ارتفاع موج و روند فراوانی امواج اندازه‌گیری و حاصل از مدل‌ها

بهبود عملکرد ترکیب مدل‌ها در دستیابی به پیش‌بینی‌های قابل اطمینان‌تر امواج است.

جدول ۳: محاسبه مقادیر آماری بین ارتفاع موج اندازه‌گیری شده با نتایج مدل PMODynamicsI و مدل ترکیبی ANN+ PMODynamics

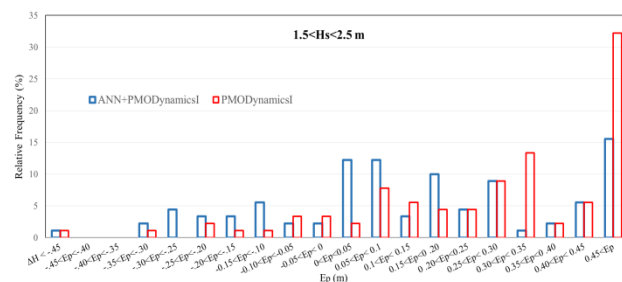
منبع داده‌ی ارتفاع موج	میانگین	بیشینه	کمینه	اریبی	پراکندگی	همبستگی	جزر میانگین مربع خطا
اندازه‌گیری	۰/۶۲۴	۳/۵۵	۰/۰۵۱	۰/۰۲۲	۰/۴۵	---	۰/۳۱
PMODynamicsI	۰/۶۴۶	۲/۶۵	۰/۰۸۱	۰/۰۲۱	۰/۳۶	۰/۷۳	۰/۲۲
ANN + PMODynamicsI	۰/۶۴۵	۳/۴۴	۰/۰۵۰	۰/۰۲۱	۰/۳۶	۰/۹۰	۰/۲۲

برای مناطق نزدیک‌تر به ساحل می‌شود. تخمین نادرست ارتفاع موج به خصوص برای امواج حدی و مرتفع (با ارتفاع بیش از ۲ متر) که در تأمین ایمنی و وارد نمودن خسارات به بنادر و ساز-هایی دریایی از اهمیت بالایی برخوردار است، تبعات منفی در پی دارد. لذا در این مقاله تلاش گردیده تا با به کارگیری تکنیک شبکه عصبی مصنوعی تصحیحات لازم برای افزایش دقت پیش-بینی امواج صورت پذیرد.

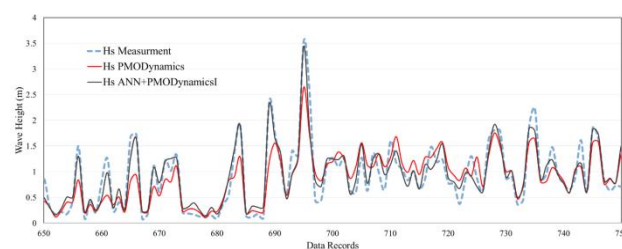
با طراحی مناسب برای معماری شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور MLP و ترکیب آن با نتایج مدل دینامیک موج خلیج فارس، مدل ترکیبی‌ای ساخته شده که علاوه بر حفظ توانمندی مدل عددی PMODynamicsI در تولید امواج با ارتفاع کمتر از ۱ متر، شبیه‌سازی‌های مربوط به امواج بلندتر را دقیق‌تر نموده است. به طوری که در بحرانی‌ترین زمان‌ها با وقوع موج اندازه‌گیری در ارتفاع حدود ۳/۵ متر، نتایج پیش‌بینی حاصل از مدل ترکیبی تا ۶۰ سانتیمتر بهتر از نتایج مدل عددی تنها بوده و روندی شبیه‌تر به اندازه‌گیری‌ها را نشان داده است. به کارگیری مدل ترکیبی، خطای پیش‌بینی عددی امواج با ارتفاع بلندتر از ۱/۵ متر را ۳۰ درصد کاهش داده و برای ارتفاع کمتر از آن، کاهش خطا تا ۲۰ درصد رسیده است. به عبارت دیگر مدل ترکیبی ساخته شده با شبکه عصبی بهبود نتایج پیش‌بینی امواج خلیج فارس را در پی داشته است. این مسئله در مطالعه صورت گرفته توسط Mandal و Prabakaran نیز به دست آمد که نشان دادند استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب آن با نتایج مدل‌های عددی امواج به پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار غیرخطی امواج می‌انجامد (۲۰۱۰). (Mandal and Prabahan,

منابع

پاخیره‌زن، م، راه بانی، م، ملکوتی، ح، ۱۳۹۷. ارزیابی الگوی امواج تحت تاثیر باد موسمی در شمال‌غرب خلیج فارس با استفاده از



شکل ۱۱: مقایسه درصد فراوانی و فراوانی تجمعی E_p مدل عددی تنها و مدل ترکیبی برای امواج اندازه‌گیری شده در ارتفاع $1/5 < H_s < 2/5$ متر



شکل ۱۲: مقایسه سری زمانی ارتفاع موج اندازه‌گیری شده، حاصل از مدل PMODynamicsI و مدل ترکیبی ANN+ PMODynamicsI

۴. نتیجه‌گیری

پیش‌بینی‌های دوبعدی میدان باد در پایگاه GFS منبعی ارزشمند برای شبیه‌سازی تولید امواج خلیج فارس است. با این وجود تخمین‌های دست پایین سرعت بادهای توفانی این پایگاه سبب گردیده که با وجود اعمال تنظیمات بهینه در مدل عددی امواج PMODynamicsI، ارتفاع امواج حدی شبیه‌سازی شده تا ۱ متر کمتر از مقادیر واقعی به دست آید. چراکه با توجه به زاویه خط ساحلی خلیج فارس، بادهای قوی GFS مربوط به جهات شرقی از سطح خشکی گسترده‌ای عبور می‌کنند تا به دریا برسند و از آنجا که مقدار زبری در خشکی نسبت به سطح دریا بیشتر است، سرعت باد برای سلول‌هایی تر نزدیک ساحل کمتر از حد واقعی تخمین زده شده که منجر به شبیه‌سازی دست‌پایین امواج

- Dastorani, M.T., Wright, N.G., 2004. A hydrodynamic/neural network approach for enhanced river flow prediction. *International Journal of Civil Engineering*, 2 (3):1735-0522.
<http://nomads.ncep.noaa.gov>
<https://rdr.io/cran/nolinearTseries/man/mutualInformation.html>
- Kosko, B., 1992. *Neural networks and fuzzy systems*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Mandal, S., Prabakaran, N., 2010. Ocean Wave Prediction Using Numerical and Neural Network Models. *The Open Ocean Engineering Journal*, 3: 12-17
- Rusu, L.; Bernardino, M.; Guedes Soares, C., 2014. Wind and wave modelling in the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 7(1): 5-20.
- Tokar, A. S., Johnson, P. A., 1999. Rainfall-runoff modeling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(3): 232-239.
- 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.
- Wu, J.K., 1994. *Neural networks and simulation methods*. New York: Marcel Dekker.
- Wasserman, P. D., 1993. *Advanced methods in neural computing*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA. 250p.
- شبیه‌سازی همزمان جو و موج. *مجله اقیانوس شناسی*، سال نهم، شماره ۳۶، صفحات ۱-۱۱.
- حسینی، ف.، ۱۳۹۵. مقایسه عملکرد مدل WAVEWATCH III و مدل PMODynamics در فضاها بزرگ مقیاس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران. ۱۰۰ صفحه.
- دستورانی، م.ت.، ۱۳۸۵. روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای (تحلیل توانایی‌ها و نقطه ضعف‌ها). هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. اهواز، دانشگاه شهید چمران. صفحات ۱-۱۰.
- قانع، ح.، ۱۳۹۱، پیش‌بینی ارتفاع موج در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پنجمین همایش بین‌المللی صنایع فراساحل. تهران، انجمن مهندسی دریایی ایران.
- طالقانی، م.، امیرتیموری، ع.، ۱۳۸۷. پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن (ریاضیات کاربردی)، سال پنجم، شماره ۱۸، صفحات ۳۹-۴۷.
- کامران‌زاد، ب.، اعتماد شهیدی، ا.، ۱۳۸۹. مقایسه مدل SWAN و شبکه عصبی مصنوعی در پس‌بینی ارتفاع موج در خلیج فارس، نهمین همایش بین‌المللی سواحل، بناد و سازه‌های دریایی، تهران، سازمان بنادر و دریانوردی.
- کامران‌زاد، ب.، اعتماد شهیدی، ا.، ۱۳۸۸. پیش‌یابی مشخصات امواج در بندر بوشهر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران.
- 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.