

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.1.3.1](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1401.8.1.3.1)

درصد همانندی: ۹٪

## پیش‌یابی ارتفاع امواج خلیج مکزیک با استفاده از شبکه عصبی و تبدیل موجک

همایون احمدوند<sup>۱</sup>، محمد اکبری نسب<sup>۲\*</sup>، ایمان اسمعیلی پابین افراکتی<sup>۳</sup>، محمدعلی نجارپور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر [homayoon.ahmadvand@kmsu.ac.ir](mailto:homayoon.ahmadvand@kmsu.ac.ir)

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده علوم دریایی و محیطی، دانشگاه مازندران، بابلسر [m.akbarinasab@umz.ac.ir](mailto:m.akbarinasab@umz.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه مازندران، بابلسر [i.esmaili.p@umz.ac.ir](mailto:i.esmaili.p@umz.ac.ir)

<sup>۴</sup> استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر [najarpour171@gmail.com](mailto:najarpour171@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

### چکیده

پیش‌بینی امواج دریا نظیر ارتفاع و دوره تناوب موج از ضروری‌ترین نیازهای اطلاعاتی مرتبط با محیط دریاست. در مقاله حاضر ارتفاع امواج خلیج مکزیک توسط تبدیل ویولت به زیرسطح‌های مختلف تقریب و جزئیات تجزیه شده و با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی ارتفاع امواج در ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده پیش‌بینی شده است. مقایسه داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده توسط بویه ۴۲۰۳۶ با نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی، نشان داد که موجک پایه کویفلت با تعداد ۵ زیر سطح و موجک پایه دمی با تعداد ۶، ۶ و ۷ زیر سطح برای پیش‌بینی ارتفاع امواج به ترتیب در ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده مناسب هستند. سپس پارامترهای هواشناسی فشار هوا، اختلاف دمای هوا و آب، جهت باد و سرعت باد نیز به عنوان ورودی مدل افزوده شدند. با این روش مشخص شد که پارامترهای جهت باد و اختلاف دمای هوا و آب تأثیری در افزایش دقت پیش‌بینی ندارند و با اضافه نمودن سرعت باد و فشار هوای ثبت شده کنونی دقت پیش‌بینی نسبت به حالتی که تنها از زیرسطح‌های تجزیه‌شده استفاده می‌شود افزایش می‌یابد. در انتها مقادیر پیش‌بینی شده ارتفاع موج توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان رخداد توفان‌های هرمین، کولین و متیو در سال ۲۰۱۶ ارزیابی شد و نتیجه نشان داد که در زمان رخداد توفان‌های هرمین و کولین دقت پیش‌بینی مدل کاهش قابل توجهی دارد. کلمات کلیدی: خلیج مکزیک، شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، توفان

## ۱. مقدمه

داشتن دانش امواج سطح اقیانوس ها در مطالعات مختلف دریایی اهمیت دارد. در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای در زمینه بررسی داده های سطح دریا و بررسی توفان های رخ داده شده در مناطق دریایی جنوب کشور صورت گرفته است که می توان به تحقیقات خلیل آبادی و همکاران اشاره نمود [۱] و [۲]. ارتفاع موج شاخص، که به عنوان میانگین یک سوم بزرگ ترین ارتفاع موج اقیانوس ثبت شده تعریف می شود، بارزترین و رایج ترین پارامتر مورداستفاده در بررسی های امواج اقیانوسی و ارزیابی انرژی موج است [۳]. برای پیش بینی ارتفاع موج شاخص ابتدا از روش های نیمه تجربی استفاده شده است که می توان به روش های سوردراپ-مانک-برتس اشنایدر و روش پیرسون-نویمان-جیمز اشاره نمود. باین حال این گونه روش ها نتوانسته اند شرایط موج سطح دریا را با جزئیات شرح دهند؛ بنابراین به روش های نیمه تجربی روی آورده شده است که در این زمینه می توان به مطالعه اعتماد شهیدی اشاره نمود که با استفاده از مدل های تجربی، پارامترهای موج دریاچه انتاریو را پیش بینی نموده است [۴]. همچنین آکپینار نیز با استفاده از روش های SPM، Wilson، JONSWAP و CEM پارامتر ارتفاع موج در دو نقطه دریای سیاه را پیش بینی کرده است [۵].

علاوه بر روش های نیمه تجربی، مدل های عددی پرکاربردترین روش برای پیش بینی موج محسوب می شوند. باین حال این مدل ها در محاسبات پیچیده با حجم زیاد داده ها، هزینه بر و به کامپیوترهای با کارایی بالا نیاز دارند [۶ و ۷].

به همین دلیل در چند دهه اخیر، تمایل زیادی به به کارگیری از روش های یادگیری ماشین شده است [۸-۱۲]. ولی با چشم پوشی از هزینه بر بودن مدل های عددی، این گونه مدل ها دقت بیشتری نسبت به روش های محاسبات نرم دارند [۱۳].

از جمله در تحقیق شانداثوف و همکاران با استفاده از شبکه

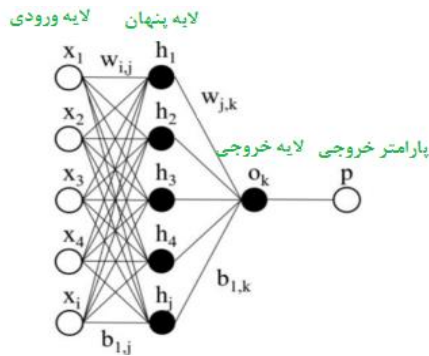
حافظه طولانی کوتاه مدت LSTM ارتفاع امواج ۱ و ۶ ساعت آینده، در ۱۰ ایستگاه مختلف آب های خارج از مکزیک پیش بینی شده است. نتایج این پیش بینی نشان داده است که مدل LSTM می تواند اثرات شرایط پایدار را پیش بینی نماید [۱۲]. هائودای و همکاران با استفاده از ماشین محدود بولتزمن مشروط - شبکه عمیق (CRBM-DBN) ارتفاع امواج خلیج مکزیک را پیش بینی کرده اند [۱۴]. نتایج این تحقیق نشان می دهد که برای پیش بینی ارتفاع امواج کوتاه مدت آینده کمتر از ۱۲ ساعت آینده شاخص خطای  $RMSE < 0.24$  و  $0.92 > CE$  نتیجه می شود و در پیش بینی زمان های ۲۴ یا ۴۸ ساعت آینده شاخص های خطا به صورت  $0.40 < RMSE < 0.18$  و  $0.93 < CE < 0.72$  در محدوده ۲۶ درجه عرض شمالی نتیجه می شود و به تدریج با افزایش عرض جغرافیایی به سمت شمال و کاهش عرض جغرافیایی به سمت جنوب این مقدار کاهش می یابد. لاندهی و همکاران با استفاده از مدل شبکه عصبی ارتفاع امواج در سواحل اقیانوس هند را پیش بینی کرده اند [۱۵]. پیش بینی برای ۲۴ ساعت آینده با مدل عددی انجام شده است و سپس برای تصحیح خطاها از شبکه عصبی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که به کارگیری این روش، بهبود چشمگیری در پیش بینی دارد. اسکات جیمز و همکاران با استفاده از الگوبرداری از روش های یادگیری ماشین به پیش بینی ارتفاع و پرورد موج در منطقه خلیج مونتری پرداخته اند. در آن مطالعه از دو روش مختلف برای پیش بینی موج استفاده شده است. در تحلیل ارتفاع موج از شبکه عصبی چند لایه با سه لایه پنهان استفاده شده است. برای طبقه بندی دوره تناوب موج نیز از ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. نتایج نشان داد است که مقادیر مورد هدف پیش بینی، با یادگیری ماشین تطابق زیادی دارد که ضریب اطمینان بالای مدل را نشان می دهد. همچنین مدل پرسپترون استفاده شده برای ارتفاع های بیشتر از ۶ متر نیز دقت زیادی از خود نشان

داده است [۱۶]. اخیراً با استفاده از ترکیب ویولت و روش‌های نرم ارتفاع موج پیش‌بینی شده است. پرادینا دکسیت و همکاران با استفاده از تکنیک ترکیب شبکه عصبی موجک و استفاده از ارتفاع موج شاخص در ایستگاه ۴۱۰۰۴ در نزدیکی ساحل شرقی ایالات متحده ارتفاع امواج ۶ ساعت، ۱۲ ساعت، ۱۸ ساعت و ۲۴ ساعت آینده را پیش‌بینی کرده‌اند [۱۷]. تحقیق در دو مرحله اعمال تبدیل موجک گسسته و سپس استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده است. در ابتدا سیگنال اولیه با استفاده از تبدیل موجک گسسته در مقیاس‌های مختلف تجزیه شده است. سپس شبکه عصبی با ضرایب موجک تقریبی و جزئی جدا شده آموزش داده شده است. خروجی‌های شبکه در داده‌های تست تبدیل موجکی معکوس بازسازی شده‌اند. مدل‌های توسعه یافته در پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص از ۶ تا ۲۴ ساعت به ترتیب دقت‌های  $rmse = 0.18$  و  $rmse = 0.61$  را نشان می‌دهند.

لاندهی و پرادینا با استفاده از تکنیک نورو ویولت به پیش‌بینی ارتفاع امواج در بویه‌های با شماره‌های ۴۲۰۴۰، ۴۲۰۳۹، ۴۱۰۰۴ و ۴۱۰۴۱ خلیج مکزیک در هنگام رخداد ۵ توفان بزرگ کاترینا (۲۰۰۵)، دین (۲۰۰۷)، گوستاو (۲۰۰۸)، آیک (۲۰۰۸)، آیرن (۲۰۱۱) پرداخته‌اند [۱۸]. در مدل‌سازی از تجزیه موجک به‌عنوان ورودی مدل شبکه عصبی استفاده نموده و سری زمانی ارتفاع موج در ۳، ۵ و ۷ سطح تجزیه شده و ارتفاع امواج ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت آینده پیش‌بینی شده است. آن‌ها نشان دادند که از تکنیک شبکه عصبی موجکی می‌توان برای حل مشکل پیش‌بینی دقیق رویدادهای شدید توفان استفاده کرد.

رجایی و شهابی با استفاده از مدل ترکیبی موجک-شبکه عصبی به پیش‌بینی کوتاه‌مدت تراز سطح دریا در بندر چابهار پرداخته‌اند [۱۹]. اطلاعات تراز سطح دریا که به‌صورت ساعتی برداشت شده به‌عنوان ورودی مدل بوده و مدل برای پیش‌بینی

۱۲ ساعت آینده استفاده شده است. این نوع مدل‌سازی نتایج بهتری را در پیش‌بینی تراز سطح دریا ارائه می‌دهد. آن‌ها در تحقیق نشان داده‌اند که ضریب E در سه حالت مدل ترکیبی موجک-شبکه عصبی، شبکه عصبی و رگرسیون خطی به ترتیب ۰/۹۸۹، ۰/۸۷۸ و ۰/۸۴۸ است. این مدل با استفاده از تبدیل موجک و تجزیه سری زمانی تراز سطح دریا به زیرسری‌هایی با اطلاعات مفید و با تغییرات فرکانسی مختلف، فرایند پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد. کیومرث محمودی و همکاران با استفاده از روش ترکیبی تبدیل موجک و ماشین بردار پشتیبان دو توفان دین (۲۰۰۷) و آیرن را بررسی کرده‌اند [۲۰]. در این روش ابتدا با استفاده از تبدیل موجک، امواج غیرعادی شناسایی شدند و به همراه داده‌های هواشناسی سه‌ساله جهت باد، سرعت باد، ارتفاع موج مشخصه، فشار هوا، دمای هوا و دمای سطح دریا برای آموزش و آزمون مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. این تحقیق نشان داد که روش ارائه‌شده دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی وقوع امواج غیرعادی دارد. در این تحقیق نیز هدف پیش‌بینی ارتفاع امواج خلیج مکزیک با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و موجک است. بدین گونه که پس از جمع‌آوری داده‌ها، سری زمانی ارتفاع امواج با استفاده از تبدیل موجکی به چندین زیر سطح تجزیه شده و با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، ارتفاع امواج ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده پیش‌بینی خواهد شد. در این مرحله مناسب‌ترین موجک پایه با تعداد زیر سطح مناسب انتخاب می‌شود. سپس پارامترهای هواشناسی سرعت باد، جهت باد، فشار هوا و اختلاف دمای هوا نیز به ورودی‌های شبکه اضافه شده و مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی ارتفاع امواج در ساعت‌های آینده انتخاب خواهد شد. در انتها مقادیر خطای پیش‌بینی مدل در زمان رخداد توفان‌های سال ۲۰۱۶ بررسی و مقایسه می‌شود.



شکل ۱. شبکه عصبی سه لایه با یک لایه پنهان [۲۲]

## ۲-۲. تبدیل موجک

موجک دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه سیگنال‌های پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن به کار می‌رود که رزولوشن هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است. موجک‌ها نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک پایه) با طول متناهی و نوسانی به شدت میرا هستند. تبدیل موجکی سیگنال به صورت همبستگی سیگنال و موجک تبدیل یافته توضیح داده می‌شود که این تعریف را از بطن فرمول ضرب موجکی می‌توان دریافت نمود. مزیت مهم تبدیل موجکی این است که اطلاعات زمان و فرکانس را به طور مؤثری از سیگنال متغیر در زمان استخراج می‌کند تابع موجک  $\Psi_{(a,b)}(t)$  با استفاده از تأخیر و تغییر مقیاس موجک مادر از فرمول زیر به دست می‌آید [۲۲].

$$\Psi_{(a,b)}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (1)$$

تابع موجکی  $\Psi(t)$ ، موج مادر نامیده می‌شود که دارای ویژگی‌های شوک بوده و به سرعت می‌تواند به صفر کاهش پیدا کند. برخی از توابع موجکی که برای آنالیز سیگنال به کار برده می‌شوند عبارت‌اند از موجک‌ها، مرلت، دابیشز، میر. [۲۴]

## ۲-۳. منطقه مورد مطالعه و داده‌های جمع‌آوری شده

خلیج مکزیک حوضه اقیانوسی است که بیشتر آن را قاره

## ۲. مواد و روش کار

### ۲-۱. شبکه عصبی مصنوعی

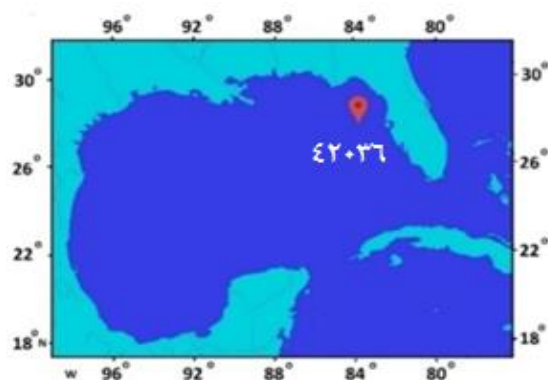
شبکه عصبی مصنوعی یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که نورون‌ها مشابه پردازش داده‌های مغز انسان عمل می‌کنند [۲۱]. نورون می‌تواند تابع ریاضی غیرخطی باشد، در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود، نیز می‌تواند یک سامانه کاملاً پیچیده و غیرخطی باشد. در شبکه عصبی، هر نورون مستقل عمل می‌کند و رفتار کلی شبکه، برآیند رفتار نورون‌های متعدد است. به عبارت دیگر، نورون‌ها در یک روند همکاری، یکدیگر را تصحیح می‌کنند. شکل ۱ یک شبکه چندلایه پرسپترون را نشان می‌دهد که از یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. [۲۲].

الگوریتم لونبرگ مارکواریت یکی از روش‌هایی است که برای یافتن کمینه یک تابع غیرخطی چند متغیره به شکل یک روش استاندارد برای حل مسئله کمینه مربعات در توابع در آمده است. این الگوریتم بین الگوریتم گاوس نیوتون و روش گرادیان نزولی درون‌یابی می‌کند. در مطالعه حاضر برای بهینه نمودن وزن‌ها و ضرایب شبکه از این نوع الگوریتم استفاده می‌شود [۲۳].

در این تحقیق برای اجرای شبکه عصبی و بهینه نمودن پاسخ پیش‌بینی مدل، پارامترهای شبکه به صورت زیر انتخاب شده است: انتخاب ۲ نورون در لایه پنهان، به کارگیری توابع tansig و purelin در لایه‌های پنهان و خروجی، انتخاب الگوریتم آموزشی لونبرگ-مارکواریت، توقف مدل نیز در تعداد چرخه لازم برای مقدار بهینه mse در نظر گرفته شد. به عبارتی شرط توقف، عدم بهبود در آموزش شبکه بعد از چندین تکرار است که در این حالت وزن‌های شبکه بهینه شده است. مجموعه داده‌های سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ بویه ۴۲۰۳۶ به عنوان داده‌های آموزش و داده‌های سال ۲۰۱۶ این بویه به عنوان داده‌های تست استفاده شد.

خلیج مکزیک سالانه درگیر توفان‌های گرمسیری به شکل توفان است. در سال ۲۰۱۶ توفان‌های فصلی شامل ۱۵ توفان بود که ۷ تا از توفان‌ها، توفان معمولی و ۴ تا از آن‌ها توفان قوی محسوب می‌شد. این توفان‌ها از ماه ژوئن شروع شده و در ۳۰ نوامبر به پایان رسیده‌اند. در جدول ۱ تاریخ و زمان رخداد، بیشینه سرعت باد و شدت هر یک از توفان‌ها آمده است. در شکل ۳ مسیر عبور رخداد توفان‌های یادشده نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مسیر توفان‌های جولیا (شکل ب)، ایرل (شکل پ) و دنیل (شکل ت) از درون خلیج مکزیک و بویه مورد مطالعه عبور نکرده است و مسیر توفان‌های هرمین (شکل ث) و کولین (شکل ج) از درون خلیج مکزیک و بویه مورد مطالعه عبور کرده است.

آمریکای شمالی و آمریکای مرکزی احاطه کرده است [۲۶]. در این تحقیق، داده‌های باد و موج بویه شماره ۴۲۰۳۶ در شرق خلیج مکزیک با موقعیت جغرافیایی  $28^{\circ}30'00'' N, 84^{\circ}31'00'' W$  و عمق ۵۴/۵ متری مطالعه شده است (شکل ۲). آرشیو داده‌های ثبت شده این بویه از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۰ است که در این تحقیق از داده‌های ثبت‌شده سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. این داده‌ها شامل داده‌های هواشناسی سرعت باد، جهت باد، فشار هوا، دمای هوا، دمای آب و ارتفاع موج است. در این بازه زمانی داده‌های ثبت‌نشده وجود ندارد [۲۵].



شکل ۲. محل استقرار بویه ۴۲۰۳۶ در خلیج مکزیک [۲۵]

جدول ۱. مشخصات رخداد توفان‌های سال ۲۰۱۶ که از کنار یا درون خلیج مکزیک عبور کرده‌اند [۲۶]

مشخصات توفان	نام توفان					
	متیو	جولیا	ایرل	دنیل	هرمین	کولین
شروع	۲۸ سپتامبر	۱۳ سپتامبر	۲ آگوست	۱۹ ژوئن	۲۸ آگوست	۵ ژوئن
پایان	۱۹ اکتبر	۱۸ سپتامبر	۶ آگوست	۲۱ ژوئن	۳ سپتامبر	۷ ژوئن
حداکثر سرعت باد (کیلومتر بر ساعت)	۲۷۰	۸۵	۱۴۰	۷۵	۱۳۰	۸۵
شدت (هکتو پاسکال)	۹۳۴	۱۰۰۷	۹۷۹	۱۰۰۷	۹۸۱	۱۰۰۱

اوایل ماه ژوئن، موج آن وارد کارائیب شد و سیستم کم فشار ایجاد نموده است. این توفان در ۳ ژوئن به صورت شمال رو به خلیج مکزیک وارد شده است و به تدریج به سمت شمال شرقی منحرف شده و در ۶ ژوئن به سمت سواحل فلوریدا شتاب گرفته است. توفان کولین در ۷ ژوئن در نزدیکی ساحل کیتون فلوریدا به زمین رسیده است ولی در روی سطح زمین قدرت توفان کاهش نیافته است. بیشینه سرعت در این نوع توفان به ۸۵ کیلومتر بر ساعت رسیده است [۲۶ و ۲۷].

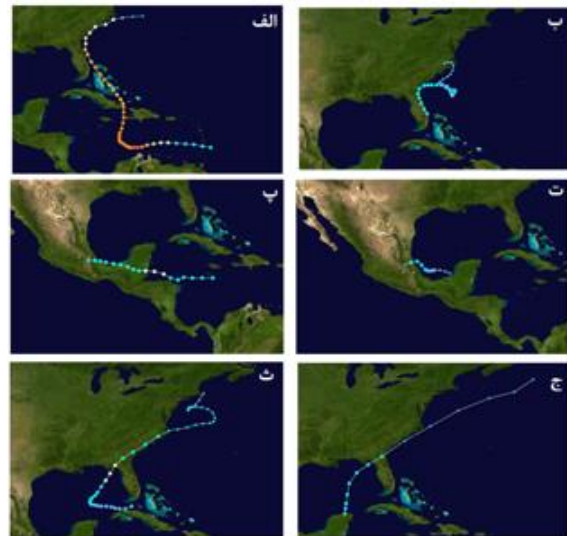
### ۳. نتایج

#### ۳-۱. تعیین توفان‌های مؤثر بر ارتفاع امواج خلیج مکزیک

برای بررسی اثر توفان‌های یادشده در ارتفاع موج، تغییرات ارتفاع موج در سال ۲۰۱۶ مطابق شکل ۴ رسم شده است [۲۵]. مطابق شکل، توفان‌های کولین در ماه ژوئن و توفان هرمین در ماه سپتامبر بیشترین تأثیر در اوج گیری ارتفاع امواج خلیج مکزیک را داشته‌اند. توفان‌های متیو، جولیا، ایرل و دنیل نیز تأثیر چندانی در افزایش ارتفاع امواج خلیج مکزیک نداشته‌اند.

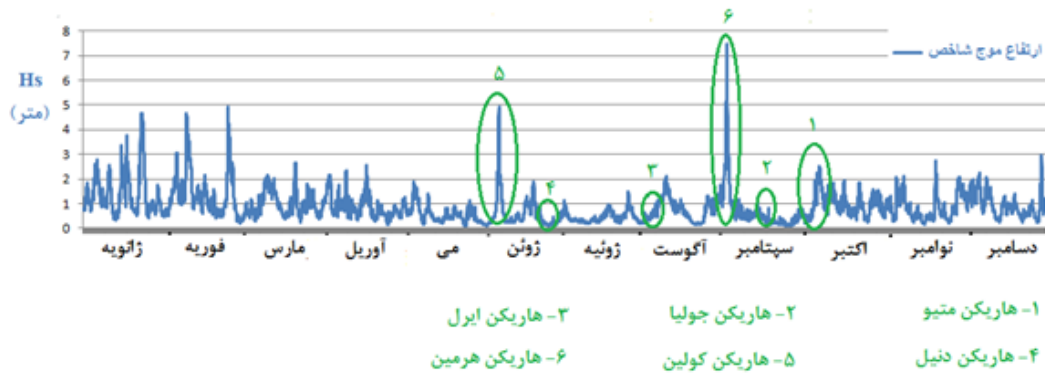
#### ۳-۲. پیش‌بینی با استفاده از مدل شبکه عصبی ویولت

دیگزیت و لاندی نشان داده‌اند که از تکنیک شبکه عصبی موجکی می‌توان برای حل مشکل پیش‌بینی دقیق رویدادهای شدید توفان استفاده کرد [۳۱]. بنابراین در مطالعه حاضر به منظور پیش‌بینی ارتفاع امواج سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل شبکه عصبی موجکی از این روش استفاده شد. برای دستیابی به الگوهای نهفته در سری زمانی اولیه با استفاده از ابزار موجک و تبدیل موجک پیوسته، سری زمانی ارتفاع موج شاخص بویه ۴۲۰۳۶ به ۱۲ سطح مختلف تجزیه شد. در واقع هر چه تعداد مراحل منتخب برای تجزیه بیشتر باشد، سیگنال از فیلترهای بالا گذر و پایین گذر عبور نموده و فرکانس‌های مختلف آن تحلیل می‌شود.



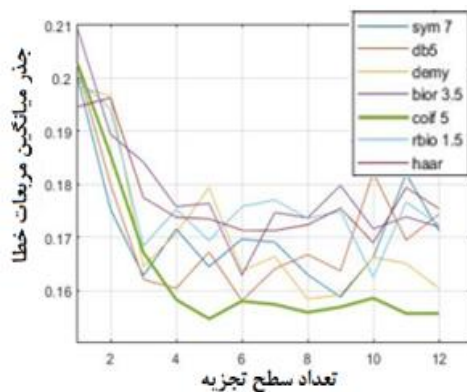
شکل ۳. رخداد برخی از توفان‌های سال ۲۰۱۶ در اقیانوس اطلس و خلیج مکزیک (الف: توفان متیو ب: توفان جولیا ب: توفان ایرل ت: توفان دنیل) و رخداد توفان‌های هرمین (شکل ث) و کولین (شکل ج) سال ۲۰۱۶ در اقیانوس اطلس و عبور این دو از خلیج مکزیک [۲۹ و ۳۰]

توفان متیو قوی‌ترین توفان سال ۲۰۱۶ در اقیانوس اطلس است که از ۲۸ سپتامبر تا ۱۹ اکتبر رخ داده است [۲۸]. مسیر این توفان از کنار مرزهای شرقی خلیج مکزیک عبور نموده است. علاوه بر این در سال ۲۰۱۶ دو توفان گرمسیری به نام‌های توفان هرمین و توفان کولین وارد خلیج مکزیک شده است. توفان هرمین در تاریخ ۲۸ آگوست تا ۳ سپتامبر رخ داده است. این توفان گرمسیری ابتدا از سواحل آفریقا در درون اقیانوس اطلس شکل گرفته، سپس جابه‌جایی عمیق این موج تثبیت شده و گردش توفانی آن در ۲۸ آگوست ایجاد شده است، سپس یک فرورفتگی گرمسیری در حدود ۹۵ کیلومتری جنوب شرقی کی وست فلوریدا ایجاد شده و در ۲ سپتامبر به طور پیوسته به توفان ۱۳۰ کیلومتر در ساعت شدت یافته است. توفان کولین نیز از ۵ تا ۷ ژوئن اتفاق افتاده است [۲۹ و ۳۰]. این توفان گرمسیری ابتدا در ۲۷ مه از سواحل آفریقا خارج و در



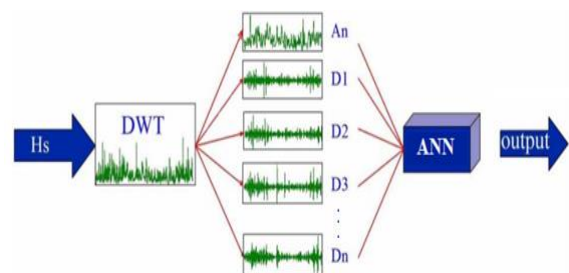
شکل ۴. ارتفاع امواج خلیج مکزیک در هنگام رخداد توفان‌های سال ۲۰۱۶

ارتفاع امواج در ساعت‌های آینده به صورت  $SWH(t+n)$  نمایش داده می‌شود که  $n$  تعداد ساعت آینده نسبت به زمان اکنون است که بایستی پیش‌بینی شود. تعداد سطوح مناسب و کمینه برای پیش‌بینی ساعات ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده مطلوب است. بنابراین برای یافتن تا حد امکان تعداد سطوح کمینه پیش‌بینی، مطابق شکل‌های ۶ تا ۹ پیش‌بینی ارتفاع امواج آینده با سطح ۱ آغاز شده و مقدار خطای جذر میانگین مربعات RMSE محاسبه شده است. این عمل با افزایش تعداد سطوح به تعداد ۱۲ سطح انجام و در هر مرحله دقت پیش‌بینی RMSE ارزیابی شده است.



شکل ۶. میانگین خطای مربعات مدل WANN با تعداد سطوح تجزیه و موجک‌های پایه متفاوت در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳ ساعت آینده

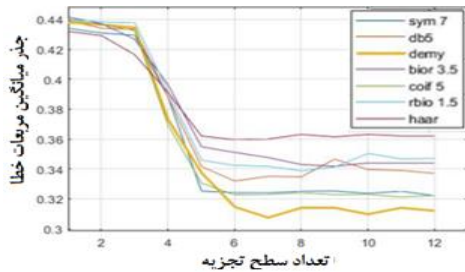
برای پیش‌یابی ارتفاع امواج زمان‌های آینده (۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده) از مدل شبکه عصبی موجک (WANN) استفاده می‌شود. شبکه عصبی موجک، ترکیبی از سطوح تجزیه‌شده موجک و شبکه عصبی است. در شکل ۵، طرح‌واره این نوع شبکه نشان داده شده است. در این مدل سری زمانی اولیه ارتفاع موج شاخص به سطح تقریب و زیر سطوح‌های جزئیات تجزیه‌شده است و سپس این سطوح به مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی ارتفاع امواج آینده وارد می‌شوند. مدل پیشنهادی شامل دو مرحله است. مرحله اول با نام مرحله پیش‌پردازش که به‌عنوان ورودی مدل وارد می‌شوند و مرحله دوم با نام مرحله شبیه‌سازی است. سطح تقریب و جزئیات نقش مهمی در عملکرد مدل ایفا می‌کنند و بایستی تعداد سطوح مؤثر و مطلوب در پیش‌بینی مشخص شوند.



شکل ۵. طرح‌واره شبکه عصبی موجکی در پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از باد ساعت‌های آینده (WANN)

اگر ارتفاع امواج اکنون را به صورت  $SWH(t)$  نشان دهیم،

خطای پیش‌بینی به دست می‌آید. در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده نیز استفاده از موجک مادر dmey با تعداد سطح به ترتیب ۶، ۷ و ۸ تعداد سطح کمینه خطای پیش‌بینی توسط مدل محاسبه می‌شود.

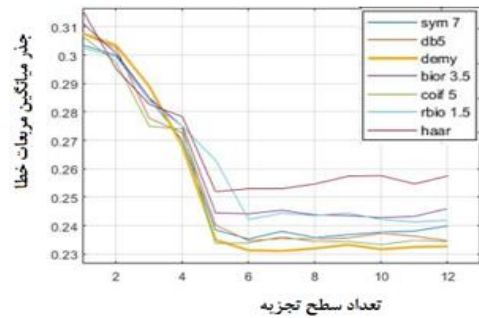


شکل ۹. میانگین خطای مربعات مدل WANN با تعداد سطوح تجزیه و موجک‌های پایه متفاوت در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۱۲ ساعت آینده

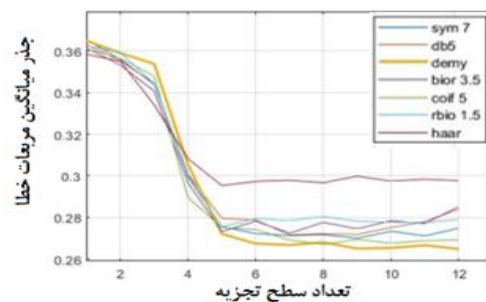
در شکل‌های فوق، تعداد نورون در لایه ورودی شبکه برابر با تعداد سطوح تقریب و زیر سطوح تجزیه شده در هر مرحله است. در لایه پنهان نیز ۲ نورون در لایه پنهان و یک نورون در لایه خروجی در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقت مدل شبکه عصبی تعداد نورون‌های لایه پنهان با آزمون و خطا تغییر نمود که مناسب‌ترین نتایج خطاهای پیش‌بینی (ضریب همبستگی R و جزر خطای میانگین مربعات RMSE) در جدول ۲ آمده است. در این جدول در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده تعداد نورون در لایه پنهان شبکه عصبی به ترتیب، ۶، ۷، ۷ و ۸ است.

جدول ۲. بررسی دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی با مناسب‌ترین تعداد نورون‌های لایه پنهان در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده

داده		۳ ساعت	۶ ساعت	۸ ساعت	۱۲ ساعت
آموزش	<i>R</i>	۰/۹۶۹	۰/۹۳۸	۰/۹۱۳	۰/۸۷۷
	<i>RMSE</i>	۰/۱۳۲	۰/۱۸۶	۰/۲۱۹	۰/۲۵۹
تست	<i>R</i>	۰/۹۶۶	۰/۹۳۲	۰/۹۰۷	۰/۸۷۷
	<i>RMSE</i>	۰/۱۷۲	۰/۲۴۱	۰/۲۷۷	۰/۳۱۸



شکل ۷. میانگین خطای مربعات مدل WANN با تعداد سطوح تجزیه و موجک‌های پایه متفاوت در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۶ ساعت آینده



شکل ۸. میانگین خطای مربعات مدل WANN با تعداد سطوح تجزیه و موجک‌های پایه متفاوت در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۸ ساعت آینده

مشاهده می‌شود که با هر بار افزایش تعداد سطوح دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد ولی از یک تعداد سطح به بعد، افزایش تعداد سطوح تأثیری در کاهش خطای محاسباتی ندارد. همچنین در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳ ساعت آینده، به کارگیری موجک مادر کوئف با تعداد سطح ۵، کمینه مقدار



**۳-۳. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات پیشین**

جهت باد و اختلاف دمای هوا و آب تأثیری در افزایش دقت پیش‌بینی ندارند. همچنین به کارگیری سرعت باد و فشار هوا علاوه بر زیر سطوح‌های موجکی تا حدی مناسب در افزایش دقت پیش‌بینی مؤثر هستند. به‌منظور مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات پیشین، در ادامه همین جدول نتایج تحقیقات سجاد شهابی و همکاران [۳۲]، مینگ لی و کفنگ [۳۳]، کامرانزاد و همکاران [۳۴] نیز آورده شده است. با مقایسه مطالعات ذکر شده با تحقیق حاضر می‌توان بیان نمود که تحقیق حاضر دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مطالعات پیشین دارد.

پس از انتخاب مناسب‌ترین موجک پایه و تعداد زیر سطوح مناسب در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶ و ۱۲ ساعت آینده، در ادامه تحقیق مطابق جدول ۳ علاوه بر زیر سطوح تجزیه‌شده، هر یک از ورودی‌های سرعت باد، فشار هوا، جهت باد و اختلاف دمای هوا و آب، به‌عنوان ورودی مدل WANN در نظر گرفته شدند. طبق نتایج این جدول مشهود است که به کارگیری زیر سطوح موجکی و فشار هوا و سرعت باد مناسب‌ترین ورودی‌های شبکه عصبی محسوب می‌شوند و

**جدول ۳. مقایسه نتایج تحقیقات گذشته با این تحقیق**

مرجع	مدل	ورودی‌های مدل	HS میانگین (متر)	شاخص خطا	۳ ساعت	۶ ساعت	۱۲ ساعت
نتیجه این تحقیق	ANN	سری‌های زمانی از تجزیه موجکی	۰/۸۶	R	۰/۹۶۶	۰/۹۰۷	۰/۸۷۷
				SI	۰/۲۳۱	۰/۳۴۲	۰/۳۹۲
				RMSE	۰/۱۷۲	۰/۲۷۷	۰/۳۱۸
نتیجه این تحقیق	ANN	سری‌های زمانی از تجزیه موجکی - سرعت باد - فشار هوا	۰/۸۶	R	۰/۹۷۷	۰/۹۵۰	۰/۹۰۶
				SI	۰/۱۷۰	۰/۲۵۲	۰/۳۴۴
				RMSE	۰/۱۳۸	۰/۲۰۵	۰/۲۷۹
نتیجه این تحقیق		سری‌های زمانی از تجزیه موجکی - سرعت باد - فشار هوا - جهت باد - اختلاف دمای هوا و آب	۰/۸۶	R	۰/۹۷۵	۰/۹۴۶	۰/۹۰
				SI	۰/۱۸۰	۰/۲۶۳	۰/۳۶۲
				RMSE	۰/۱۴۶	۰/۲۱۳	۰/۲۹۴
Sajad Shahabi et al (2016)	WGMDH	سری‌های زمانی از تجزیه موجکی		R	-	-	-
				SI	-	-	-
				RMSE	۰/۱۹۵	۰/۲۶۰	۰/۳۴۰
(Ming Li & Kefeng Liu., 2020)	ANN	سرعت باد - سرعت تند باد - پر بود موج میانگین - دمای هوا	۲/۳۵	R	۰/۹۲۲	۰/۸۸۲	۰/۸۴۲
				SI	۰/۱۰۳	۰/۱۳۶	۰/۱۶۴
Kamranzad(2011)	ANN	سرعت برشی - جهت باد ارتفاع موج شاخص - جهت موج	۰/۲۹	R	۰/۹۰۷	۰/۸۲۰	۰/۶۶۳
				SI	۰/۳۷۸	۰/۵۱۱	۰/۶۶۳

## ۳-۴. بررسی نتایج مدل WANN در زمان وقوع

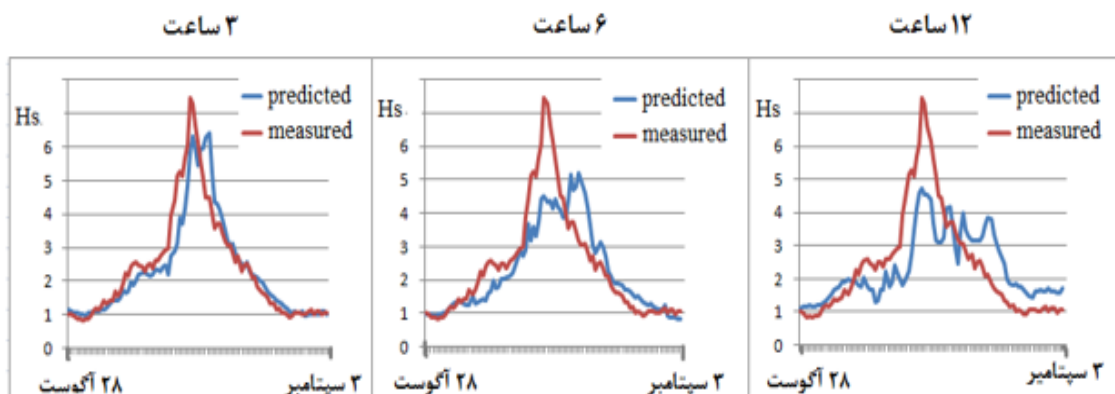
## توفان‌های متیو، هرمین و کولین

حضور توفان‌های گرمسیری که گهگاه در خلیج مکزیک اتفاق می‌افتد، امواج این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین یکی از اهداف مطالعه حاضر، بررسی میزان کارایی مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی ارتفاع امواج در زمان رخداد توفان‌های مؤثر سال ۲۰۱۶ است. در ادامه این پژوهش مقادیر پیش‌بینی شده مناسب‌ترین پیش‌بینی مدل WANN که با انتخاب ورودی‌های زیر سری‌های موجکی، سرعت باد و فشار باد انجام شده است در هنگام رخداد توفان‌های هرمین، کولین و متیو به‌طور مجزا ارزیابی و خطای پیش‌بینی در هر یک از رخدادها محاسبه شد. جدول ۴ نتایج خطای آماری این موضوع را نشان می‌دهد. طبق نتایج مشاهده می‌شود که در هنگام وقوع توفان‌های هرمین و کولین دقت پیش‌بینی مدل در ۳ و ۶ و ۱۲ ساعت آینده کاهش می‌یابد. در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳ ساعت آینده ضریب همبستگی از  $R=0.97$  به  $R=0.91$  و در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۶ ساعت آینده ضریب همبستگی از  $R=0.95$  به حدود  $R=0.84$  و در پیش‌بینی ارتفاع

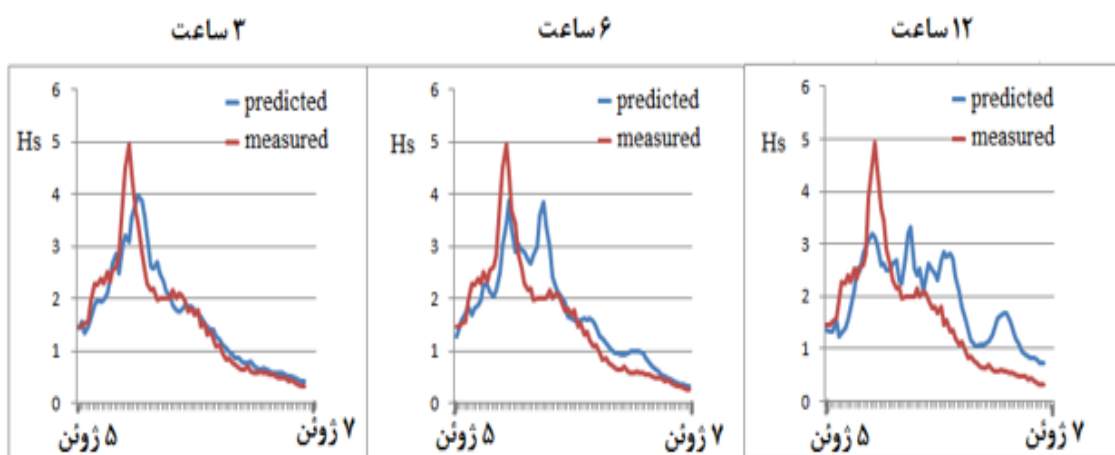
امواج در ۱۲ ساعت آینده دقت پیش‌بینی از  $R=0.90$  به  $R=0.75$  کاهش یافته است. بعلاوه در پیش‌بینی ارتفاع امواج در هنگام وقوع توفان هرمین و کولین مدل شبکه عصبی به ترتیب دست پایین و دست بالا پیش‌بینی را انجام می‌دهد. با مقایسه مناسب‌ترین مدل WANN و داده‌های تفکیک‌شده در هنگام رخداد توفان متیو نیز می‌توان پی برد که تغییر چندانی در پیش‌بینی وجود ندارد. یعنی اینکه هنگام رخداد توفان متیو، این توفان گرمسیری در سیستم فشار هوا و اوج‌گیری ارتفاع امواج تأثیری نداشته و شرایط توفان‌های گرمسیری در دوره زمانی ۲۸ سپتامبر تا ۹ اکتبر در این خلیج اثر نداشته است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی مدل WANN در ۳، ۶ و ۱۲ ساعت آینده در هنگام رخداد هاریکن‌های هرمین، کولین و متیو با ورودی‌های زیر سطح‌های موجکی، سرعت باد و فشار هوا نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان اشاره نمود که هر چه پیش‌بینی ارتفاع امواج در ساعت‌های آینده دورتر باشد دقت پیش‌بینی کمتر می‌شود و در سه ساعت آینده خطای پیش‌بینی مدل کمتر است.

جدول ۴. مقادیر خطاهای آماری توسط مدل WANN در هنگام رخداد توفان‌های هرمین، کولین و متیو

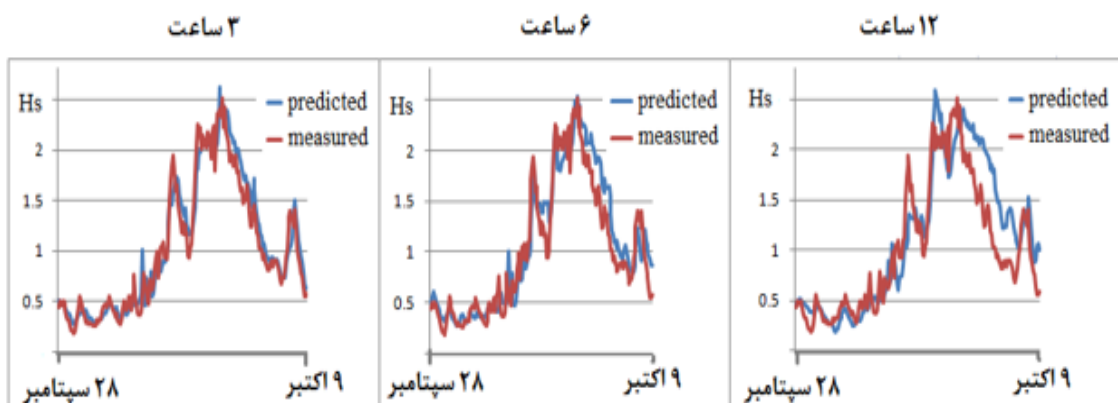
نوع توفان	شاخص‌های آماری	شاخص‌های آماری			
		R	RMSE	SI	Bias
توفان هرمین	۳ ساعت	۰/۹۲۷	۰/۶۰۱	۰/۲۴۹	-۰/۰۹۰
	۶ ساعت	۰/۸۳۳	۰/۸۹۲	۰/۳۶۸	-۰/۱۴۳
	۱۲ ساعت	۰/۷۵۷	۱/۰۶۸	۰/۴۴۱	-۰/۰۸۳
توفان کولین	۳ ساعت	۰/۹۱۹	۰/۴۲۰	۰/۲۵۷	۰/۰۲۱
	۶ ساعت	۰/۸۶۴	۰/۵۵۴	۰/۳۵۱	۰/۱۱۷
	۱۲ ساعت	۰/۷۵۴	۰/۷۶۳	۰/۴۶۸	۰/۳۰۱
توفان متیو	۳ ساعت	۰/۹۷۳۸	۰/۱۵۰۷	۰/۱۴۶	۰/۰۳۰
	۶ ساعت	۰/۹۵۲	۰/۲۰۷	۰/۲۰۱	۰/۰۵۴
	۱۲ ساعت	۰/۹۰۳۱	۰/۳۱۴	۰/۳۰۴	۰/۰۹۱



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶ و ۱۲ ساعت آینده با استفاده از مدل شبکه عصبی در هنگام وقوع هاریکن هرمین



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶ و ۱۲ ساعت آینده با استفاده از مدل شبکه عصبی در هنگام وقوع هاریکن کولین



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳، ۶ و ۱۲ ساعت آینده با استفاده از مدل شبکه عصبی در هنگام وقوع هاریکن متیو

## سپاسگزاری

بدین وسیله از داوران و ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک که در بهبود کیفیت مقاله کمک شایانی داشته اند، کمال تقدیر و تشکر داریم.

## مراجع

- [1] Khalilabadi MR. The effect of meteorological events on sea surface height variations along the northwestern Persian Gulf. *Current Science* (00113891). 2016 Jun 10;110(11).
- [2] Khalilabadi MR, Mansouri D. Effect of super cyclone "GONU" on sea level variation along Iranian coastlines. *Indian journal of Geo Marine sciences*. 2013;42(4):470-75.
- [3] Wang H, Yang J, Zhu J, Ren L, Liu Y, Li W, Chen C. Estimation of significant wave heights from ASCAT scatterometer data via deep learning network. *Remote Sensing*. 2021 Jan 8;13(2):195.
- [4] Etemad-Shahidi A, Kazeminezhad MH, Mousavi SJ. On the prediction of wave parameters using simplified methods. *Journal of Coastal Research*. 2009 Jan 1:505-9.
- [5] Akpınar A, Özger M, Bekiroğlu S, Komurcu MI. Performance evaluation of parametric models in the hindcasting of wave parameters along the south coast of Black Sea. 2014;43(6):905-20.
- [6] Wang W, Tang R, Li C, Liu P, Luo L. A BP neural network model optimized by mind evolutionary algorithm for predicting the ocean wave heights. *Ocean Engineering*. 2018 Aug 15;162:98-107.
- [7] Etemad-Shahidi A, Mahjoobi J. Comparison between M5' model tree and neural networks for prediction of significant wave height in Lake Superior. *Ocean Engineering*. 2009 Nov 1;36(15-16):1175-81.
- [8] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *nature*. 2015 May 28;521(7553):436-44.
- [9] DeVries PM, Thompson TB, Meade BJ. Enabling large-scale viscoelastic calculations via neural network acceleration. *Geophysical Research Letters*. 2017 Mar 28;44(6):2662-9.

## ۴. نتیجه گیری

امواج توفانی دریا پدیده‌ای به شدت غیرخطی و تصادفی هستند که بررسی رفتار آن‌ها برای دانشمندان ناشناخته است. در این تحقیق با استفاده از مدل ترکیبی تبدیل موجک و شبکه عصبی مصنوعی ارتفاع امواج ناشی از باد ۳، ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده خلیج مکزیک پیش‌بینی شده است. بدین منظور از داده‌های سال ۲۰۱۶، ۴ بویه مستقر در این خلیج که شرایط توفان‌های هرمین، کولین و متیو، در آن‌ها رخ داده است استفاده شده است. به منظور تعیین ورودی‌های مدل نیز سری زمانی جریان از تبدیل ویولت با زیر موجک‌های مادر Rbio، Coif، Bior، dmey، Db، Sym، haar که در محیط متلب تعبیه شده است استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که موجک (5) Coif با ۵ زیر سری در پیش‌بینی ارتفاع امواج ۳ ساعت آینده و موجک dmey با ۶، ۶ و ۷ زیر سری مناسب‌ترین موجک برای تجزیه سیگنال اولیه در پیش‌بینی ارتفاع امواج به ترتیب ۶، ۸ و ۱۲ ساعت آینده است. با اضافه نمودن پارامترهای فشار هوا و سرعت باد به زیرسری‌های یاد شده مشخص شد که دقت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. ولی با افزودن اختلاف دمای هوا و آب و جهت باد به زیرسری‌ها دقت مدل افزایش نمی‌یابد. بنابراین مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی ارتفاع امواج در ساعت‌های آینده یاد شده، با ورودی‌های تجزیه موجکی و فشار هوا و سرعت باد است. پس از تعریف مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی، دقت مدل در زمان رخداد توفان‌های هرمین، متیو، کولین ارزیابی شد که نتایج نشان داد در زمان رخداد توفان‌های هرمین و کولین مدل کاهش چشمگیری در پیش‌بینی را نشان می‌دهد. همچنین در پیش‌بینی ارتفاع امواج در ساعت‌های آینده، هر چه پیش‌بینی ساعت‌های آینده دورتر باشد دقت پیش‌بینی کمتر می‌شود و در سه ساعت آینده مدل کمترین خطای پیش‌بینی را دارد.

- [۲۰] محمودی کیومرث، کتابداری محمدجواد، قاسمی حسن. استفاده از روش ترکیبی موجک-ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی وقوع امواج غیرعادی. نشریه هیدرولیک. ۱۳۹۷؛۱۳(۱):۵-۱.
- [21] Mohammed J. Artificial neural network for predicting global sub-daily tropospheric wet delay. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021 Jun 1;217:105612.
- [22] Olawoyin A, Chen Y. Predicting the future with artificial neural network. *Procedia computer science*. 2018 Jan 1;140:383-92.
- [23] Beale MH, Hagan MT, Demuth HB. Neural network toolbox. User's Guide, MathWorks. 2010;2:77-81.
- [24] Doucoure B, Agbossou K, Cardenas A. Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data. *Renewable Energy*. 2016 Jul 1;92:202-11.
- [۲۵] یونسیان داوود، ولیخانی محمد. تبدیل موجک. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۳۹۴، چاپ اول.
- [26] Tropical Storm Colin [Internet]. 2016 [cited 2016 June]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical\\_Storm\\_Colin\\_\(2016\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Storm_Colin_(2016))
- [27] NOAA. National Data Buoy Center [Internet]. 2014 [cited 2014 March]. Available from: <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- [28] Wikipedia [Internet]. 2017. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/2016\\_Atlantic\\_hurricane\\_season](https://en.wikipedia.org/wiki/2016_Atlantic_hurricane_season)
- [29] Robbie, J. Tropical Cyclone Report: Hurricane Hermine (Technical report) [Internet]. 2017 [updated 2017 May 12; cited 2017 May 12]. Available from: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092016\\_Hermine.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092016_Hermine.pdf)
- [30] Andrew, S. Latto and John P, Cangialosi. Tropical Storm Colin [Internet]. 2022 [cited 2022 July]. Available from: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL032022\\_Colin.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL032022_Colin.pdf)
- [10] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A, Bengio Y. Deep learning. MS: MIT Press. 2016.
- [11] Li M, Liu K. Probabilistic prediction of significant wave height using dynamic Bayesian network and information flow. *Water*. 2020 Jul 22;12(8):2075.
- [12] Fan S, Xiao N, Dong S. A novel model to predict significant wave height based on long short-term memory network. *Ocean Engineering*. 2020 Jun 1;205:107298.
- [13] Shamshirband S, Mosavi A, Rabczuk T, Nabipour N, Chau KW. Prediction of significant wave height; comparison between nested grid numerical model, and machine learning models of artificial neural networks, extreme learning and support vector machines. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020 Jan 1;14(1):805-17.
- [14] Dai H, Shang S, Lei F, Liu K, Zhang X, Wei G, Xie Y, Yang S, Lin R, Zhang W. CRBM-DBN-based prediction effects inter-comparison for significant wave height with different patterns. *Ocean Engineering*. 2021 Sep 15;236:109559.
- [15] Londhe SN, Shah S, Dixit PR, Nair TB, Sirisha P, Jain R. A coupled numerical and artificial neural network model for improving location specific wave forecast. *Applied Ocean Research*. 2016 Sep 1;59:483-91.
- [16] James SC, Zhang Y, O'Donncha F. A machine learning framework to forecast wave conditions. *Coastal Engineering*. 2018 Jul 1;137:1-0.
- [17] Dixit P, Londhe SN, Dandawate YH. Wave forecasting using neuro wavelet technique. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*. 2014 Dec;5(4):237-47.
- [18] Dixit P, Londhe S. Prediction of extreme wave heights using neuro wavelet technique. *Applied Ocean Research*. 2016 Jun 1;58:241-52.
- [۱۹] رجایی طاهر، شهابی اکبر. کاربرد مدل ترکیبی موجک-شبکه عصبی در پیش‌بینی تغییرات کوتاه مدت تراز سطح دریا (مطالعه موردی: بندر چابهار). دریا فتون. ۱۳۹۳؛۱(۲):۴۲-۵۳.

[31] Dixit P, Londhe S. Prediction of extreme wave heights using neuro wavelet technique. Applied Ocean Research. 2016 Jun 1;58:241-52.

[32] Shahabi S, Khanjani MJ, Hessami Kermani M. Hybrid wavelet-GMDH model to forecast significant wave height. Water Science and Technology: Water Supply. 2016 Apr;16(2):453-9.

[33] Li M, Liu K. Probabilistic prediction of significant wave height using dynamic Bayesian network and information flow. Water. 2020 Jul 22;12(8):2075.

[34] Kamranzad B, Etemad-Shahidi A, Kazeminezhad MH. Wave height forecasting in Dayyer, the Persian Gulf. Ocean engineering. 2011 Jan 1;38(1):248-55.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Long Short-Term Memory
2. Monterey
3. Katrina
4. Dean
5. Gustav
6. Ike
7. Irene
8. Dean
9. Irene
10. Levenberg-Marquardt
11. Matthew
12. Hermine
13. coline
14. wavelet artificial neural network