ارزیابی عملکرد مدل‌های محاسباتی نرم در تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی

بهاره کامران‌زاد[۱]، ابراهیم جباری[۲]*، مهرشاد صمدی[۳]

[۱] دکتری مهندسی آب، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی؛ kamranzad@inio.ac.ir
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Jabbari@iust.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ mehrshad1364@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۱۴
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۲۰

کلمات کلیدی:
امواج
رگرسیون تطبیقی چندمتغیره اسپلاین
درختان رگرسیونی
شبکه های عصبی مصنوعی
مدل درختی 'M5.

چکیده

امواج ناشی از باد همواره یکی از موضوعات مهم، اساسی و مورد توجه در مهندسی سواحل و بنادر بوده است. از این‌رو، طی سالیان متمادی روش‌های مختلفی مانند روش‌های تجربی، مدل‌های عددی و روش‌های محاسباتی نرم جهت تخمین پارامترهای امواج ارائه شده است. در این مطالعه، ارتفاع امواج در بندر انزلی با استفاده از مدل‌های محاسباتی نرم همچون مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین (MARS)، درختان رگرسیونی (CART)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) و مدل درختی'M5 تخمین زده شده است. از جمله ویژگی‌های بارز مدل‌های MARS، CART و 'M5 در مقایسه با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارائه روابط رگرسیونی و معادلات ریاضی کاربردی جهت تخمین ارتفاع امواج می‌باشد که به‌راحتی می‌توان از روابط به‌دست آمده جهت پیش‌بینی‌ها استفاده نمود. در نهایت نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان‌دهنده دقت قابل رقابت و نزدیک روش‌های رگرسیونی در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین ارتفاع امواج می‌باشند.

Assessment of Soft Computing Models to Estimate Wave Heights in Anzali Port

Bahareh Kamranzad[1], Ebrahim Jabbari[2]* ,Mehrshad Samadi[3]

[1] *PhD, Ocean Engineering and Technology Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran; kamranzad@inio.ac.ir.*
[2] *Associate Professor, School of Civil Eng., Iran University of Science and Technology; Jabbari@iust.ac.ir.*
[3] *M. Sc., School of Civil Eng., Iran University of Science and Technology; mehrshad1364@gmail.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 May. 2013
Accepted: 5 Nov. 2013
Available online: 11 Nov. 2013

Keywords:
Waves
Multivariate adaptive regression splines
Regression trees
Artificial neural networks
M5' model tree

ABSTRACT

Wind waves are one of the important, fundamental and interesting subjects in port and coastal engineering. Thus, within years, different methods such as experimental methods, numerical modeling and soft computing methods have been employed to estimate the wave parameters.
In this study, waves height in Anzali port is predicted using soft computing models such as multivariate adaptive regression splines (MARS), regression trees (CART), artificial neural networks (ANNs) and M5' model tree. Among the features of MARS, CART and M5' Models and compared to artificial neural networks, are presentation of regression equations and mathematical relationships which could easily be used to estimate the time series of wave height. The obtained results showed competitive accuracy of regression techniques in estimation of waves height compared to the artificial neural networks.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

۱- مقدمه

امواج ناشی از باد در دریاها و اقیانوس‌ها بر فعالیت‌های مختلف نواحلی ساحلی مانند طراحی و ساخت بنادر، فعالیت‌های تفریحی، انتقال رسوب، فرسایش سواحل، صنعت شیلات، حمل و نقل دریایی، طراحی، جانمایی، ساخت و حفاظت سازه‌های ساحلی، فعالیت‌های مرتبط با صنعت نفت و محیط زیست تاثیرگذار است. از این‌رو، تعیین مشخصات امواج یکی از موضوعات مهم در مهندسی سواحل و بنادر می‌باشد.

در طی دهه‌های گذشته، مدل‌های متعددی برای تعیین مشخصه‌های امواج (ارتفاع موج شاخص، پریود موج شاخص و ...) توسط محققین ارائه شده است. در این راستا، مطالعاتی به‌منظور مدل‌سازی امواج دریا با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی، بررسی‌های تحلیلی، روش‌های تجربی، مدل‌سازی‌های عددی و مدل‌سازی‌های مبتنی بر ابزارهای محاسباتی نرم همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده است.

در سال‌های اخیر، به‌دلیل مزایای ابزارهای محاسباتی نرم همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی و درختان تصمیم، استفاده از این روش‌ها در حل بسیاری از مسایل مرتبط با مهندسی دریا گسترش یافته است. از جمله ویژگی‌های عمده این روش‌ها می‌توان به سرعت بالاتر اجرای آنها در مقایسه با مدل‌های ریاضی و عددی، عدم نیاز به حافظه پردازشگر زیاد، کارکرد آسان‌تر، امکان تلفیق مدل‌های نرم با یکدیگر و ساخت مدل‌های پیچیده‌تر و یا حتی ترکیب نتایج آن‌ها با مدل‌های عددی اشاره نمود.

ابزارهای محاسباتی نرم قادر هستند برای مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی و پیچیده، با ایجاد یک نگاشت بین متغیرهای پیش‌بینی کننده و پارامترهای هدف روابط حاکم بر متغیرهای ورودی و خروجی مورد نظر را از میان پایگاه‌های داده ارائه دهند که از طریق نگاشت انجام شده می‌توان به توصیف یا پیش‌بینی پدیده مورد نظر پرداخت. از آن‌جا که دست‌یابی به اطلاعات موج پس‌بینی شده بادقت مناسب در مناطق خاص و ساحلی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، استفاده از روش‌هایی که دقت مناسب را به همراه سرعت بالا و صرف هزینه کمتری به‌همراه داشته باشند، گزینه مناسبی می‌باشد. با این حال، برای اعتبارسنجی هرگونه مدل‌سازی، نیاز به مشخصات موج اندازه‌گیری شده است تا بتوان میزان دقت مدل‌سازی انجام شده را نیز تخمین زد.

با توجه به موارد مذکور و اهمیت تخمین مشخصه‌های امواج، اندازه‌گیری پارامترهای امواج و جمع‌آوری داده‌های دریاهای ایران در مراکز تحقیقاتی همواره مورد توجه بوده و جمع‌آوری اطلاعات میدانی مربوط به امواج ناشی از باد از سوی نهادهای مسئول در پایگاه‌های داده مربوطه انجام شده است. تاکنون جمع‌آوری اطلاعات میدانی مربوط به امواج ناشی از باد در سواحل جنوبی دریای خزر به‌صورت محدود انجام شده اما استفاده مناسب از این پایگاه‌های داده و به‌کارگیری روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های جدیدی که بتواند به تحلیل داده‌ها از جنبه‌های مختلف برای اکتشاف و استخراج دانش بپردازند، از اهمیت زیادی برخوردار است. برخی از ابزارهای محاسبات نرم همچون مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاینMARS، مدل درختان رگرسیونی و طبقه‌بندی CART، و مدل درختی 'M5 قادر به ارائه روابط ریاضی کاربردی جهت تخمین ارتفاع امواج دریا با استفاده از داده های باد و موج اندازه‌گیری شده موجود می‌باشند. از این اندازه‌گیری‌ها می‌توان برای اعتبارسنجی روش‌های مذکور استفاده نمود.

مدل‌سازی پارامترهای امواج با استفاده از ابزارهای محاسباتی نرم روندرو به افزایشی را در سال‌های اخیر نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال جین و همکاران [۱] با استفاده از مدل درختی و الگوریتم ژنتیک به تخمین پارامترهای امواج در اقیانوس هند پرداختند که نتایج به دست آمده از مطالعات آنها نشان‌دهنده کاربرد و دقت بالای این روش‌ها در تخمین پارامترهای امواج در اقیانوس هند می‌باشد. اعتماد شهیدی و محجوبی [۲] از مدل درختی'M5 و شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین ارتفاع موج شاخص در دریاچه سوپریور درآمریکا استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دقت مدل 'M5 در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی اندکی بهتر است. همچنین الگوریتم'M5 روابطی را جهت تخمین ارتفاع موج شاخص در دریاچه سوپریور ارایه داد که برتری این مدل در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. محجوبی و مسبب [۳] از روش ماشین‌های بردار پشتیبان جهت تخمین ارتفاع موج شاخص در دریاچه میشیگان در آمریکا استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش ماشین‌های بردار پشتیبان با ویژگی‌هایی نظیر غیرپارامتریک بودن، سرعت بالا و دقت مناسب، عملکرد خوبی را جهت تخمین ارتفاع موج شاخص دارد.

محجوبی و اعتماد شهیدی [۴] از درختان رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین ارتفاع موج شاخص در دریاچه میشیگان در آمریکا استفاده نمودند. مقایسه عملکرد تکنیک درختان رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان‌دهنده دقت بالا و قابل رقابت درختان رگرسیونی در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی است. محجوبی و همکاران [۵] از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی جهت تخمین مشخصه‌های امواج در دریاچه آنتاریو در آمریکا استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده ازمطالعه آن‌ها نشان داد که مدل فازی عصبی تطبیقی می‌تواند دقت بالا و قابل رقابتی را در تخمین پارامترهای امواج در مقایسه با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی داشته باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

زنگانه و همکاران [۶] نیز عملکرد یک مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک با سیستم استنتاجی فازی عصبی را با سیستم استنتاجی فازی عصبی مقایسه کردند. یافته‌های آنها نشان‌دهنده برتری مدل ترکیبی در مقایسه با سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی جهت تخمین پارامترهای امواج در دریاچه میشیگان بود.

همچنین مطالعات اندکی جهت مدل‌سازی مشخصه‌های امواج در دریاهای ایران با استفاده از ابزارهای محاسباتی نرم گزارش شده است. برای نمونه می‌توان به مطالعات محجوبی وصمغی[۷] و نعمتی وخانیکی [۸] اشاره کرد که از مدل درختان رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین مشخصات امواج در بنادر امیرآباد ، نکا و عسلویه استفاده کرده‌اند. کامران‌زاد و همکاران [۹]، کامران‌زاد و اعتماد شهیدی [۱۰] نیز از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین مشخصات امواج در بندر دیر و بندر بوشهر درخلیج فارس استفاده نمودند. نتایج به دست آمده از مطالعه آنها بیان‌گر دقت بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین پارامترهای امواج در خلیج فارس است. از این‌رو، استفاده از ابزارهای متنوع محاسباتی نرم، ارزیابی، مقایسه عملکرد و توانایی آن‌ها در تخمین مشخصات امواج در دریاهای ایران، می‌تواند به‌عنوان یک راه حل مناسب در تخمین پارامترهای امواج، مورد استفاده و توجه محققین قرار گیرند.

استفاده از مدل‌های عددی نیز با وجود قابلیت بالا در حل معادلات حاکم و دقت مناسب در پیش‌بینی موج، مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی بوده و بسته به موضوع مورد مطالعه، امکان غیراقتصادی بودن این رویکردها نیز وجود دارد. از جمله مطالعات انجام شده با استفاده از مدل‌های عددی در مدل‌سازی امواج در آب‌های ایران می‌توان به تحقیقات فرجامی وهمکاران [۱۱]،گلشنی و همکاران [۱۲]، چگینی وهمکاران[۱۳]، طالقانی وگلشنی [۱۴]، گلشنی[۱۵]، کامران‌زاد و همکاران [۱۶] ، کامران‌زاد و همکاران [۱۷]، کامران‌زاد و اعتماد شهیدی [۱۸] و مظاهری و همکاران [۱۹]اشاره نمود.

با توجه به مطالب بیان شده، کاربرد ابزارهای محاسباتی نرم می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب درمدل‌سازی پارامترهای امواج در آب‌های ایران مورد استفاده قرار گیرد. مطالعاتی که تاکنون در این خصوص انجام شده‌اند، دقت مناسب و انعطاف‌پذیری بالا را در استفاده از این روش‌ها برای پیش بینی امواج نشان می‌دهند که باعث کاهش هزینه محاسباتی نیز می‌شوند.

هدف از این مطالعه، به‌کارگیری مدل‌های محاسباتی نرم متنوع شامل مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین، درختان رگرسیونی CART، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل درختی M5' برای تخمین ارتفاع امواج در دریای خزر و در محدوده بندر انزلی می‌باشد که دقت و عملکرد روش‌های به کار رفته نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲ - مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین

این روش، تکنیک داده‌کاوی جدیدی است که با ترکیب رگرسیون‌های خطی ساده به ارایه روابط ریاضی کاربردی جهت تخمین پارامتر هدف می‌پردازد. در این روش، فضای مساله به بازه‌هایی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تقسیم شده و با برازش توابع اسپلاین بر روی متغیرهای ورودی و در نهایت با ترکیب آن‌ها، مدل‌های رگرسیونی انعطاف‌پذیری برای پیش‌بینی پارامتر هدف ایجاد می‌شود. تابع پایه نشان‌دهنده اطلاعات در بردارنده متغیر ورودی بوده و ارتباط بین متغیرهای ورودی با پارامتر هدف را بیان می‌کند و توسط یکی از روابط زیر بیان می‌شود:

$$h_m = \max(0, c - X) \quad (۱)$$

$$h_m = \max(0, X - c) \quad (۲)$$

در روابط بالا X متغیر پیش‌بینی کننده، c یک مقدار آستانه و h_m تابع اسپلاین است.

با ترکیب توابع پایه با یکدیگر، مدل MARS که بیانگر پارامتر هدف می‌باشد به فرم کلی زیر بیان می‌شود.

$$Y = f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^{M} \beta_m h_m(x) \quad (۳)$$

در رابطه بالا Y مقدار پیش‌بینی شده (پارامتر هدف) توسط تابع $f(x)$می‌باشد که به صورت ترکیبی از یک مقدار ثابت اولیه β_0 و مجموع m عبارت که هر کدام از یک ضریب β_m و یک تابع پایه $h_m(x)$ تشکیل شده‌اند، تعریف می‌شود[۲۰].

۳ - درختان طبقه‌بندی و رگرسیونی

الگوریتم درختان طبقه‌بندی و رگرسیونی یکی از الگوریتم‌های درختان تصمیم‌گیری است که برای تخمین مقادیر حقیقی استفاده می‌شود. این الگوریتم یک ساختار درختی را جهت تخمین پارامتر هدف ارائه می‌دهد. مدل CART به صورت یک درخت مرتبه‌ای وارونه بوده که شاخه‌های خود را به‌صورت دوتایی و تنها بر اساس یک متغیر مستقل در هر گره به دو گروه دیگر تفکیک می‌کند. این فرآیند تقسیم در گره‌ها به‌صورت دوتایی تا زمانی ادامه می‌یابد که همه داده‌ها در یک برگ نهایی در پایین‌ترین قسمت ساختار درختی قرار گرفته و برای آن‌ها یک مقدار مشخص جهت تخمین پارامتر هدف ارایه گردد[۲۱].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

۴ - شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک مدل ریاضی برای ایجاد یک نگاشت غیرخطی می‌باشند که قادر هستند فرآیندهای انجام شده توسط نرون‌های بیولوژیکی مغز انسان را شبیه‌سازی کنند. شبکه‌های عصبی به‌خاطر قابلیت انعطاف‌پذیری، تعمیم‌پذیری و توانایی در مدل‌سازی مسایل پیچیده غیرخطی، برای حل بسیاری از مسایل در شاخه‌های مختلف علمی استفاده شده است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام‌گیری از مغز انسان قادر است که روابط درونی بین داده‌های تجربی را کشف کرده و درون وزن‌های اتصالات ذخیره کند تا به موقعیت‌های دیگر تعمیم دهد. در واقع در این روش اطلاعات و دانش مساله در مجموعه وسیعی از ضرائب نگهداری می‌شود.

یکی از متداول‌ترین انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی، پرسپترون چند لایه است که شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه میانی(پنهان) و یک لایه خروجی است. تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و خروجی بستگی به تعداد متغیرهای ورودی و پارامتر هدف دارد، در حالی‌که تعداد نرون‌ها در لایه میانی بستگی به پیچیدگی مساله داشته و با استفاده از روش سعی و خطا به‌دست می‌آید.

۵- مدل درختی 'M5

مدل درختی 'M5 توسعه ایده و مفهوم درختان طبقه‌بندی و رگرسیونی CART است. 'M5 مشابه مدل CART دارای یک ساختار درختی وارونه می‌باشد که شامل یک گره ریشه در بالاترین قسمت درخت است، که با استفاده از عمل شاخه‌زنی و تقسیم در گره‌های میانی به گره‌های دیگر و نهایتا به برگ‌های انتهایی در پایین‌ترین قسمت درخت که شامل قوانین ریاضی جهت تخمین پارامتر هدف هستند، منشعب می‌شود [۲۲].

ایده‌ای که برای ساخت این مدل به کار می‌رود بر این اساس است که یک مسئله چند متغیره را به زیر دامنه‌هایی تقسیم کرده و برای هر زیر دامنه یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره برازش می‌دهد. بنابراین مدل‌های خطی جزیی به منظور تخمین ارتباط بین متغیرهای ورودی و پارامتر هدف فرمول بندی می‌شوند، که می‌توان از روابط به دست آمده برای تخمین پارامتر هدف استفاده نمود. این الگوریتم در مقایسه با دیگر گزینه‌های مشابه که قادر به ارایه روابط ریاضی کاربردی جهت تخمین پارامتر هدف می‌باشند مانند مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین شناخته شده‌تر می‌باشد. قابل ذکر است که تفاوت اصلی الگوریتم 'M5 با درخت‌های رگرسیونی CART از آنجایی است که برگ‌های مدل درختی 'M5 بر خلاف درختان رگرسیونی CART که شامل مقادیر عددی برای تخمین پارامتر هدف می‌باشند حاوی مدل‌های خطی چندمتغیری هستند که برای تخمین پارامتر هدف می‌توان از آنها استفاده نمود.

۶- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از داده‌های موج ثبت شده توسط بویه انزلی جهت آموزش و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است. داده‌ها با گام زمانی یک ساعت و مربوط به سازمان هواشناسی گیلان و در بازه زمانی ۱ مارس ۲۰۱۰ تا ۱۰ مه ۲۰۱۱ جمع‌آوری شده است.

بویه بندر انزلی در موقعیت جغرافیایی ۳۷/۴۹ درجه شمالی و ۴۹/۸۹ درجه شرقی واقع شده است. بندر انزلی در بخش جنوب‌غربی دریای خزر و در شمال ایران واقع شده و بزرگترین بندر شمال ایران می‌باشد. این بندر از فعال‌ترین بنادر حاشیه دریای خزر در زمینه ترانزیت کالا و حمل و نقل دریایی می‌باشد. بنابراین، شناسایی رژیم امواج حاکم بر این منطقه در محل‌های مورد نظر برای اهداف مختلف از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در جدول ۱، دامنه پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه آورده شده است.

جدول ۱-دامنه پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین
سرعت باد (m/s)	۰.۱	۲۹.۷۵	۳.۲۷۹
ارتفاع امواج (m)	۰	۲.۵	۰.۴۴۵

۷- توسعه مدل‌ها و ارزیابی آن‌ها

از آن‌جا که مشخصات موج در یک زمان خاص، نه تنها به سرعت باد در همان زمان، بلکه به سرعت‌های باد در زمان‌های قبل نیز بستگی دارد و بر اساس مطالعات زمانی و همکاران [۲۳] در دریای خزر ممکن است ارتفاع امواج حتی به سرعت باد ۷ ساعت قبل نیز وابسته باشد. لذا در مطالعه حاضر با هدف مدلسازی و تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$H_s = f(W_t, W_{t-1}, W_{t-2}, W_{t-3}, W_{t-4}, W_{t-5}, W_{t-6}, W_{t-7}) \quad (۴)$$

که در رابطه فوق t زمان بر حسب ساعت، W سرعت باد اندازه‌گیری شده در محل بویه و H_s ارتفاع موج اندازه‌گیری شده توسط بویه می‌باشد.

جهت ارزیابی و توسعه مدل‌ها از اطلاعات باد و آمار بویه بندر انزلی در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ استفاده شده است. بدین‌منظور از ۸۰ درصد داده‌ها جهت آموزش مدل‌های محاسباتی نرم و از باقی‌مانده داده‌ها نیز جهت ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مدل‌های آموزش دیده استفاده شده است.

۷ – ۱ - توسعه مدلMARS:

با بکارگیری تکنیک MARS توابع پایه و ضرائب مربوط به توابع پایه متناظر جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی به‌دست می‌آیند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

جدول ۲ -. توابع پایه و ضرائب مربوطه متناظر آن‌ها به دست آمده از مدل MARS جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی

h_m	β_m
$h_1 = \max(0, W_{t-2} - 11.8)$	-0.148
$h_2 = \max(0, 11.8 - W_{t-2})$	-0.020
$h_3 = \max(0, W_{t-7} - 3.9)$	$+0.075$
$h_4 = \max(0, 3.9 - W_{t-7})$	-0.025
$h_5 = \max(0, W_t - 4.2)$	$+0.112$
$h_6 = \max(0, 4.2 - W_t)$	-0.022
$h_7 = \max(W_t - 11.8)$	-0.201
$h_8 = \max(0, W_{t-7} - 10.4)$	-0.134
$h_9 = \max(0, W_{t-4} - 5)$	$+0.025$
$h_{10} = \max(0, W_{t-2} - 5.3)$	$+0.058$
$h_{11} = \max(0, W_{t-5} - 0.1)$	$+0.014$

نهایتا رابطه کلی به دست آمده از مدل MARS با توجه به فرم عمومی آن که در رابطه شماره (۳) بیان شده است، به صورت زیر جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی به دست آمد:

$$H_s = 0.530 + \sum_{m=1}^{11} \beta_m h_m(x) \quad (۵)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتیجه حاصل از مدل MARS به‌صورت یک رابطه رگرسیونی ساده جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی می‌باشد (رابطه ۵). در این رابطه بسته به دامنه سرعت باد، معادله به‌دست آمده قابلیت تفکیک و تبدیل به معادلات متعددی را دارد که این امر سبب قابلیت انعطاف‌پذیری این روش در تخمین ارتفاع امواج می‌شود. برای مثال اگر محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت باد در ساعت‌های مختلف دارای شرایط مرزی به‌صورت زیر باشند رابطه رگرسیونی MARS به‌صورت رابطه (۶) تبدیل شده که می‌تواند جهت تخمین ارتفاع امواج در بازه داده‌های موج اندازه‌گیری شده به‌کار رود.

$$If\ (W_t \le 4.2, W_{t-2} \le 5.3, W_{t-4} \le 5, W_{t-5} \le 0.1, W_{t-7} \le 3.9) \Rightarrow H_s = 0.530 - 0.020 \times (11.8 - W_{t-2}) - 0.025 \times (3.9 - W_{t-7}) - 0.022 \times (4.2 - W_t) \quad (۶)$$

۲-۷ - توسعه مدل درختان رگرسیونی CART

با استفاده از درختان رگرسیونی CART، یک درخت وارونه جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی (شکل ۱) به‌دست آمد.

همان‌طور که در ساختار درختی مدل CART قابل مشاهده است، در این روش با زدن شاخه‌هایی به‌صورت دوتایی در هر گره روی متغیرهای ورودی (سرعت‌های باد در زمان‌های مختلف) عملیات تقسیم و شاخه‌زنی روی گره‌ها انجام می‌شود که در نهایت در پایین‌ترین مرتبه درخت، مقادیر عددی مشخصی برای تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی به‌دست می‌آید (اعداد درون مستطیل‌های قرمز رنگ). قابل ذکر است که مقادیر عددی نشان داده شده روی شاخه‌ها مرز بین معادلات را مشخص می‌نمایند.

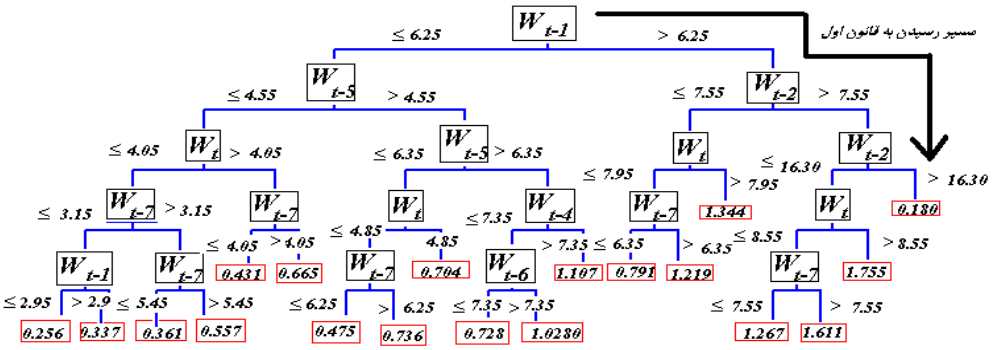
با توجه به ساختار گرافیکی ارائه شده توسط این مدل، تفسیر نتایج به دست آمده از درخت رگرسیونی CART به سادگی امکان‌پذیر است؛ برای نمونه برای به دست آوردن قوانین حاصل از این درخت کافی است از گره ریشه که در بالاترین قسمت درخت قرار دارد به سمت پایین‌ترین قسمت آن حرکت کنیم. برای مثال مسیر رسیدن به قانون اول در درخت رگرسیونی CART در شکل ۱ نشان داده شده است که این مسیر به‌صورت رابطه ریاضی زیر قابل بیان است:

$$If\ (W_{t-1} > 6.25, W_{t-2} > 7.55, W_{t-2} > 16.30) \Rightarrow H_s = 0.180 \quad (۷)$$

همان‌طور که در ساختار درختی ارائه شده نیز قابل مشاهده است، با توجه به ویژگی این الگوریتم یک مقدار عددی ثابت برای دامنه مشخصی از متغیرهای ورودی (سرعت‌های باد در زمان‌های مختلف) جهت تخمین پارامتر هدف (ارتفاع امواج در بندر انزلی) ارائه شده است که در رابطه (۷) قابل مشاهده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]



شکل ۱- درخت رگرسیونی CART جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی

۳-۷ - توسعه مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی

به‌منظور توسعه مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی از یک شبکه پرسپترون ساده با تابع انتقال سیگموئید استفاده شده است.

همواره تعیین و انتخاب بهینه لایه‌های میانی و تعداد نرون‌های این لایه مساله‌ای بحث برانگیزی بوده است. اما مطالعات تئوریک هنریک و همکاران [۲۴] نشان داده است که کاربرد یک لایه میانی می‌تواند جهت مدل‌سازی مسایل پیچیده و غیر خطی مناسب باشد، همچنین تعداد نرون‌های لایه میانی نیز با به‌کارگیری روش سعی وخطا و معیار معرفی شده توسط هچ–نلسون [۲۵]، ۱۸ عدد به دست آمد و درنتیجه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با آرایش بهینه $ANN\ (8\times17\times1)$ برای تخمین ارتفاع امواج به دست آمد. رابطه پیشنهاد شده توسط هچ – نلسون به‌صورت زیر است:

$$N^H \leq 2N^I + 1 \qquad (۸)$$

که در رابطه بالا N^H تعداد نرونها در لایه پنهان و N^I تعداد پارامترهای ورودی است.

۴ – ۷ - توسعه مدل درختان 'M5

با استفاده از مدل درختی'M5، ساختار درختی نشان داده شده درشکل۲ برای تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی به دست آمد.

همان‌طورکه قبلا نیز بیان شد از تفاوت‌های اصلی مدل درختی'M5 با درختان رگرسیونی CART جهت تخمین پارامتر هدف بر اساس متغیرهای ورودی معرفی شده به مدل، ارایه روابط رگرسیونی دربرگ‌های نهایی جهت تخمین ارتفاع امواج است. درحالی‌که درساختار درختیCART مقادیر عددی ثابت در برگ‌های نهایی جهت تخمین ارتفاع امواج به‌دست آمد.

همان طور که در ساختار درختی ارائه شده توسط مدل 'M5 قابل مشاهده است، ۱۵ برگ نهایی (۱۵ مستطیل) در پایین‌ترین قسمت درخت به دست آمده است که تعداد ۱۵ رابطه رگرسیونی را جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی ارائه می‌دهند.

در مدل'M5، مشابه درختان رگرسیونی CART برای رسیدن به هر قانون، کافی است از گره ریشه در بالاترین قسمت درخت به سمت برگ‌های نهایی در پایین‌ترین قسمت درخت حرکت نماییم که مشابه درختان رگرسیونی CART اعداد نشان داده شده روی شاخه‌ها نشان‌دهنده مرز تفکیک بین روابط ارائه شده می‌باشند. روابط رگرسیونی به‌دست آمده از مدل درختی 'M5 جهت تخمین ارتفاع امواج به‌صورت زیر می‌باشند.

$$LM\,1 = 0.0212W_{t-7} + 0.0133W_{t-5} + 0.0184W_{t-3} + 0.0001W_{t-1} + 0.028W_t + 0.0946 \qquad (۹)$$

$$LM\,2 = 0.0168W_{t-7} + 0.034W_{t-5} + 0.0005W_{t-4} + 0.0002W_{t-3} - 0.0005W_{t-2} + 0.0009W_{t-1} + 0.0198W_t + 0.1594 \qquad (۱۰)$$

$$LM\,3 = 0.0014W_{t-7} + 0.0509W_{t-6} + 0.0018W_{t-5} + 0.0047W_{t-4} + 0.0341W_{t-3} - 0.045W_{t-2} + 0.0575W_{t-1} + 0.0069W_t + 0.0216 \qquad (۱۱)$$

$$LM\,4 = -0.076W_{t-7} + 0.008W_{t-6} - 0.0104W_{t-5} + 0.0863W_{t-4} + 0.0002W_{t-3} - 0.0992W_{t-2} + 0.0026W_{t-1} + 0.0232W_t + 0.7507 \qquad (۱۲)$$

$$LM\,5 = -0.0509W_{t-7} + 0.008W_{t-6} - 0.0263W_{t-5} + 0.0739W_{t-4} + 0.0002W_{t-3} - 0.0581W_{t-2} + 0.0026W_{t-1} + 0.0342W_t + 0.723 \qquad (۱۳)$$

$$LM\,6 = 0.0442W_{t-7} - 0.0003W_{t-6} + 0.0145W_{t-5} - 0.0003W_{t-4} + 0.0005W_{t-3} + 0.0001W_{t-1} + 0.0635W_t - 0.0169 \qquad (۱۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

$$LM\ 7 = 0.0026W_{t-7} - 0.0008W_{t-6} + 0.0015W_{t-5} - 0.0009W_{t-4} + 0.001W_{t-3} + 0.0001W_{t-1} + 0.0565W_t + 0.3724 \quad (۱۵)$$

$$LM\ 8 = 0.0026W_{t-7} - 0.0008W_{t-6} + 0.0015W_{t-5} - 0.0009W_{t-4} + 0.001W_{t-3} + 0.0001W_{t-1} + 0.104W_t + 0.3742 \quad (۱۶)$$

$$LM\ 9 = 0.0487W_{t-7} + 0.0245W_{t-6} + 0.0005W_{t-5} + 0.0226W_{t-4} + 0.0004W_{t-3} + 0.0001W_{t-2} + 0.0005W_{t-1} + 0.082W_t - 0.2001 \quad (۱۷)$$

$$LM\ 10 = 0.0483W_{t-7} - 0.0038W_{t-6} + 0.0019W_{t-5} + 0.003W_{t-4} + 0.006W_{t-3} + 0.0102W_{t-2} + 0.0022W_{t-1} + 0.0854W_t - 0.0307 \quad (۱۸)$$

$$LM\ 11 = 0.0126W_{t-7} - 0.0038W_{t-6} - 0.0283W_{t-5} + 0.003W_{t-4} + 0.1523W_{t-3} + 0.0285W_{t-2} - 0.0075W_{t-1} + 0.0258W_t - 0.4175 \quad (۱۹)$$

$$LM\ 12 = 0.1813W_{t-7} - 0.1325W_{t-6} + 0.0019W_{t-5} + 0.0121W_{t-4} + 0.0603W_{t-3} - 0.0015W_{t-2} + 0.0218W_{t-1} + 0.0052W_t + 0.0682 \quad (۲۰)$$

$$LM\ 13 = 0.0648W_{t-7} - 0.0338W_{t-6} + 0.0019W_{t-5} - 0.0104W_{t-4} - 0.0171W_{t-3} - 0.0015W_{t-2} + 0.0356W_{t-1} + 0.0052W_t + 1.0503 \quad (۲۱)$$

$$LM\ 14 = 0.0071W_{t-7} + 0.0104W_{t-5} + 0.0006W_{t-3} - 0.0444W_{t-2} - 0.0109W_{t-1} + 0.015W_t + 1.5704 \quad (۲۲)$$

$$LM\ 15 = 0.0071W_{t-7} + 0.0085W_{t-5} + 0.0006W_{t-3} - 0.0023W_{t-2} - 0.0075W_{t-1} + 0.1092W_t + 0.6518 \quad (۲۳)$$

جهت صحت‌سنجی و ارزیابی کمّی عملکرد مدل‌های ارائه شده، از شاخص‌های آماری نظیر بایاس(*BIAS*)، میانگین متوسط خطا (*MAE*)، جذر میانگین مربعات خطا(*RMSE*) و ضریب همبستگی (*R*) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \quad (۲۴)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i| \quad (۲۵)$$

$$BIAS = \overline{y} - \overline{x} \quad (۲۶)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}} \quad (۲۷)$$

در روابط فوق، x_i نشان‌دهنده پارامتر مشاهداتی و y_i نشان‌دهنده پارامتر پیش‌بینی شده، $\overline{x}$ و $\overline{y}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده میانگین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده و n نیز تعداد داده‌ها می‌باشند.

شاخص‌های آماری مدل‌های محاسباتی نرم توسعه یافته در این تحقیق، با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول۲- شاخص‌های آماری مدل‌هایANN، M5'، MARSو CART برای مجموعه آزمون به‌منظور تخمین ارتفاع امواج در بندرانزلی

مدل	R	RMSE(m)	BIAS(m)	MAE(m)
ANN	۰.۴۲۰۸	۰.۳۲۳۹	-۰.۰۶۶۱	۰.۲۴۶۹
M5'	۰.۴۰۷۸	۰.۳۳۰۴	-۰.۰۶۶۰	۰.۲۵۰۵
MARS	۰.۴۰۵۱	۰.۳۲۷۹	۰.۰۶۶۸	۰.۲۵۱۳
CART	۰.۳۷۱۹	۰.۳۳۶۴	۰.۰۶۳۲	۰.۲۵۵۳

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، شاخص‌های آماری نشان‌دهنده عملکرد مشابه و نزدیک به هم، روش‌های محاسباتی نرم به کار رفته در این تحقیق جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی می‌باشند. با این حال، عملکرد مدل ANN در تخمین ارتفاع امواج اندکی بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد. از طرفی مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل درختی M5' در مقایسه با دو مدل MARS و CART نتایج دست پایین‌تری را ارائه می‌کنند که سبب شده استفاده از نتایج آن‌ها محافظه‌کارانه‌تر باشد. علاوه بر این، قابل ذکر است که هر چند نتایج به‌دست آمده از مدل ANN در مقایسه با دیگر مدل‌های ارائه شده در این مطالعه مطلوب‌تر است، اما ساخت و توسعه مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی و تعیین پارامترهای بهینه آن نظیر تعیین تعداد نرون‌های لایه میانی، تابع انتقال و ...، مساله‌ای پارامتریک بوده که به کاربر بستگی داشته و از این‌رو سبب زمان‌بر شدن ساخت مدل‌ها می‌شود.

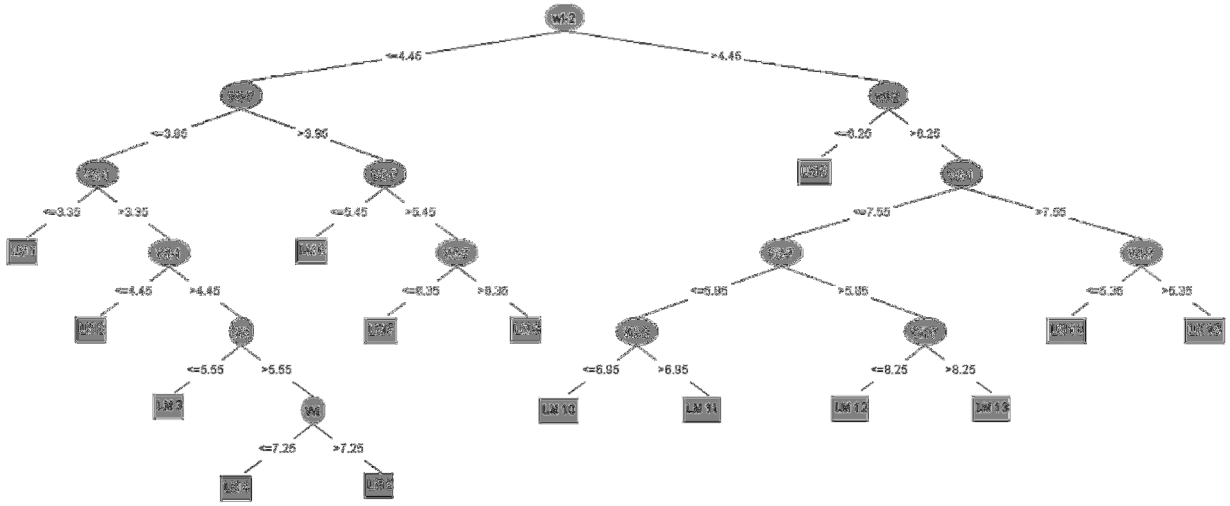
از طرفی مدل‌های M5'، MARS و CART قادر به ارائه روابط ریاضی کاربردی جهت تخمین ارتفاع امواج می‌باشند که می‌توان از آن‌ها در آینده به‌سادگی در تخمین ارتفاع امواج استفاده نمود و برخلاف روش شبکه‌های عصبی مصنوعی که رابطه شفاف و صریحی بین پارامترهای موثر در مساله ارائه نداده و مانند یک جعبه سیاه عمل می‌کنند، این روش‌ها قادر به ارائه معادلاتی هستند که بسته به دامنه پارامترهای ورودی، قابلیت تفکیک به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

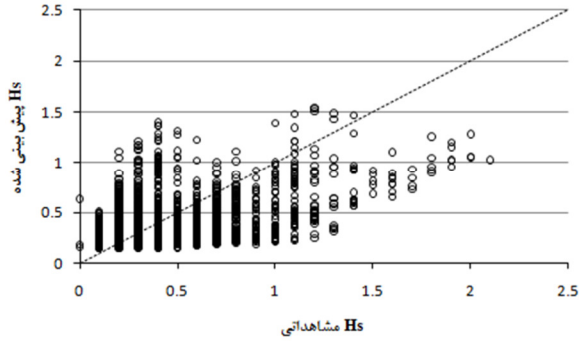
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

معادلات کوچکتر را داشته که همین امر سبب بالا رفتن دقت محاسباتی آنها در مقایسه با ابزارهای رگرسیونی ساده و سنتی می‌شود.

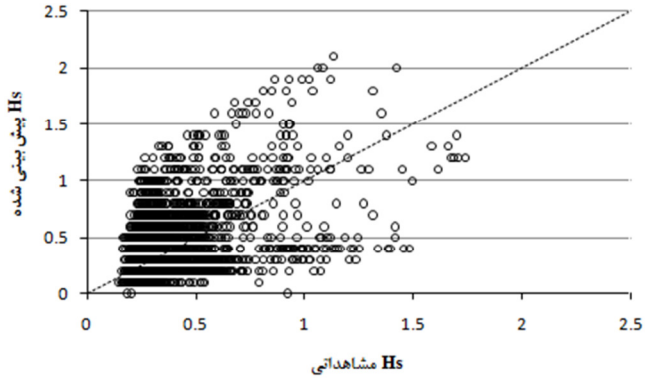
نمودارهای پراکندگی که عملکرد این روش‌ها را به‌صورت گرافیکی نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهند، در اشکال شماره ۳ تا ۶ نشان داده شده‌اند.



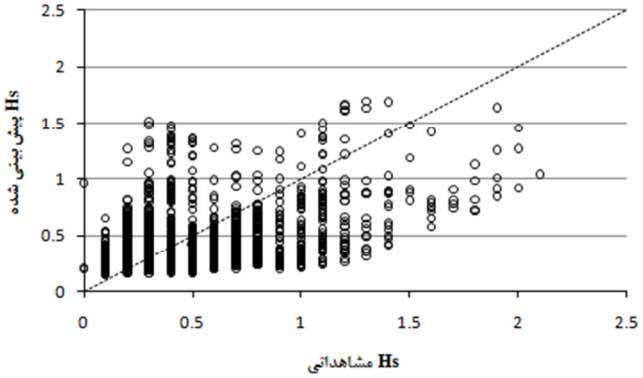
شکل ۲ - : ساختار درختی 'M5جهت تخمین ارتفاع امواج



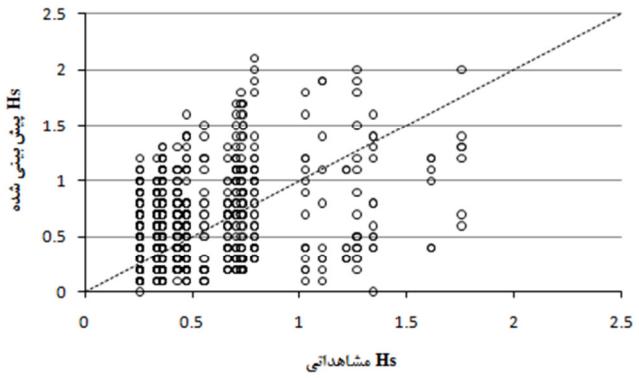
شکل ۳- :مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارتفاع امواج در بندر انزلی توسط روش ANN



شکل ۵- :مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارتفاع امواج در بندر انزلی توسط روش MARS



شکل ۴- :مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارتفاع امواج در بندر انزلی توسط روش 'M5



شکل ۶- :مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارتفاع امواج در بندر انزلی توسط روش CART

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

همان‌طور که در این نمودارهای پراکندگی نیز قابل مشاهده است، داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی پراکندگی کمتری در مقایسه با دیگر مدل‌ها داشته و تمرکز بیشتری پیرامون خط بهینه (۴۵ درجه) دارند، در حالی که داده‌های تخمین زده شده توسط مدل CART بیشترین پراکندگی را داشته و بیان‌گر دقت پایین‌تر این روش می‌باشد.

۸- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه، از مدل‌های محاسباتی نرم شامل مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین، درختان رگرسیونی CART، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل درختی'M5 جهت تخمین ارتفاع امواج در بندر انزلی استفاده شده است. با استفاده از شاخص‌های آماری و نمودارهای پراکندگی عملکرد این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد و ویژگی‌های هر کدام از مدلها نیز در مدلسازی امواج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده دقت نزدیک و قابل رقابت این مدل‌ها می‌باشد. از طرفی مدل MARS، مدل درختان رگرسیونی CART و مدل درختی 'M5 در مقایسه با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای مزایایی هستند که از جمله بارزترین این ویژگی‌ها، می‌توان به ارائه روابط ریاضی کاربردی که ارتباط بین متغیرهای ورودی و پارامترهای هدف را تعیین می‌کنند اشاره نمود. علاوه بر این از روابط ارائه شده توسط این مدل‌ها می‌توان در محاسبات ارتفاع امواج در آینده بدون نیاز به واسطه نرم افزاری استفاده نمود. در حالی‌که در روش شبکه‌های عصبی مصنوعی اطلاعات و دانش مساله در مجموعه وسیعی از ضرائب و وزن‌های اتصالات بین نرون‌ها نگهداری می‌شود و یافتن ارتباط بین متغیرهای ورودی و پارامتر هدف کار دشواری می‌باشد. بنابراین، با توجه به تشابه نسبی مقادیر شاخص‌های خطا در هر سه روش، پیشنهاد می‌شود برای تخمین ارتفاع امواج در محدوده مورد مطالعه یعنی بندر انزلی، از روش‌های 'M5 و MARS که فرمول‌های مربوطه را نیز ارائه می‌نمایند استفاده شود. زیرا دقت این روش‌ها برای پیش‌بینی ارتفاع امواج در انزلی در مقایسه با دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی کافی به نظر می‌رسد.

۹ – تشکر و قدردانی

نویسنده سوم از خانم توران امینی به خاطر زحمات فراوان و حمایت‌های بی‌دریغشان نهایت سپاسگزاری و کمال تشکر را دارد. همچنین از آقای مهندس عباس امینی کمال تشکر و سپاسگزاری خود را ابراز می نماید.

۱۰-مراجع

1 - Jain, P., Deo, M.C., Latha, G., Rajendran, V., (2011), *Real time wave forecasting using wind time history and numerical model*, Ocean Modelling, Vol.36, p. 262-392.

2 - Etemad-Shahidi, A. and Mahjoobi, J., (2009), *Comparison between M5' model tree and neural networks for prediction of significant wave height in Lake Superior*, Ocean Engineering, Vol. 36, p.1175-1181.

3 - Mahjoobi, J. and Adeli Mosabbeb, E., (2009), *Prediction of significant wave height using regressive support vector machines*, Ocean Engineering, Vol. 36, p. 339-347.

4 - Mahjoobi. J. and Etemad-Shahidi., A, (2008), *An alternative approach for the prediction of significant wave heights based on classification and regression trees*, Applied Ocean Research, Vol. 30, p172-177.

5 – Mahjoobi, J., Etemad-Shahidi, A. and Kazeminezhad.,M.H.,(2008), *Hindcasting of wave parameters using different soft computing methods*, Applied Ocean Research, Vol, 30, p. 28-36.

6- Zanaganeh, M., Mousavi, S.J. and Etemad – Shahidi., A, (2009), *A hybrid genetic algorithm–adaptive network-based fuzzy inference system in prediction of wave parameters*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, p. 1194-1202.

7-Mahjoobi, J. and Ardalan Somghi, H., (2009), *Prediction of parameters of wind-induced waves in the caspian sea using regression trees and artificial neuralnetworks*, International Journal of Maritime Technology, Vol. 5, p.65- 71. (In Persian)

8- Nemati., M. and Karami khaniki., A., (2012), *Online Significant Wave Height Prediction in Persian Gulf Using Artificial Neural Networks and Regression Trees*, International Journal of Maritime Technology, Vol. 10, p. 117- 123. (In Persain)

9 - Kamranzad, B., Etemad-Shahidi, A. and Kazeminezhad, M.H., (2011), *Wave height forecasting in Dayyer, the Persian Gulf*, Ocean Engineering, Vol. 38 p.248-255.

10 – Kamranzad., B. and Etemad-Shahidi. A., (2009), *Hindcasting of wave parameters in Boushehr using artificial neural network,* In 8th Iranian hydraulics conference, University of Tehran, Tehran, Iran.(In Persian)

11 –Farjami., H., Hosseini., S.T., Chegini, V., and Mohammadi., S,(2012), *Simulating Wind Driven Waves by SWAN Numerical Wave Model in Bushehr Bay*, Journal of Oceanography, Vol. 2, p.79-87. (In Persian)

12 – Golshani, A., Nakhaee, A., Taebi, S., Chegini, V., and Jandaghi Alaee., M, (2008), *Wave Hindcast Study of the Caspian Sea*, International Journal ofMaritime Technology, Vol. 1, p.55-61.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]

13 – Chegini, F., Chegini, V. and Taebi, S., (2008), *Comparison of Empirical and Numerical Methods in the Prediction of Wave Characteristics in AmirAbad and Bushehr Ports*, International Journal of Maritime Technology, Vol. 4, p.41-57. (In Persian)

14 – Taleghani, M., G. and Golshani., A, (2011), *Study of wave climate in amir abad port using setup of local model and semi-analytical methods*, Journal of the Earth and Space Physics , Vol. 37, p. 193-210. (In Persian)

15 – Golshani, A., (2011), *A 60 years wave hindcast study in the south of persian gulf using SWAN model and semi-time domain method*, International Journal of Maritime Technology, Vol. 6, p.73-87. (In Persian)

16–Kamranzad, B., Etemad-Shahidi, A and Chegini., V., (2013), *Assessment of CGCM 3.1 wind field in the Persian Gulf*, Journal of Coastal Research, Special issue No. 65, p.249-253.

17 - Kamranzad, B.and Etemad-Shahidi, A.and Chegini, V., (2011), *Wind wave hindcasting in Assalouyeh using SWAN*, 4th Offshore Industries Conference, Sharif University of Technology, Tehran, iran. (In Persian)

18- Kamranzad, B. and Etemad-Shahidi, A., (2010), *Comparison of the SWAN model and artificial neural network for wave height hindcasting in the Persian Gulf*, The 9th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), Tehran, Iran. (In Persian)

19– Mazaheri, S., Kamranzad, B. and Hajivalie, F., (2013), *Modification of 32 years ECMWF wind field using QuikSCAT data for wave hindcasting in Iranian Seas*,Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, p.344-349.

20 - Friedman, J.H., (1991), *Multivariate adaptive regression splines, Annals of Statistics*, pp. 1-67.

21- Breiman., L., Friedman., J. H., Olshen., R.A. and Stone., C. J., (1984), *Classification and regression trees*, Belmont, CA: Wadsworth Statistical Press.

22 - Wang., Y, and Witten, I.H., (1997), *Induction of model trees for predicting continuous classes,* In: Proceedings of the Poster Papers of the European Conference on Machine Learning, University of Economics, Faculty of Informatics and Statistics, Prague.

23 - Zamani, A., Solomatine, D., Azimian, A. and Heemink, A., (2008), *Learning from data for wind-wave forecasting*. Ocean Engineering. Vol.35, p. 953–962.

24 - Hornik., K Stinchcombe, M. and White, H., (1989), *Multilayerfeedforward networks are universal approximators*, Neural Networks, p. 359-366.

25 - Hecht-Nielson., R., (1987), *Kolmogorov's mapping neural network existence theorem* , In Proceedings of the first IEEE international joint conference on neural networks, New York, p. 11–14.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.7.9]