یادداشت فنی

مقایسه روش‌های مونت‌کارلو و روش ترکیبی منطق فازی-PSO در مدل‌سازی ارتفاع موج دریا

مریم علیان‌نژاد[۱]، بهرام بختیاری*[۲]، کورش قادری[۳]

[۱]دانشجو کارشناسی ارشد بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ maryam.aliannejad@gmail.com
[۲] استادیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ drbakhtiari@uk.ac.ir
[۳]دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ kouroshqaderi@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

کلمات کلیدی:
ارتفاع موج دریا
پیش‌بینی
چابهار
منطق فازی-PSO
مونت‌کارلو

چکیده

با توجه به اثرگذاری امواج دریا بر فعالیت‌های دریایی، به بررسی ارتفاع موج و تاثیر عوامل مختلف بر این متغیر در منطقه چابهار پرداخته شد. به این منظور از اطلاعات امواج طی سال‌های آماری ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰، برای مدل‌سازی روزانه و آمار ماه‌های بهمن و اسفند سال ۱۳۸۵ برای مدل‌سازی ساعتی استفاده شد. نتایج روش مونت‌کارلو با نتایج حاصل از روش استنتاج فازی مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات مقایسه گردید. نتایج نشان داد روش مونت‌کارلو در هر دو بازه ساعتی و روزانه عملکرد بهتری داشته، به‌طوری‌که ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، شاخص توافق ویلموت و میانگین قدر مطلق خطا به ترتیب برابر ۰/۹۴۱، ۰/۰۸، ۰/۹۸۲۲ و ۰/۰۵۴۵ برای مدل‌سازی ساعتی و ۰/۸۴۹۹، ۰/۱۸۷۸، ۰/۹۴۹۹ و ۰/۱۱۹۹ برای بازه روزانه حاصل شد. در مدل ترکیبی، معیارهای آماری فوق به ترتیب برابر با ۰/۹۱۱، ۰/۱۰۶۵، ۰/۹۶۴۷ و ۰/۰۶۹۸ برای مدل‌سازی ساعتی و ۰/۸۳۱۶، ۰/۲۲۲۵، ۰/۹۱۰۹ و ۰/۱۶۶۵ برای مدل‌سازی روزانه بدست آمد. مقایسه نتایج، حاکی از عملکرد مناسب مدل مونت‌کارلو در مدل‌سازی ارتفاع موج برای این منطقه بوده است.

Comparative Study of Sea Wave Height Modeling Using Monte Carlo Methods and Fuzzy Logic

Maryam Aliannejad[1], Bahram Bakhtiari[2], Kourosh Qaderi[3]

[1]M.Sc. Student of Water Resource Engineering, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran;
[2]Assistant Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran;
[3]Associate Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Feb. 2016
Accepted: 13 Mar. 2017

Keywords:
Sea Wave height,
prediction,
Monte carlo,
PSO-Fuzzy logic,
Chabahar

ABSTRACT

Considering the effect of wave on marine activities in Chabahar, different factors influencing the wave height were considered in the present study. For this purpose, the daily data of the year 2007-2011 and hourly data consisting of two month data of the year 2006 were employed. The results of the proposed method were compared with the results of the fuzzy logic based on PSO algorithm. The Monte Carlo method had a better performance for both hourly and daily data.So that R^2, RMSE, d And MAE predict 0.941, 0.08, 0.9822 and 0.0545 for hourly prediction and 0.8499, 0.1878, 0.9499 and 0.1199 for daily forecasting respectively. also in prediction by Fuzzy logic based on PSO algorithm, this parameters is 0.911, 0.1065, 0.9647, 0.0698 for hourly prediction and 0.8316, 0.2225, 0.9109 and 0.1665 for daily prediction that show the high ability of Monte Carlo in wave height prediction in this Region.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

۱- مقدمه

مطالعه خصوصیات امواج از نظر اثرات آن در مهندسی سواحل دارای اهمیت می‌باشد. همچنین به علت اثرگذاری عوامل مختلف بر ارتفاع و پریود امواج رسیده به سازه‌های دریایی، مدل‌سازی دقیق این پارامترها امری ضروری است، لذا پژوهشگران تلاش نموده‌اند که بر اساس اطلاعات هواشناسی و سایر پارامترهای مؤثر در تشکیل امواج، آن‌ها را در محل مورد نظر مدل‌سازی نمایند [۱]. امروزه پژوهشگران با ابداع و پیشرفت علومی چون روش‌های هوشمند که ابزاری توانمند، انعطاف‌پذیر و مستقل از مدل‌های دینامیکی سیستم هستند، در جستجوی راه‌هایی برای پیشرفت و مدل‌سازی پارامترهای مهم هواشناسی نظیر باد و اثر آن بر ارتفاع امواج و بارش می‌باشند [۲]. مطالعه بر روی امواج ناشی از باد سابقه طولانی دارد، ولی می‌توان گفت که جامع‌ترین و کامل‌ترین توصیف و تشریحی که بر روی امواج ناشی از باد انجام شده است به سال ۱۹۵۷ برمی‌گردد، که فیلیپس و مایلز با ارائه دو مکانیزم تشدید و بازخورد فرآیند شکل‌گیری امواج ناشی از باد را تشریح کردند. بعدها بیشتر توجه دانشمندان به سوی تشریح طیف انرژی و ارائه مدل امواج معطوف گشت و ده‌ها طیف انرژی و مدل برای امواج مطرح شد [۳، ۴، ۵]. ژنگ و همکارانش (۲۰۱۶) از مدل تجربی چرخش متعامد برای برآورد ارتفاع موج شاخص با استفاده از داده‌های گرفته شده از رادار دریایی استفاده کردند. نتایج نشان دهنده همبستگی خوبی بود که بیان کننده نتیجه بخش بودن برآورد ارتفاع موج شاخص بود [۶]. نایینی و کرباسی (۱۳۹۴) در تحقیق خود با استفاده از مدل‌سازی عددی، الگوی امواج و جریانات دریایی در منطقه بندر شهید رجایی را مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی با استفاده از مدل نسل سوم Mike 21 انجام پذیرفته است. مدل‌سازی امواج تحت تاثیر باد و با اعمال داده‌های موج واقعی برداشت شده در مرزهای غربی، جنوبی و شرقی، انجام شد. نتایج نشان دهنده این است که احداث سازه دایک حفاظتی در مجاورت موج‌شکن غربی به طور میانگین ۱۲٪ بر ارتفاع مشخصه امواج در این نقطه و ۷٪ بر تراز سطح آب می‌افزاید [۷]. عابد علم‌دوست و کراچیان (۲۰۱۲) به مدل‌سازی ارتفاع موج با استفاده از نظریه مجموعه‌های ناهموار (RST) در دریاچه سوپریور در شمال آمریکا پرداختند. نتایج مقایسه با دیگر تکنیک‌های محاسبات نرم مانند ماشین بردار پشتیبان (SVM)، شبکه‌های بیزین (BNS)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) نشان داد که روش RST در پیش‌بینی ارتفاع موج نسبت به دیگر روش‌ها برتری داشته است [۸]. امانی داشلجه و بنکدار (۱۳۸۷) برای پیش‌بینی ارتفاع موج ساحل جنوبی شهر بندرعباس به وسیله شبکه عصبی، طول موجگاه، سرعت باد و دوره بازگشت را به عنوان پارامترهای ورودی موثر انتخاب کردند. مقایسه نتایج حاصل از شبکه ساخته شده با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی نشان دهنده دقت مناسب و قابلیت بالای شبکه در پیش‌بینی ارتفاع و پریود امواج بوده است [۹]. کریشنا کومار و همکارانش (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه عصبی یادگیرنده پی در پی به مدل‌سازی ارتفاع موج اقیانوس پرداختند. مقایسه عملکرد بین MRAN و GAP-RBF نشان می‌دهد که MRN با حداقل ساختار عملکرد بهتری نسبت به GAP_RBF دارد [۱۰]. پورنعمت رودسری و همکاران (۱۳۹۰) به پیش‌بینی ارتفاع موج دریای مازندران با رویکرد استقرایی GMDH پرداختند. نتایج حاصل از توسعه مدل، حاکی از عملکرد بالای این روش در پیش‌بینی و شناسایی روابط پیچیده بین متغیرها در مسائل مختلفی نظیر پیش‌بینی ارتفاع امواج دریا می‌باشد [۱۱]. محمدرضاپور طبری و سلطانی (۱۳۹۲) به بررسی مدل پیش‌بینی جریان رودخانه منطقه طالقان با استفاده از سیستم فازی و الگوریتم PSO پرداختند. نتایج نشان دهنده دقت بالای استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کاربرد منفرد استنباط فازی است [۱۲].

در این مطالعه با توجه به توانایی روش مونت‌کارلو و منطق فازی در مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت بالا به مدل‌سازی ارتفاع موج با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط بویه در منطقه چابهار پرداخته‌شده است. از نوآوری این تحقیق می‌توان به آزمون و کاربرد روش مونت‌کارلو و تلفیق روش‌های منطق فازی-PSO در مدل‌سازی امواج دریا که دارای عدم قطعیت می‌باشد، نام برد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه آزاد چابهار در منتهی‌الیه جنوب شرقی ایران در ۲۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این خلیج به خاطر شکل حلقه‌ای (Ω) خود در زمین‌شناسی از نوع خلیج امگایی یا نعلی شکل می‌باشد. چابهار دارای ۱۱ کیلومتر مربع مساحت و ۵۹۲۰ کیلومتر سطح آب‌های ساحلی می‌باشد [۱۳].

در این مطالعه از داده‌های ساعتی و روزانه منطقه استفاده شده است. متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول۱- مشخصات ارتفاع موج، دمای آب و متغیرهای هواشناسی موثر بر ارتفاع موج طی دوره مطالعات در منطقه چابهار

	ارتفاع موج شاخص(m)	سرعت باد (ms^{-1})	دمای هوا (ºC)	دمای آب (ºC)	فشار هوا (Hpa)	سرعت تند باد(ms^{-1})	رطوبت نسبی(%)
بیشترین	۳/۱۵	۱۱/۸	۳۳	۳۸	۱۰۲۳	۱۶	۹۹
میانگین	۰/۶۱	۲/۹	۲۶	۲۵	۱۰۰۵	۴	۶۴
کم‌ترین	.	۰/۱	۱۵	۹	۹۸۰	۰/۸	۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

۲-۲- روش مدل‌سازی مونت‌کارلو

روش مونت‌کارلو برای سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت زیاد مانند اغتشاش در سیالات، محیط‌های ناهمگن[۲]، ساختارهای سلولی[۳] و یا سامانه‌های با ورودی‌های نامعین با موفقیت به کار می‌رود [۱]. هر الگوریتم محاسباتی و مدل‌سازی مونت‌کارلو در شکل ساده یا پیچیده شامل چند جز اصلی است. این اجزا عبارت از اعداد تصادفی، تابع توزیع احتمال، قواعد نمونه‌برداری، تخمین خطا و کاهش انحراف معیار پراکندگی، موازی‌سازی- بردارسازی محاسباتی و الگوریتم متروپلیس هستند. هسته اصلی هر روش مدل‌سازی تصادفی یا روش مونت‌کارلو بر مبنای استفاده مداوم از اعداد تصادفی است [۱۴]. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. روال اصلی انجام محاسبات با این روش، برای هر فرآیند کمابیش مشابه باهم هستند که این تحقیق به شرح زیر است :

- تعریف دامنه ورودی‌های ممکن
- تولید ورودی‌های تصادفی از دامنه و اجرای یک عملیات قطعی بر روی آن‌ها
- جمع‌بندی نتایج حاصل از تک تک محاسبات با هدف حداقل نمود میزان خطای RMSE

۲-۳- الگوریتم فازی- PSO[۴]

الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که از مدل واقعی در طبیعت الهام گرفته شده است. این مدل از رفتار جمعی پرندگان در یافتن غذا بهره می‌گیرد، بدین ترتیب که جمعیتی متشکل از یک سری ذرات تشکیل می‌دهد که هر ذره معرف یک پرنده در فضای جستجو است و PSO با به هنگام بودن موقعیت ذرات و با توجه به میزان جمعیت، آنها را به سمت جواب بهینه هدایت می‌کند. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن که جواب مورد نظر به دست آید [۱۵]. مقدار فاصله برای هر جواب، تخمینی از چگالی جواب‌ها در اطراف آن است.

۲-۴- منطق فازی

در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر، یا عضو مجموعه هست یا نیست. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را بسط می‌دهد و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملا عضو یک مجموعه باشد.

منطق فازی را از طریق قوانینی که "عملگرهای فازی" نامیده می‌شوند، می‌توان به‌کار گرفت. با توجه به این که تدوین قوانین فازی نیاز به سعی و خطا و بیان محدودیت‌های غیر ضروری دارد و کاری زمانبر است، برای افزایش کارایی مدل فازی و تدوین قوانینی که بیانگر رفتار سیستم مورد نظر باشد، از الگوریتم PSO استفاده شد. تعداد کل متغیرهای تصمیم (مجهولات) در نظر گرفته شده در این مدل برابر با ۴۰ عدد برای قله منحنی و انحراف معیار در توابع عضویت می‌باشد که با توجه به ۳ متغیر ورودی (سرعت باد، سرعت تندباد و ارتفاع موج با یک واحد تاخیر) و ۱ متغیر خروجی (ارتفاع موج)، در مجموع ۴ متغیر تعریف می‌گردد که هر یک شامل یک تابع عضویت گوسی است. ۲۰ عدد برای مشخص نمودن نحوه ترکیب ۵ تابع عضویت به کار گرفته شد که ۵ عدد آن برای متغیرها نشان دادن نوع ارتباط And یا Or در هر قانون استفاده شد.

تابع هدف در این مدل بهینه‌سازی، حداقل نمودن مجذور متوسط مربعات خطای داده‌های مشاهده‌ای با مقادیر مدل‌سازی شده است. لازم به ذکر است معیار خطای انتخاب شده می‌تواند متفاوت باشد که تاثیر زیادی در جواب‌های بهینه نخواهد داشت.

محدودیت‌ها:

$$Z = \text{Minimize}\left(\sqrt{(y_c - y_o)^2 / n}\right) \quad (۱)$$

$$y_c = \int \mu_{B^r}(Z)\,dz \quad (۲)$$

$$\mu_{B^r} = \max_{r}\left[R^r\left[\mu_{A_i^r}(I_1), \mu_{A_{i2}^r}(I_2), \mu_{A_{i3}^r}(I_3)\right]\right] \quad (۳)$$

$$i = 1,2,3,4 \ , \qquad r = 1,2,3,4,5$$

$$X_i^{MF} = \begin{bmatrix} x(1,2,3,4,5) \\ x(6,7,8,9,10) \\ x(11,12,13,14,15) \\ x(16,17,18,19,20) \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$R^r = \begin{cases} \min, if x^t = 1 \\ \max, if x^t = 2 \end{cases} \quad (۵)$$

$$X^i = [x(21,22,23,24)] \quad (۶)$$

$$X^t = [x(25,26,27,\ 28)] \quad (۷)$$

$$X_i^{MF} = \begin{bmatrix} x(29,30,31,32) \\ x(33,34,35,36) \\ x(37,38,39,40) \\ x(41,42,43,44) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

که در آن‌ها y_c مقدار متغیر خروجی مدل‌سازی شده با استفاده از سیستم استنتاج فازی، y_o مقدار متغیر خروجی اندازه‌گیری شده، $\mu_{B^r}(Z)$ مقادیر درجه عضویت متغیر خروجی برای قانون r ام که با استفاده از استلزام ممدانی به دست آمده است، R^r مشخص کننده نوع عملگر ارتباطی بین ورودی‌ها (نوع عملگر ارتباطی می‌تواند "یا" و "و" باشد)، $\mu_{A_i^r}(I_i)$ مقدار درجه عضویت به ازای ورود متغیر I_i ام در تابع عضویت گوسی متغیر i از قانون r ام، X_i^{MF} انحراف معیار تابع عضویت مرتبط با متغیر iام در قانون r ام، i تعداد متغیرهای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده در سیستم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

استنتاج فازی، r تعداد قوانین مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی، n تعداد کل داده‌های مورد استفاده، اعم از ورودی و خروجی، X^i مقداری بین صفر و یک که بیان‌کننده نوع ارتباط متغیرهای ورودی و خروجی، X^i عدد صحیح یک یا دو مشخص‌کننده نوع عملگر ارتباطی بین ورودی‌ها، X ماتریسی شامل متغیرهای تصمیم، اعم از قوانین فازی، انحراف معیار توابع عضویت و نوع ارتباط بین تابع عضویت متغیرها، I_i ماتریسی مشتمل بر سری زمانی iام اندازه‌گیری شده، i تعداد متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی (۳ متغیر ورودی و ۱ متغیر خروجی به منظور مدل‌سازی ارتفاع موج مورد توجه قرار گرفته است) و r تعداد تابع عضویت برای هر متغیر ورودی و خروجی است. تابع هدف مدل تدوین شده، حداقل نمودن میزان خطای RMSE مقادیر مدل‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی و مقادیر واقعی است.

۲-۵- معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص‌های آماری ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا[۵]، میانگین قدر مطلق خطا[۶]، مربع میانگین خطای استاندارد[۷]، مربع میانگین خطای استاندارد نرمال شده[۸]، میانگین قدر مطلق درصد خطا[۹] و شاخص توافق ویلموت[۱۰] بهره برده شده است که در معادلات (۹) تا (۱۵) آورده شده‌اند [۱۶].

$$R^2 = \left(\frac{\sum\left(O_i - \overset{\bullet}{O}\right)\left(S_i - \overset{\bullet}{O}\right)}{\sqrt{\sum\left(x - \overset{\bullet}{x}\right)^2 \times \sum\left(S_i - \overset{\bullet}{S}\right)^2}} \right)^2 \quad (۹)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum^{i=1n}(S_i - O_i)^2} \quad (۱۰)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum^{i=1n}|S_i - O_i| \quad (۱۱)$$

$$d = 1 - \frac{\sum^{i=1n}(S_i - O_i)^2}{\sum^{i=1n}\left(\left|S_i - \overset{\bullet}{S}\right| + \left|O_i - \overset{\bullet}{O}\right|\right)^2} \quad (۱۲)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n} \quad (۱۳)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{S_i})^2} \quad (۱۴)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{O_i - S_i}{O_i}\right| \quad (۱۵)$$

که در آن‌ها x_i مقدار مشاهده شده در گام زمانی iام، x_{max} بیشترین مقدار مشاهداتی و x_{min} کمترین مقدار مشاهداتی می‌باشد[۱۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل‌سازی ارتفاع موج ساعتی به روش ترکیبی

پس از اجرای مدل ترکیبی برای داده‌های ساعتی مقادیر قوانین بهینه شده با استفاده از مدل PSO به صورت مختصر در زیر اجرا شد. در این قوانین کلمات اختصاری VL، L، M، H، VH در توابع عضویت به ترتیب نشان دهنده معیار خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند:

1. If (Wh_1 is M) and (Hs_1 is M) and (Ws_1 is L) then (Wh is M).
2.If (Wh_1 is L) and (Hs_1 is L) and (Ws_1 isM) then (Wh is L).
3. If (Wh_1 is M) or (Hs_1 is M) or (Ws_1 is M) then (Wh is M).

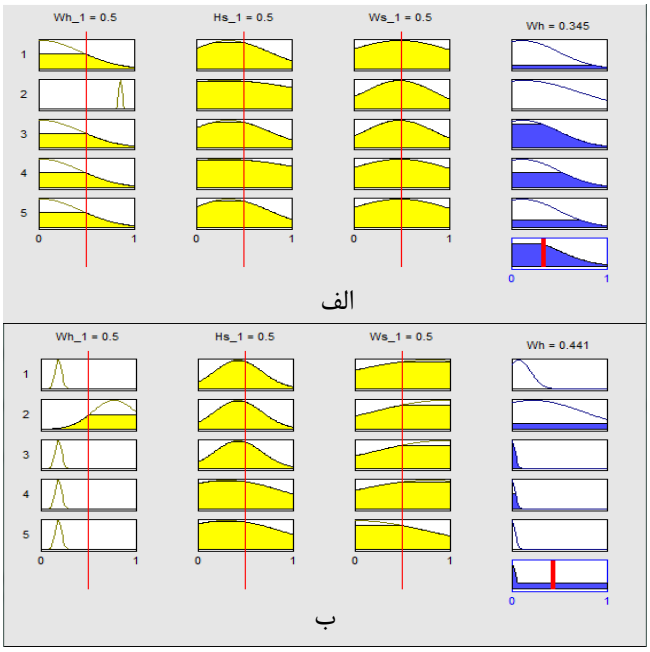
که Wh_1 ارتفاع موج با یک ساعت تاخیر، Hs_1 سرعت تند باد با یک ساعت تاخیر، Ws_1 سرعت باد با یک ساعت تاخیر و Wh ارتفاع موج مدل‌سازی شده می‌باشد.

مفهوم قوانین به دست آمده بالا به این صورت است که به عنوان نمونه برای قانون اول: اگر ارتفاع موج با یک ساعت تاخیر متوسط، سرعت تند باد با یک ساعت تاخیر متوسط و سرعت باد با یک ساعت تاخیر کم باشد، ارتفاع موج، متوسط خواهد بود. به همین ترتیب مقادیر عددی مورد اشاره وارد قانون دوم و سوم شده و بر اساس نوع ارتباطی که برای هر قانون تعریف شده است، مقادیر خروجی متناظر با آن به دست می‌آید. در مرحله آخر به ازای مقادیر مختلف ارتفاع موج در ایستگاه چابهار با توجه به بازه تغییرات ارتفاع موج در این ایستگاه، بیشترین مقدار خروجی از بین خروجی‌های حاصل شده از هر قانون، انتخاب و به عنوان تکمیل کننده تابع عضویت نهایی سیستم در نظر گرفته می‌شود. این عدد فازی به دست آمده بیانگر خروجی سیستم در نتیجه ورودی‌های داده شده است.

شکل ۳ نحوه تعیین میزان ارتفاع موج خروجی ساعتی و روزانه را در مقایسه هم نشان می‌دهد. مطابق این شکل به منظور تعیین مقدار ارتفاع موج، مقادیر اندازه‌گیری شده (ورودی‌های سیستم) وارد توابع عضویت هریک از قوانین می‌شوند. در این حالت ممکن است یک ورودی وارد تابع عضویت بخشی از قوانین شده و به ازای تابع عضویت، برخی از قوانین نتوانند درجه تعلق خاصی را برای آن در نظر بگیرند. سپس بر اساس استلزام ممدانی، خروجی قوانین با هم ترکیب می‌شود. این روند تا تکمیل تابع عضویت خروجی خصوصا با توجه به بازه تغییرات خروجی هر یک از قوانین ادامه می‌یابد. پس از این مرحله، خروجی نهایی سیستم که همان مقدار ارتفاع موج مدل‌سازی شده می‌باشد، به صورت فازی به دست می‌آید. برای بیان این خروجی به صورت عدد کلاسیک لازم است از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

روش‌های غیر فازی‌ساز مانند مرکز ثقل استفاده نمود. مقادیر ارتفاع موج مدل‌سازی شده با ترسیم در مقایسه با مقادیر مشاهداتی را می‌توان به دقت مورد ارزیابی قرار داد که این نمودارها در شکل‌های ۳- ب و ۵- ب ارائه شده است.



شکل۱- ساختار فازی حاصل از مدل ترکیبی
الف) بازه ساعتی، ب) بازه روزانه

۳-۲- مدل‌سازی ارتفاع موج روزانه به روش ترکیبی

مقادیر قوانین بهینه شده با استفاده از مدل PSO به صورت بیان شده است.

1. If (Wh_1 is M) and (Hs_1 is M) and (Ws_1 is L) then (Wh is L).
2. If (Wh_1 is L) and (Hs_1 is M) and (Ws_1 is E) then (Wh is VL).
3. If (Wh_1 is M) or (Hs_1 is M) or (Ws_1 is H) then (Wh is M).

مفهوم و روند قوانین به دست آمده بالا مانند قوانین ساعتی بیان می‌شود.

۳-۳- نتایج بازه زمانی ساعتی روش مونت‌کارلو

در این پژوهش با استفاده از داده‌های ساعتی ارتفاع موج ثبت شده در بویه موج‌نگار سازمان بنادر و کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران و همچنین داده‌های آب- هواشناسی[11] شامل سرعت و جهت باد، سرعت تندباد، فشار و دمای هوا، دمای آب و رطوبت به مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص[12] با استفاده از روش مونت‌کارلو پرداخته شده است.

معادله تجربی بدست آمده از این روش با استفاده از یک زمان تأخیر در داده‌ها در معادله ۱۶ آمده است.

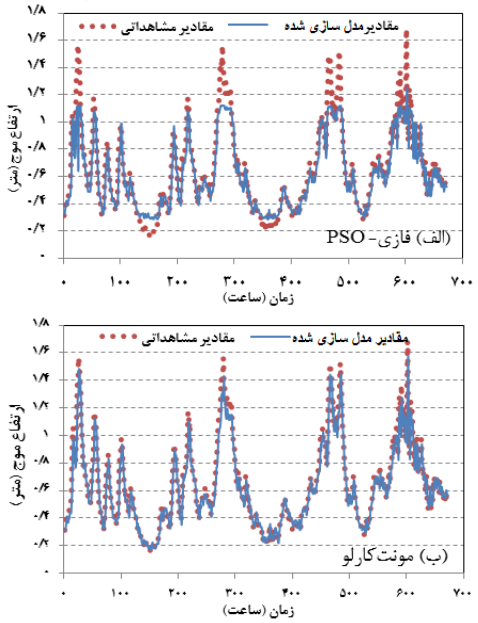
$$\begin{aligned} Wh(i+1) &= A(1)^{*} Wh(i) + A(2)^{*} Pa(i) \\ &+ A(3)^{*} Ta(i) + A(4)^{*} M(i) + A(5)^{*} Tw(i) \\ &+ A(6)^{*} Wd(i) + A(7)^{*} Hs(i) + A(8)^{*} Ws(i) \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که در آن Wh ارتفاع موج، Pa فشار هوا، Ta دمای هوا، M رطوبت، Tw دمای آب، Wd جهت باد، Hs سرعت تندباد، Ws سرعت باد، i شمارنده زمان و A ماتریس ضرایب می‌باشد. ماتریس ضرایب که توسط روش مونت‌کارلو بهینه شد در معادله ۱۷ آورده شده است.

$$A = \begin{bmatrix} 0.9046, -0.017, -0.0087, 0.0049 \\ , 0.039, 0.027, 0.012, 0.011 \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

همان‌طور که در روابط ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود با توجه به این‌که ضریب ارتفاع موج با یک ساعت تاخیر برابر ۰/۹۰۴۶ می‌باشد می‌توان این برداشت را نمود که این پارامتر بیشترین تاثیر در مدل‌سازی ارتفاع موج ساعتی دارد. همچنین سرعت باد، سرعت تند باد و جهت باد با ضرایب مثبتی که دارند تاثیر مثبتی در ارتفاع موج دارند. همان‌طور که شکل۲- ب نشان می‌دهد، در مدل‌سازی با روش مونت‌کارلو دقت پیش‌بینی تقریبا برای تمام مقادیر مناسب بوده در صورتی که این دقت با استفاده از روش ترکیبی آن‌چنان که باید، جوابگوی پیش‌بینی نبوده است.

همانطور که در شکل ۳- الف مشاهده می‌شود، روش مونت‌کارلو با ضریب تبیین ۰/۹۴۱ نسبت به مدل ترکیبی استنتاج فازی مبتنی بر الگوریتم PSO، با ضریب تبیین ۰/۹۱۱ برتری محسوسی داشته و توانسته با دقت مناسب‌تری ارتفاع موج در منطقه چابهار را مدل‌سازی کند.



شکل۲- مقایسه ارتفاع موج ساعتی مشاهداتی و مدل‌سازی شده
الف) روش ترکیبی، ب) مونت‌کارلو

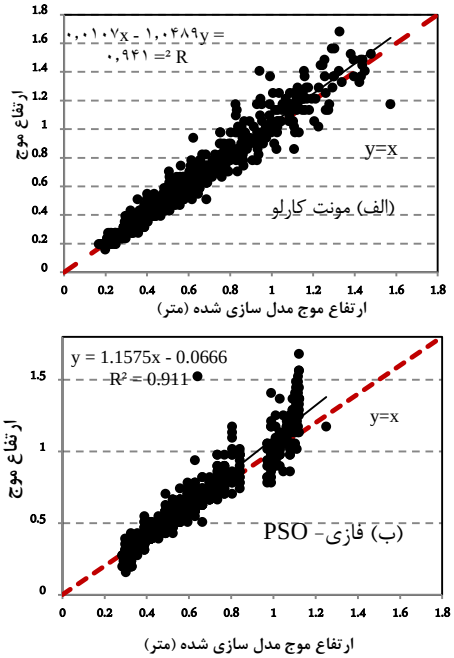
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

۳-۴- نتایج بازه زمانی روزانه روش مونت‌کارلو

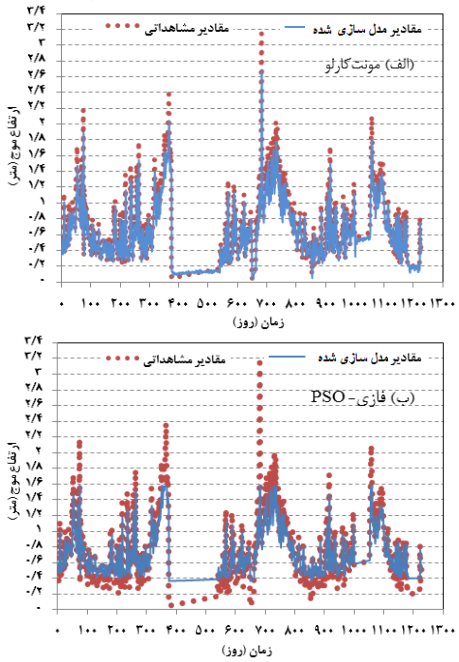
با توجه به این‌که ضریب ارتفاع موج و سرعت باد با یک روز تاخیر به ترتیب برابر ۰/۸۰۳۸ و ۰/۳ می‌باشند که نشان می‌دهد این دو پارامتر بیشترین تاثیر را در مدل‌سازی ارتفاع موج دارند.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۶ و مقایسه روش مونت‌کارلو در دو بازه ساعتی و روزانه مشاهده می‌شود که این روش در مدل‌سازی ساعتی موفق‌تر از بازه روزانه عمل کرده این دقت نشان‌دهنده اثرگذاری داده‌های دقیق و از نظر زمانی نزدیک به هم در مدل‌سازی ارتفاع موج است که حاکی از اثرگذاری پارامترها بر روی یکدیگر در کوتاه مدت در طبیعت است. در شکل‌های ۲ و ۴، برای روش ترکیبی می‌توان مشاهده کرد که توانایی این روش بیشتر در مدل‌سازی ارتفاع موج متوسط است و توانایی کمتری در پیش‌بینی مقادیر اکسترمم دارد که علت آن را می‌توان محدودیت روش فازی بیان کرد.

در شکل ۵ نمودار مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در مقابل هم آورده شده است که برتری روش مونت‌کارلو را در بازه زمانی روزانه نیز ثابت می‌کند. قوانین وجود ندارد، با استفاده از الگوریتم PSO، پنج قانون از بین قوانین موجود که در مدل‌سازی بیشترین تاثیر را دارد، مورد استفاده قرار گرفت. به نظر می‌رسد با توجه به این‌که مقادیر خیلی زیاد و خیلی کم برای ارتفاع موج احتمال وقوع کمتری دارند، جزو قوانین تاثیرگذار فازی قرار نگرفته و یکی از نقاط ضعف این روش دقت پایین در مدل‌سازی نقاط اکسترمم

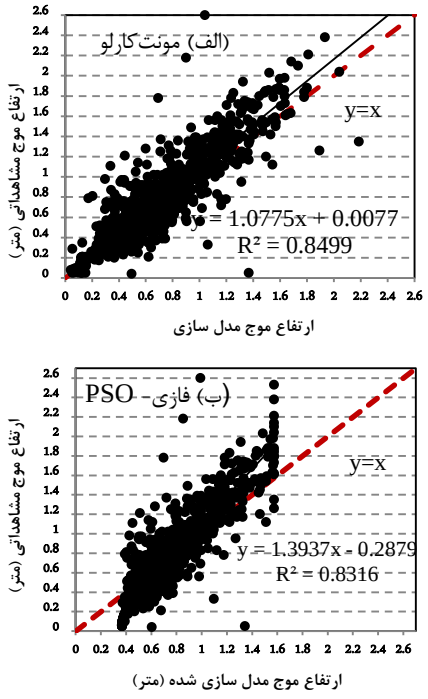


شکل۳- مقادیرساعتی ارتفاع موج مشاهداتی در مقابل مقادیر مدل-سازی شده الف) مونت‌کارلو، ب) منطق فازی–PSO



شکل۴- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی شده الف) مونت‌کارلو، ب) منطق فازی-PSO

می‌باشد. در جدول ۲ نتایج کلی مدل‌سازی به دو روش مونت‌کارلو و فازی در دو بازه ساعتی و روزانه آمده است. در این جدول علاوه بر مقدار ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا ، میانگین قدر مطلق خطا، مربع میانگین خطای استاندارد، مربع میانگین خطای استاندارد نرمال شده، میانگین قدر مطلق درصد خطا و شاخص توافق ویلموت نیز آمده است. به وسیله این جدول می‌توان میزان اختلاف داده‌های مدل‌سازی شده و داده‌های محاسبه شده را



شکل۵- مقادیر روزانه ارتفاع موج مشاهداتی در مقابل مقادیر مدل‌سازی شده الف) مونت‌کارلو، ب) منطق فازی-PSO

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

مشاهده کرد همچنین می‌توان برتری روش مونت‌کارلو بر روش ترکیبی را دید. با توجه به مدل استفاده شده در روش مونت‌کارلو، مناسب‌ترین جواب هنگامی رخ داد که از تمامی پارامترهای موجود برای مدل‌سازی استفاده شد. در حالی که در بخش فازی-PSO تنها از سه متغیر سرعت باد، سرعت تند باد و ارتفاع موج به عنوان متغیرهای موثر استفاده شد و نتایج به دست آمده نیز بیانگر صحت این گزینش بود.

جدول۲- نتایج حاصل از ارتفاع موج مشاهداتی با محاسباتی به دو روش مونت‌کارلو و روش ترکیبی منطق فازی _PSO

روش‌ها	مونت کارلو		فازی- PSO	
بازه زمانی	ساعتی	روزانه	ساعتی	روزانه
RMSE	۰/۰۵۴۵	۰/۱۸۷۸	۰/۱۰۶۵	۰/۲۲۲۵
MAE	۰/۹۸۲۲	۰/۹۹۱۱	۰/۰۶۹۸	۰/۱۶۶۵
d	۰/۹۴۱	۰/۹۹۴۹	۰/۹۶۴۷	۰/۹۱۰۹
R^2	۰/۰۸	۰/۹۹۸۴	۰/۹۱۱	۰/۸۳۱۶
MAPE	۸/۳۲۸۶	۲۳/۱۱۱۸	۱۱/۳۵۰۸	۶۵/۴۵۷۳
MSE	۰/۶۴۰۰	۰/۰۳۵۳	۰/۰۱۱۴	۰/۰۴۹۵
NMSE	۰/۰۶۵۱	۰/۱۶۸۷	۰/۱۱۵۴	۰/۲۳۶۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از دو روش مونت‌کارلو و منطق فازی-PSO به مدل‌سازی ارتفاع موج در دو بازه ساعتی و روزانه برای منطقه چابهار پرداخته شد. به منظور بکارگیری داده‌ها در هر دو روش، ابتدا داده‌ها به صورت نرمال در آمدند که این امر موجب تسریع کار و افزایش دقت در هر دو روش گردید. نتایج حاصل شده حاکی از عملکرد رضایت بخش هر دو روش در هر دو بازه می‌باشد، به گونه‌ای که ضریب تبیین برای روش ترکیبی در بازه ساعتی۰/۹۱۱ و در بازه روزانه ۰/۸۳۱۶ و برای روش مونت‌کارلو در به ترتیب ۰/۹۴۱ و ۰/۸۴۹۹ بدست آمد. روش مونت‌کارلو برای نقاط اکسترمم دقت قابل توجهی از خود نشان داد که کارآمد بودن روش مونت‌کارلو را در مسائل آب- هواشناسی که تا پیش از این در این زمینه کمتر استفاده شده است ثابت می‌کند؛ که کارا نبودن روش ترکیبی برای این داده‌ها به این علت است که با توجه به اینکه مقادیر داده‌های اکسترمم به ندرت اتفاق می‌افتد و روش منطق فازی در تعداد قوانین محدود است، باعث می‌شود دقت آن در نقاط اکسترمم پایین‌تر از روش مونت‌کارلو باشد. لازم به ذکر است، همواره نمی‌توان گفت که در تمامی موارد عملکرد مونت‌کارلو بهتر خواهد بود، چه بسا روی یک سری از داده‌های دیگر روش ترکیبی عملکرد مناسب‌تری داشته باشد.

1- European Center for Medium Range Weather Forcasting
2- Disordered media
3- Cellular structure
4- Particle Swarm Optimization
5- Root-Mean-Squared-Error
6- Mean Absolute Error
7- Mean Square Error
8- Normalized Mean Square Error
9- Mean Absolute Percent Error
10- Willmott's index of agreement
11- Hydrometeorology
12- Significant wave height

۳- مراجع

1- Derakhshan, S., Gharabaghi, A. and Chenaghlu., (2004), *Prediction of sea waves specification by experimental methods in Bushehr*, 1st national congress on civil engineering, Sharif University of Technology, In Persian.

2- Khalili, N., (2006), *Rain prediction by Neural Networks*, M. Sc. thesis of water engineering, Ferdowsi University of Mashhad, In Persian.

3- Lari, K., Pourmandi Yekta, A. and Mehdipour, F., (2000), *Wind waves prediction by the statistical model based on neural network in Bushehr Province*, 4thinternational conference on coasts, port and marine structures. Bandar Abbas, In Persian.

4- Pierson, W.J. and Moskowitz, L., (1964), A *Proposed Spectral Form for Developed Wind Sea Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii*, Journal of Geophisical Research, Vol. 69, P. 5181-5190.

5- Hasselmann, K., Barnet, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing., J.A., Gienapp, H. Hasselman, D. E. Kruseman, P. Meerburg, A.Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H., (1973), *Measurement of Wind–Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Report, German Hydrographic Institute, Hamburg.

6- Zhang, S., Zhanjie, S. and Ying, L., (2016), *An advanced inversion algorithm for significant wave height estimation based on random field*, Ocean Engineering, Vol.127, p.298-304.

7- Alavi Naeini, H., and Karbasi, A., (2016), *Numerical Modeling of Wave and Current Pattern in Shahid Rajaei Port*, Marine Transportation Industry, Vol. 2, No. 1, p. 21-29. In Persian.

8- Abed-elmdoust, A. and Kerachian, R., (2012), *Wave height prediction using the rough set theory*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 54, P. 144-250. In Persian.

9- Amani Dashlejeh, J. and Bonakdar, L., (2008), *Using neural network in prediction of wave height and period with different return period in South Bandar Abbas*, 10th Marine industries conference, Khoramshahr. In Persian.

10- Krishna Kumar, N. Savitha, R. and Al mamun, A., (2016), *Regional ocean wave height prediction using sequential learning neural networks*, Ocean engineering, In Press.

11- Pournemat Roudsari, A., Qaderi, K., Bakhtiari, B., and Ahmadi, M.M., (2011), *Wave height prediction in*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]

Khazar sea by GMDH. National conference of sea water utilization.Kerman, P.659-666. In Persian.

12- Mohammadrezapour Tabari, M. and Soltani, J., (2013), *The stream flow prediction model using Fuzzy inference system and particle swarm optimization*, water and wastewater consulting engineers research development, Vol. 24, P. 112-124. In Persian.

13- Haghighi, H., (1995), *Hydrology and hydrometeorology project of Chabahar gulf*, Iranian Scientific Fisheries Journal, P. 10. In Persian.

14- Ghias, M., (2014), *An introduction to the Monte Carlo simulation methods*, Research Extension Quarterly, No. 1, P.67-77.

15- Kennedy, J. and Eberhart R., (1995*), Particle swarm optimization*, Processes of IEEE International Conference on Neural Network, Perth, Australia.

16- Willmott, J., (1981), *On the validation of models, Physical Geography*, Vol. 2, Issue. 2, p.184-194.

17- Danande Mehr, A., (2009), *Application of artificial intelligence in river discharge sequence analysis and forecasting streamflow*, 8th Iranian hydraulic conference, Tehran. In Persian.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.1.7]