

## پیش‌بینی ساعتی و روزانه ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار

سعید اکبری فرد<sup>۱</sup>، حیدر زارعی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم زلّقی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲. استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۱۸)

## چکیده

امواج ناشی از باد به دلیل انرژی و تأثیر زیاد بر فعالیت‌های دریایی، اهمیت زیادی دارند. با توجه به اثرگذاری امواج دریا بر فعالیت‌های دریایی، تأثیر عوامل مختلف بر این متغیر در منطقه چابهار بررسی شد. در این پژوهش از روش الگوریتم جست‌وجوی گرگ (WSA) برای پیش‌بینی ارتفاع موج در دو بازه زمانی ساعتی و روزانه، استفاده شده است. به این منظور از اطلاعات ارتفاع امواج طی سال‌های آماری ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰، برای پیش‌بینی روزانه و آمار ماه‌های بهمن و اسفند ۱۳۸۵ برای پیش‌بینی ساعتی استفاده شد. نتایج به دست آمده از الگوریتم WSA با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و جست‌وجوی هارمونی (HS) مقایسه شد. نتایج نشان داد الگوریتم جست‌وجوی گرگ در هر دو بازه ساعتی و روزانه عملکرد بهتری داشته است، به طوری که ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص توافق ویلموت (d) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) به ترتیب برابر ۰/۹۴۹۷، ۰/۰۷۰۴، ۰/۹۸۷ و ۰/۰۴۸۳ و برای پیش‌بینی ساعتی و ۰/۸۵۵۸، ۰/۱۷۴۲، ۰/۹۵۹۹ و ۰/۱۱۳۸ برای بازه روزانه به دست آمد. مقایسه نتایج به دست آمده، بیان‌کننده عملکرد مناسب الگوریتم جست‌وجوی گرگ در پیش‌بینی ارتفاع موج برای این منطقه بوده است.

**کلیدواژگان:** ارتفاع موج دریا، الگوریتم جست‌وجوی گرگ، پیش‌بینی، چابهار.

## مقدمه

آثار امواج آب در مهندسی سواحل و تأثیر آن بر سازه‌های دریایی اهمیت بسیار زیادی دارد. امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی و ترکیب سواحل هستند و نیز تأثیر عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه‌ها و دیگر کارهای ساحلی و دریایی دارند. بنابراین، اطلاع درباره مشخسه‌هایی مانند ارتفاع و دوره زمانی امواج دریا یکی از نیازهای اساسی بسیاری از دانشمندان، محققان، مهندسان عمران، علوم و فنون دریایی، ناوبری، شیلات و حتی ساکنان نواحی ساحلی است. این اطلاعات در زمینه طراحی، ساخت، اجرا، نصب و انتقال سازه‌های دریایی مانند سکوها، شناورها، موج‌شکن‌ها، همچنین برای تخمین میزان حمل و انتقال رسوبات دریایی، برآورد میزان فرسایش و رسوب‌گذاری ایجادشده در مجاورت سازه‌های دریایی و بنادر اهمیت دارند.

مطالعه خصوصیات امواج از نظر آثار آن در مهندسی سواحل (طراحی بنادر، آبراهه‌ها و سایر مصارف ساحلی و دریایی) اهمیت دارد. همچنین به علت اثرگذاری عوامل مختلف بر ارتفاع و دوره زمانی امواج رسیده به سازه‌های دریایی، شبیه‌سازی دقیق این پارامترها امری ضروری است، بنابراین پژوهشگران تلاش کرده‌اند که بر اساس اطلاعات هواشناسی و سایر پارامترهای مؤثر در تشکیل امواج، آنها را در محل مد نظر شبیه‌سازی کنند [۱]. امروزه پژوهشگران با ابداع و پیشرفت علمی چون روش‌های هوشمند، که ایزاری توانمند، انعطاف‌پذیر و مستقل از مدل‌های دینامیکی سیستم هستند، در جست‌وجوی راه‌هایی برای پیشرفت و پیش‌بینی پارامترهای مهم هواشناسی نظیر باد و اثر آن بر ارتفاع امواج و بارش‌اند [۲]. مطالعه روی امواج ناشی از باد سابقه طولانی دارد، ولی می‌توان گفت که جامع‌ترین و کامل‌ترین توصیف و تشریحی که روی امواج ناشی از باد انجام‌شده است به سال ۱۹۵۷ برمی‌گردد. فیلیپس و مایلز با ارائه دو مکانیزم تشدید و بازخورد فرایند شکل‌گیری امواج ناشی از باد را تشریح کردند. بعدها بیشتر توجه دانشمندان به‌سوی تشریح طیف انرژی و ارائه مدل امواج معطوف شد و ده‌ها طیف انرژی و مدل برای امواج مطرح شد. همچنین پژوهشگرانی چون پیرسن، موسکوویچ و هاسلمن در این زمینه مطالعاتی انجام دادند [۳-۵]. ایمانی و کامران‌زاد (۱۳۹۴) با استفاده از مدل شش‌ساعتی باد مدل اروپایی و اطلاعات موج اندازه‌گیری‌شده در بویه

چابهار و مدل عددی سوان، ارتفاع امواج در خلیج چابهار را مدل‌سازی کردند. از آنجا که دقت میدان باد ورودی مدل عددی، تأثیر زیادی بر دقت نتایج خروجی مدل دارد، چگونگی تأثیر تصحیح میدان باد ورودی و همچنین تصحیح نتایج خروجی مدل بدون اعمال هیچ‌گونه تغییر و تصحیحی در میدان باد ورودی بر افزایش دقت نتایج مدل‌سازی با استفاده از مدل عددی سوان بررسی شد و نتایج نشان داد اصلاح خروجی‌های مدل عددی دقت بیشتری را در مقایسه با اصلاح میدان باد ورودی مدل نشان می‌دهد [۶]. ژنگ و همکارانش (۲۰۱۶) از مدل تجربی چرخش متعامد برای برآورد ارتفاع موج شاخص با استفاده از داده‌های گرفته‌شده از رادار دریایی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده همبستگی خوبی بود که نتیجه‌بخش بودن برآورد ارتفاع موج شاخص را بیان می‌کند [۷]. به‌موازات استفاده از روش‌های عددی، روش‌های آماری متکی بر پیش‌بینی سری‌های زمانی و همچنین بهره‌گیری از روش شبکه‌های عصبی نیز در امر پیش‌بینی امواج استفاده شده است. طالقانی و امیرتیموری (۱۳۸۷) برای پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر در دوره‌های زمانی مختلف از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند و نشان دادند روش بررسی‌شده در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت دقت و سرعت خوبی دارد [۸]. زمانی و عظیمیان (۱۳۸۳) به‌وسیله شبکه عصبی سه‌لایه پیشرو و با استفاده از داده‌هایی که مربوط به دو مکان مختلف در دریای مازندران و دو فاصله زمانی متفاوت بود، ارتفاع موج را شبیه‌سازی کردند [۹]. عابد علم‌دوست و کراچیان (۲۰۱۲) ارتفاع موج را با استفاده از نظریه مجموعه‌های ناهموار ( $RST^1$ ) در دریاچه سوپریور در شمال آمریکا پیش‌بینی کردند. نتایج مقایسه با دیگر تکنیک‌های محاسبات نرم مانند ماشین بردار پشتیبان ( $SVM^2$ )، شبکه‌های بیزین ( $BNS^3$ )، شبکه عصبی مصنوعی ( $ANN^4$ ) و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی ( $ANFIS^5$ ) نشان داد روش  $RST$  در پیش‌بینی ارتفاع موج نسبت به دیگر روش‌ها برتری داشته است [۱۰]. امانی داشلجه و بنکدار (۱۳۸۷) برای پیش‌بینی ارتفاع موج ساحل جنوبی شهر بندرعباس به‌وسیله شبکه عصبی، طول موجگاه،

1. Rough Set Theory
2. Support Vector Machine
3. Bayesian networks
4. Artificial Neural Network
5. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

بهینه‌سازی دارند، بهترین معادله تجربی برای پیش‌بینی ارتفاع موج در منطقه چابهار به‌دست آمد. از نوآوری این تحقیق می‌توان به آزمون و کاربرد الگوریتم‌های تکاملی در پیش‌بینی امواج دریا نام برد که عدم قطعیت دارد.

### مواد و روش‌ها

منطقه آزاد چابهار در دورترین نقطه جنوب شرقی ایران در ۲۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی قرار دارد. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی دوارتن این منطقه در محدوده اقلیمی خشک واقع شده است. خلیج چابهار بزرگ‌ترین خلیج ایران در حاشیه سواحل دریای عمان و نزدیک‌ترین آبراهه به اقیانوس هند است. این خلیج به دلیل شکل حلقه‌ای ( $\Omega$ ) خود در زمین‌شناسی از نوع خلیج امگایی یا نعلی‌شکل است. شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده موقعیت این منطقه است. عرض دهانه این خلیج حدود ۱۳/۵ کیلومتر و طول آن در راستای شمالی- جنوبی، ۱۷ کیلومتر و در راستای شرقی- غربی در عریض‌ترین قسمت حدود ۲۰ کیلومتر است. وسعت این خلیج حدود ۳۲۰ کیلومتر مربع و عمق متوسط آن هفت متر است [۱۶].

میانگین دمای هوای این منطقه ۲۶/۵ درجه سانتی‌گراد است. قرارگرفتن در مسیر بادهای موسمی شبه‌قاره هند به نام «مونسون» در تابستان، چابهار را به خنک‌ترین و در زمستان آن را به گرم‌ترین بندر جنوبی کشور تبدیل کرده است [۱۷]. در این مطالعه از داده‌های ساعتی منطقه از تاریخ ۱۳۸۵/۱۱/۱۸ تا ۱۳۸۵/۱۲/۱۸ و از داده‌های روزانه از تاریخ ۱۳۸۶/۱/۱ تا ۱۳۹۰/۱۲/۲۹ استفاده شده است. داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه شامل سرعت و جهت باد، سرعت تندباد، فشار و دمای هوا، دمای آب، رطوبت و ارتفاع موج است که توسط بویه‌های موج‌نگار در منطقه چابهار ثبت شده‌اند (جدول ۱).

### الگوریتم جست‌وجوی گرگ ( $WSA^5$ )

الگوریتم جست‌وجوی گرگ ( $WSA$ ) یکی از الگوریتم‌های تکاملی جدید است که تانگ و همکارانش (۲۰۱۲) با الهام از روش جست‌وجوی غذای گرگ‌ها و نجات آنها به‌وسیله دوری از دشمنانشان در طبیعت ارائه شده است [۱۸].

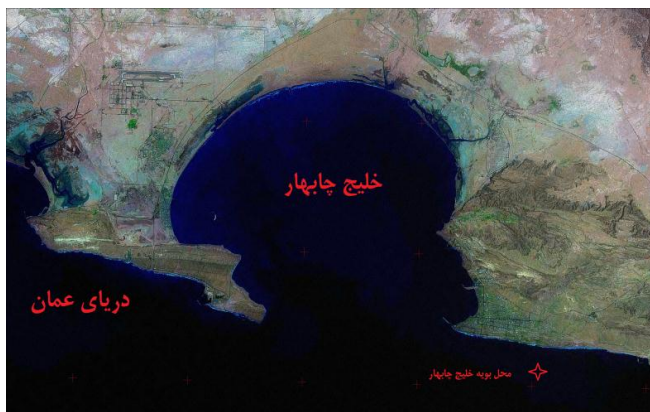
سرعت باد و دوره بازگشت را به‌عنوان پارامترهای ورودی مؤثر انتخاب کردند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبکه ساخته‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده واقعی نشان‌دهنده دقت مناسب و قابلیت زیاد شبکه در پیش‌بینی ارتفاع و دوره زمانی امواج بوده است [۱۱]. کریشنا کومار و همکارانش (۲۰۱۷) با استفاده از شبکه عصبی یادگیرنده پی‌درپی ارتفاع موج اقیانوس را شبیه‌سازی کردند. مقایسه عملکرد بین  $MRAN^1$  و  $GAP-RBF^2$  نشان می‌دهد  $MRAN$  با کمترین ساختار عملکرد بهتری نسبت به  $GAP-RBF$  دارد [۱۲]. عدالت‌پناه و رضازاده (۱۳۸۸) برای پیش‌بینی پارامترهای موج در خلیج فارس و دریای عمان از مدل  $SWAN$  استفاده کردند. برای پیش‌بینی عددی، مدل مد نظر با مدل  $MM5$  ترکیب شد که یک مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هواست. نتایج نشان داد مدل بررسی‌شده در پیش‌بینی مؤلفه‌های موج دقت مناسبی داشته است [۱۳]. پورنعمت رودسری و همکارانش (۱۳۹۰) ارتفاع موج دریای مازندران را با رویکرد استقرایی  $GMDH^3$  پیش‌بینی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از توسعه مدل، بیان‌کننده عملکرد زیاد این روش در پیش‌بینی و شناسایی روابط پیچیده بین متغیرها در مسائل مختلفی نظیر پیش‌بینی ارتفاع امواج دریاست [۱۴]. محمدرضا پورطبری و سلطانی (۱۳۹۲) مدل پیش‌بینی جریان رودخانه منطقه طالقان را با استفاده از سیستم فازی و الگوریتم  $PSO^4$  بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده دقت زیاد استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کاربرد منفرد استنباط فازی است به طوری که با استفاده از این مدل پیشنهادی می‌توان مقدار دقیق‌تری از رواناب را برای شرایط آینده برآورد کرد [۱۵].

در این مطالعه با توجه به توانایی الگوریتم‌های تکاملی در شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت زیاد، ارتفاع موج را با استفاده از سه الگوریتم جست‌وجوی گرگ، ژنتیک و جست‌وجوی هارمونی، با توجه به داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط بویه در منطقه چابهار پیش‌بینی شده است. به این منظور پارامترهای مؤثر بر ارتفاع امواج بررسی شد و با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، که قابلیت زیادی در حل مسائل

1. Minimal Resource Allocation Network
2. Growing and Pruning Radial Basis Function
3. Group Method of Data Handling
4. Particle Swarm Optimization



شکل ۲. موقعیت منطقه چابهار در پهنه ایران



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

جدول ۱. اطلاعات داده‌های بررسی شده

ارتفاع موج شاخص (m)	سرعت باد (ms <sup>-1</sup> )	دمای هوا (°C)	دمای آب (°C)	فشار هوا (Hpa)	سرعت تندباد (ms <sup>-1</sup> )	رطوبت نسبی (%)
۳/۱۵	۱۱/۸	۳۳	۳۸	۱۰۲۳	۱۶	۹۹
۰/۶۱	۲/۹	۲۶	۲۵	۱۰۰۵	۴	۶۴
۰	۰/۱	۱۵	۹	۹۸۰	۰/۸	۰

این فاصله بصری برای جست‌وجوی غذا به کار می‌رود که در الگوریتم جست‌وجوی گرگ به آن بهینه سراسری<sup>۱</sup> می‌گویند. گرگ در این فاصله، با آگاهی از هموعان خود می‌تواند به سمت موقعیت بهتر حرکت کند، یا با توجه به فاصله‌ای که از دشمن دارد می‌تواند از رنج بصری فراتر رود. زمانی که گرگ‌ها فکر می‌کنند شکار نزدیک است، به سرعت و بی‌سروصدا و بسیار با احتیاط نزدیک آن می‌شوند، چون مایل به فاش شدن حضور خود نیستند. در حالت جست‌وجو، زمانی که هیچ‌یک از موارد یادشده در داخل محدوده بصری تشخیص داده نشد، گرگ به سمت حرکت براونی (BM<sup>۲</sup>) حرکت می‌کند، که تقلیدی از حرکت تصادفی ذرات معلق در مایع است. سه قانون حاکم بر الگوریتم جست‌وجوی گرگ بر اساس رفتار واقعی گرگ هنگام شکار در طبیعت به صورت زیر است [۱۸]:

۱. هر گرگ ناحیه ثابت بصری با شعاع تعریف شده به وسیله  $D$  برای  $X$  به عنوان مجموعه‌ای از جواب‌های پیوسته مسئله دارد. در  $2D$ ، مساحت تحت پوشش می‌تواند به سادگی دایره‌ای به شعاع

گرگ‌ها شکارچینی اجتماعی هستند که به صورت بسته شکار می‌کنند. آنها به صورت خانوادگی رفت‌وآمد می‌کنند، که متفاوت از دسته‌های پرندگان یا حشرات هستند که معمولاً در گروه‌های نسبتاً بزرگ حرکت می‌کنند. گرگ‌ها هنگام شکار با هم ساکت می‌شوند و از مخفیگاه استفاده می‌کنند. برخلاف مورچگان، که از فرمون‌ها برای اطلاع‌رسانی خصوصیات غذا استفاده می‌کنند، الگوریتم جست‌وجوی گرگ از این نوع ارتباط خودداری کرده و زمان جست‌وجو را کوتاه می‌کند. الگوریتم جست‌وجوی گرگ با استفاده از احتمال رویداد تهدیدها شبیه‌سازی شده است. زمانی که این اتفاق بیفتد، سبب رهایی گرگ از نقطه بهینه محلی می‌شود. جهت و فاصله‌ای که گرگ‌ها از خطر هنگام حرکت می‌گیرند به صورت تصادفی است، که شبیه به جهش و تقاطع در الگوریتم ژنتیک است که موقعیت قبلی را برای به دست آوردن یک نسل بهتر جابه‌جا می‌کند. گرگ‌ها حس بویایی بسیار قوی دارند و معمولاً با این حس شکار می‌کنند. به طور مشابه، هر گرگ در الگوریتم جست‌وجوی گرگ حس فاصله‌ای دارد که یک شعاع حسی یا منطقه تحت پوشش ایجاد می‌کند که به دید بصری برمی‌گردد.

1. Global Optimum  
2. Brownian Motion

U باشد. در برنامه‌های بزرگ‌تر که ویژگی‌های چندگانه در آن تسلط دارند، فواصل با استفاده از فرمول مینکوسکی<sup>۱</sup> تخمین زده می‌شود که به صورت رابطه ۱ است:

$$U \leq d(x_i, x_c) = \left( \sum_{k=1}^n |x_{i,k} - x_{c,k}|^\lambda \right)^{1/\lambda} \quad (1)$$

که در آن:  $x_i, x_c \in X$  موقعیت پیشین،  $x_c$  برابر موقعیت‌های همسایگی در اطراف  $x_i$  است و فاصله بین این دو موقعیت باید کمتر مساوی  $U$  باشد و  $\lambda$  فضای مازاد است. برای راه‌حل گسسته، لیست شمارنده نقاط همسایگی تقریبی خواهد بود.

۲. نتیجه یا سازگاری تابع هدف نشان‌دهنده کیفیت موقعیت فعلی گرگ است. اگر بیش از یک موقعیت بهتر که به وسیله هم‌نوعان اشغال شده وجود داشته باشد، گرگ بهترین موقعیت را از بین گزینه‌ها انتخاب می‌کند. در غیر این صورت گرگ به حرکت تصادفی خود در BM ادامه خواهد داد.

۳. در بعضی نقاط، ممکن است گرگ احساس دشمن کند. آن‌گاه گرگ به نقطه‌ای تصادفی فرار می‌کند که با فاصله از تله، فراتر از محدوده دید است.

## شکار<sup>۲</sup>

گرگ به وسیله یک‌روند تهدیدآمیز شکار خود را دنبال می‌کند. سه نوع مختلف از رفتار است که به ترتیب در شکار روی می‌دهد. در زمینه الگوریتم، این سه نوع رفتار به صورت اتمی در هر تکرار و با تولید نسل روی می‌دهد.

۱. شکار مقدماتی: گرگ از مواد غذایی‌ای تغذیه می‌کند، که نشان‌دهنده تابع نهایی در بهینه‌سازی است. این مرحله اساساً این اجازه را به گرگ می‌دهد تا محیط بصری را برای تشخیص طعمه بررسی کند. این مرحله در ابتدای حلقه اجرا قرار دارد و بعد از چک کردن اینکه نقطه فعلی باید تغییر کند یا بعد از گام تصادفی در پیاده‌روی تصادفی قرار گیرد، تکرار می‌شود، به طوری که گرگ مدام به دنبال شکار است. یکبار که شکار در ناحیه دید گرگ قرار دارد، با پشتکار مرحله به مرحله به سمت شکار حرکت می‌کند

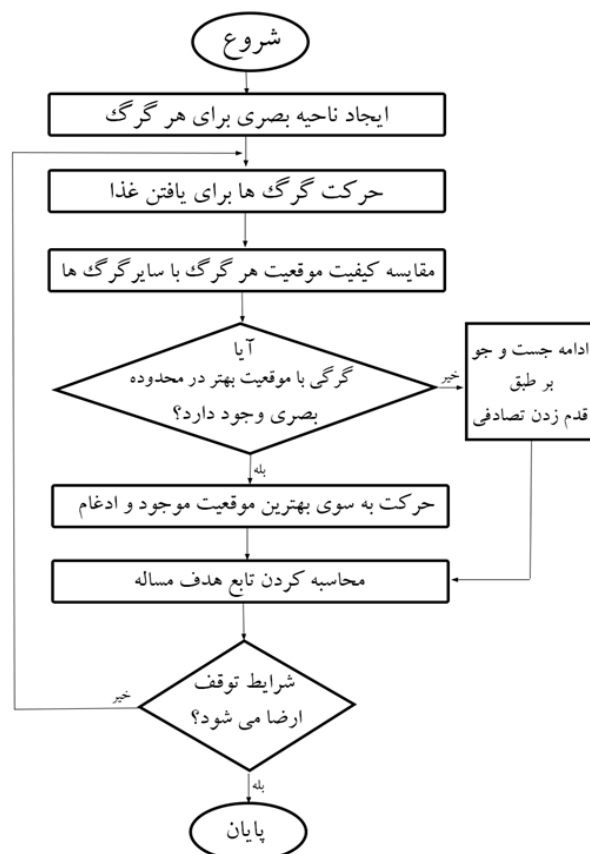
۲. شکار منفعلانه: اگر گرگ‌ها شکار پیدا نکنند یا مخفیگاه در مرحله قبل توسط هم‌نوعان اشغال شده باشد، آن‌گاه آن‌ها شکار منفعلانه انجام می‌دهند. در این موقعیت، گرگ فقط در حالت اخطار برای تهدید و تلاش برای بهبود موقعیت فعلی با مقایسه با هم‌نوعان خود می‌ماند.

۳. خروج: زمانی که یک تهدید کشف شد، گرگ به سرعت به وسیله قرارداد خود در یک موقعیت جدید که بالاتر از دید بصری‌اش است، فرار می‌کند. ظهور تهدید با استفاده از احتمالات تعریف شده به وسیله کاربر به صورت تصادفی مدل می‌شود. فرار یک مرحله مهم برای حفظ همه گرگ‌ها از افتادن در یک نقطه اپتیمم است. ما با استفاده از ریاضیات رفتارهای شکار بالا را تعریف کردیم:

$$if\ moving = \begin{cases} x(i) = x(i) + a.rand(0,1)Prey \\ x(i) = x(i) + a.s.escape(0,1)Escape \end{cases} \quad (2)$$

که در آن:  $x(i)$  موقعیت گرگ،  $a$  سرعت،  $rand(0,1)$  تابع تصادفی‌سازی است که در  $[-1,1]$  توزیع شده،  $s$  اندازه گام است که باید کوچک‌تر از دید بصری باشد؛ و  $escape(0,1)$  تابعی عمومی است که به صورت تصادفی موقعیت بهتری به وجود می‌آورد. شکار ابتدایی و شکار منفعلانه هر دو از بخش بالایی فرمول استفاده می‌کنند در حالی که فرار از قسمت پایین فرمول استفاده می‌کند.

فلوچارت الگوریتم جست‌وجوی گرگ در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم جست و جوی گرگ

در پژوهش حاضر، تابع هدف به صورت کمینه سازی مجموع مربعات باقی مانده ها (SSQ) بین داده های مشاهداتی و محاسباتی مطابق رابطه ۴ تعریف شده است:

$$\text{Minimize (OF)} = \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2 \quad (4)$$

که در آن، N تعداد گام های زمانی،  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب ارتفاع موج مشاهداتی و محاسبه شده توسط الگوریتم های بررسی شده (محاسباتی) در زمان t هستند.

برای ارزیابی مدل های مد نظر از شاخص های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، مربع میانگین خطای استاندارد (MSE)، میانگین قدر مطلق درصد خطا (NMSE)، و شاخص توافق ویلموت (d) بهره برده شده است که در معادلات ۵-۱۱ آورده شده اند [۱۹].

$$R^2 = \left( \frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \times \sum (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

### پیش پردازش داده ها و معیارهای ارزیابی

پیش پردازش شامل انتخاب متغیرهای مؤثر، انتخاب الگوهای آموزش و آزمون و نیز نرمال سازی (بی بعد سازی) داده ها می شود. اصولاً وارد کردن داده ها به صورت خام سبب کاهش سرعت و دقت مسئله می شود. برای به دست آوردن چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان کردن ارزش داده ها برای ورود به مدل، عمل بی بعد سازی صورت گرفته است. معمولاً نرمال سازی الگوها تبدیلی است که در آنها داده ها از مقدار واقعی به بازه مشخصی مانند [صفر و یک] نگاشت می شوند. در این پژوهش کلیه داده های ورودی قبل از اعمال با استفاده از معادله ۳ نرمال شدند:

$$Z_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

که در آنها  $X_i$  مقدار مشاهده شده در گام زمانی  $t$ ام،  $X_{\max}$  بیشترین مقدار مشاهداتی و  $X_{\min}$  کمترین مقدار مشاهداتی است.

که مقدار یک توافق کامل بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد.

کم‌بودن مقدار RMSE و زیاد و نزدیک به یک بودن ضریب  $R^2$  بیان‌کننده دقت قابل قبول مدل و همبستگی بین داده‌ها را بیان می‌کند و نشان‌دهنده برتری آن نسبت به مدل دیگر است. MAE، MSE، NMSE و MAPE هر یک به شیوه‌ای اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای را نشان می‌دهند که هرچه این مقادیر کمتر باشند یعنی کار نتیجه‌بخش‌تر است. MSE اختلاف بین داده‌ها را پررنگ‌تر می‌کند و نرمال‌شده آن توانایی مقایسه آن با روش‌های دیگر را پیدا می‌کند [۱۹].

### بحث و نتایج

ابتدا برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های بررسی‌شده، از شش تابع محک استاندارد استفاده شد. جدول ۲ نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های تکاملی روی این توابع محک استاندارد را نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت اولیه در هر الگوریتم یکسان و متناسب با بعد هر تابع است و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های تکاملی روی توابع محک استاندارد

WSA	HS	GA	مقدار هدف	بعد	تابع
۳	۳	۳/۰۰۰۴	۳	۲	Goldsten-Price
-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۳	۲	Mccormick
۲×۱۰-۸	۱۰×۱۰-۶	۲/۳×۱۰-۵	۰	۲	Rosenbrock
۰/۶۱۳	۱/۴۳	۴/۵۵	۰	۱۰	Rosenbrock
-۱۰/۵۳۲	-۶/۴۶۱۹	-۱۰/۴۳۳۹	-۱۰/۵۳۶۴	۴	Shekel
-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	۲	Six-Hump Camel

در این پژوهش با استفاده از داده‌های ساعتی ارتفاع موج ثبت‌شده در بویه موج‌نگار سازمان بنادر و کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران و همچنین داده‌های هیدرومتئورولوژی شامل سرعت و جهت باد، سرعت تندباد، فشار و دمای هوا، دمای آب و رطوبت به پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی پرداخته شده است. در این پژوهش رابطه تجربی برای محاسبه ارتفاع موج با استفاده از یک‌زمان تأخیر در داده‌ها در رابطه ۱۲ آمده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{S}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n} \quad (9)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{S}_i)^2} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (11)$$

در روابط یادشده  $S_i$  داده‌های محاسبه‌شده از الگوریتم‌های بررسی‌شده،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $\bar{O}$  میانگین داده‌های مشاهداتی و  $n$  تعداد مشاهدات است. دامنه تغییرات شاخص توافق ویلموت از  $-\infty$  تا یک است

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۲ نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WSA در مقایسه با الگوریتم‌های  $GA^1$  و  $HS^2$  است. در این جدول مشاهده می‌شود که در مسائل با ابعاد کوچک (دوبعدی) عملکرد هر سه الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است و با افزایش بعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع Shekel با بعد ۴ و تابع Rosenbrock با بعد ۱۰)، عملکرد الگوریتم‌های GA و HS سیر نزولی دارد و از مقدار بهینه فاصله گرفته است، اما الگوریتم WSA نسبت به دو الگوریتم دیگر خطای کمتری دارد.

این پارامتر بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ارتفاع موج ساعتی دارد. بعد از پارامتر ارتفاع موج، سرعت باد با ضرایب مثبتی که حاصل از الگوریتم‌های بررسی شده است تأثیرگذارترین پارامتر در پیش‌بینی ارتفاع موج دریاست. شکل ۴ مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم‌های بررسی شده در بازه ساعتی را نشان می‌دهد.

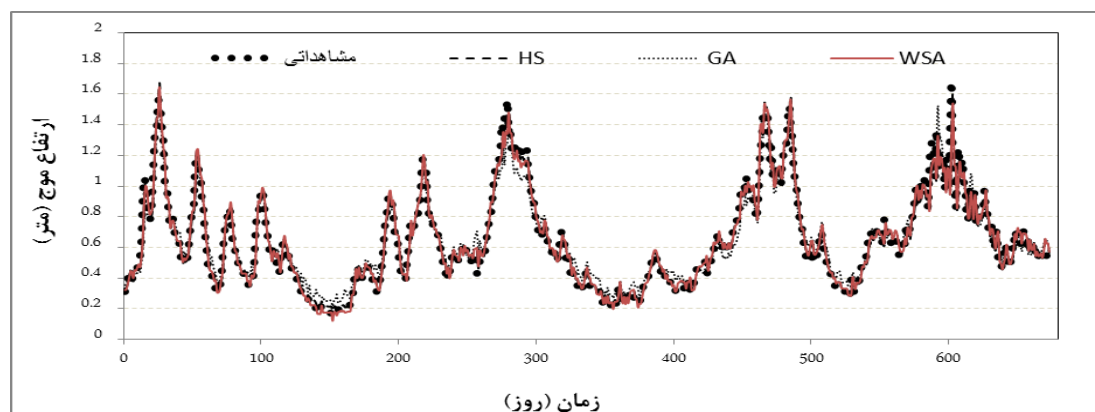
همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، همه الگوریتم‌های تکاملی بررسی شده عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا دارند. در بین الگوریتم‌های بررسی شده، الگوریتم‌های WSA و HS به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۴۹۷ و ۰/۹۴۹۲ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GA با ضریب تبیین ۰/۹۲۹۳ در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا در بازه ساعتی داشته‌اند. شکل ۵ مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم WSA در مقابل یکدیگر را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم‌های بررسی شده در بازه ساعتی

	A(9)	A(8)	A(7)	A(6)	A(5)	A(4)	A(3)	A(2)	A(1)	
WSA	$-2/6 \times 10^{-2}$	۰/۲۴۹۹۴	-۰/۱۷۳۵	-۰/۰۲۰۶۵	۰/۰۲۶۱۷	۰/۰۲۸۱۱	۰/۰۶۶۹۷	۰/۰۷۲۵۸	۰/۸۹۵۹۴	
GA	$3/3 \times 10^{-2}$	۰/۲۹۳۶	-۰/۰۶۸	۰/۰۴۳۸	۰/۰۶۶۹	-۰/۰۳۵	۰/۰۹۳۲	۰/۲۶۷۵	۰/۷۰۶۹	
HS	$1/39 \times 10^{-2}$	۰/۱۷۳۷	-۰/۱۲۷۶	-۰/۰۱۷۴	۰/۰۴۵۴	۰/۰۲۷	۰/۱۲۴۸	۰/۰۴۳۳	۰/۹۱۱۴	

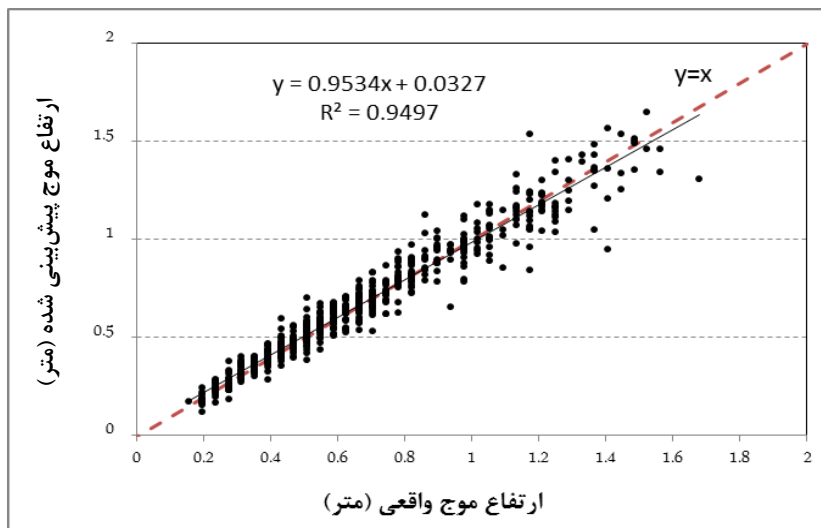
جدول ۴. ماتریس توان‌های بهینه شده توسط الگوریتم‌های بررسی شده در بازه ساعتی

	B(8)	B(7)	B(6)	B(5)	B(4)	B(3)	B(2)	B(1)	
WSA	۳/۹۹۶۸	۲۰/۰۴۷۲	۳/۱۴۶۶	۱/۰۲۷۷۳	۵/۸۳۰۷	۵۶/۰۴۰۴	۶/۷۶۲۸	۰/۸۶۶۰۴	
GA	۳/۰۱۴۹	۱۲/۵۳۸	۳/۳۳۸	۳/۷۸۶	۳/۹۶۷	۲۹/۳۱	۷/۲	۰/۸۹۴۷	
HS	۳/۱۸	۱۷/۲۵۵	۳/۸۵۲	۴/۸۴۸	۸/۸۳۹	۵۰/۴	۶/۸۵۴	۰/۹۹۵۹	



شکل ۴. مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم‌های بررسی شده در بازه ساعتی





شکل ۵. مقادیر ارتفاع موج واقعی و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم WSA در بازه ساعتی

جدول ۵. ماتریس ضرایب بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های بررسی شده در بازه روزانه

A(9)	A(8)	A(7)	A(6)	A(5)	A(4)	A(3)	A(2)	A(1)	
$1/3 \times 10^{-2}$	۰/۰۴۶۵۵	-۰/۲۷۷۱	-۰/۰۲۸۶۷	-۰/۰۹۱۳۹	۰/۰۱۲۸	۰/۱۰۰۵۹	-۰/۰۳۱۹۴	۰/۸۱۳۰۶	WSA
$۶/۲۸ \times 10^{-2}$	۰/۲۶۲۲	۰/۲۲	۰/۰۰۴۹	-۰/۰۷۹۵	۰/۳۱۷۲	۰/۱۴۷۱	-۰/۱۰۳۱	۰/۴۲۱۳	GA
$۱/۹ \times 10^{-2}$	۰/۰۵۳۹	$۳/۳ \times 10^{-2}$	-۰/۰۲۳۸	-۰/۰۱۱۷	۰/۰۳۹۷	۰/۰۱۵۹	-۰/۰۵۵	۰/۸۵۲۱	HS

جدول ۶. ماتریس توان‌های بهینه‌شده توسط الگوریتم‌های بررسی شده در بازه روزانه

B(8)	B(7)	B(6)	B(5)	B(4)	B(3)	B(2)	B(1)	
۲/۱۹۹	۴/۳۳۱۳	۳/۴۳۱	۱۸/۲۷۷۱	۴/۱۰۸۸	۸/۷۰۲۲	۲/۳۵۷۴	۰/۸۱۹۶۷	WSA
۲/۲۰۴	۸/۴۱۷	۴/۳۷۳	۱/۳۶۲	۷/۰۳۵۵	۱۲/۸۷۹	۱/۴۰۷	۰/۵۷۵	GA
۱/۴۳	۱۴/۳۹۵	۳/۹۶۴	۳/۵۳	۸/۳۲۵	۱۱/۸۹	۳/۲۶۲	۰/۹۳۵	HS

باد با ضرایب مثبتی که دارد تأثیرگذارترین پارامتر در پیش‌بینی ارتفاع موج دریاست.

شکل ۶ مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بازه زمانی روزانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، همه الگوریتم‌های تکاملی بررسی شده عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج دریا دارند. در بین الگوریتم‌های بررسی شده، الگوریتم WSA با ضریب تبیین ۰/۸۵۵۸، بهترین عملکرد و الگوریتم GA با ضریب تبیین ۰/۶۹۹، عملکرد ضعیف‌تری در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا در بازه زمانی روزانه داشته‌اند.

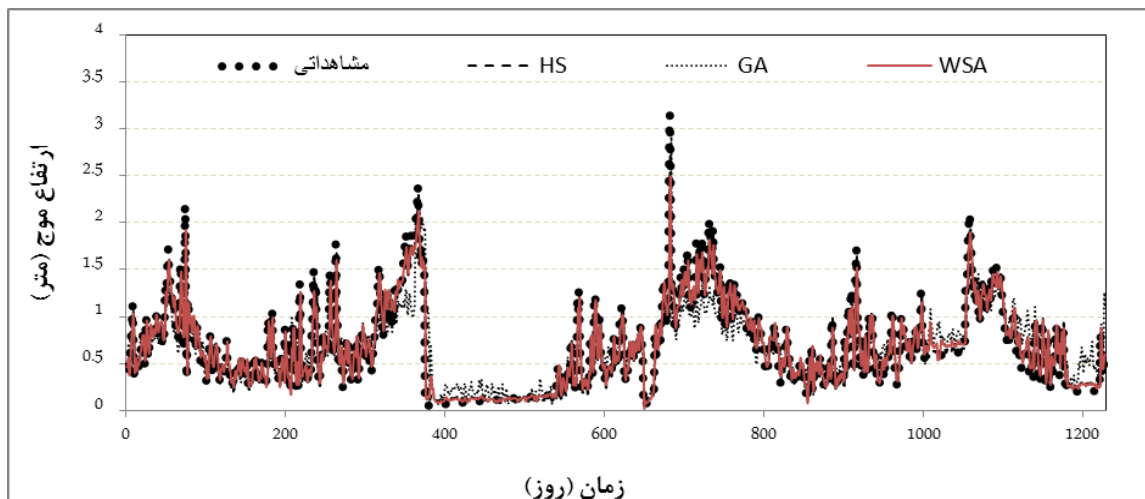
شکل ۷ مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی شده در بازه زمانی روزانه، توسط الگوریتم WSA در مقابل یکدیگر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بیشتر داده‌ها روی خط نیمساز متمرکز شده و ضریب تبیین، ۰/۹۴۹۷ نشان‌دهنده دقت زیاد الگوریتم WSA در پیش‌بینی ساعتی ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار است.

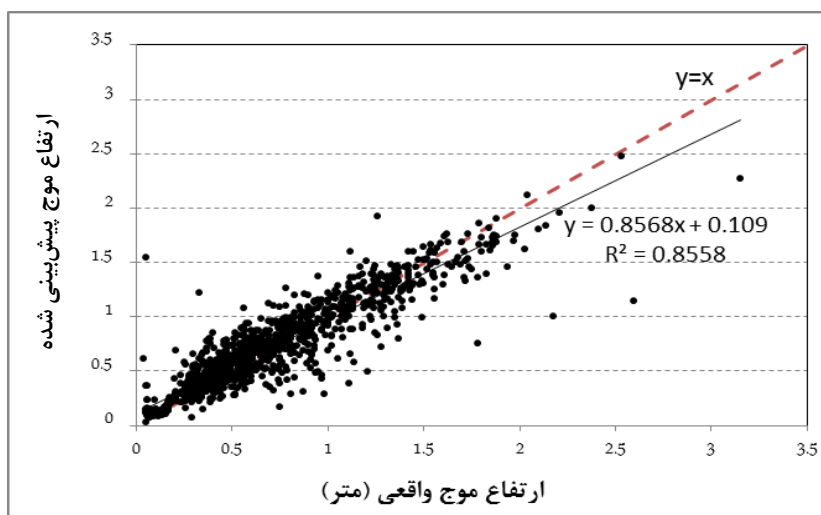
#### پیش‌بینی ارتفاع موج روزانه

مقدار ماتریس ضرایب (A) و ماتریس توان‌ها (B) که توسط الگوریتم‌های بررسی شده بهینه‌شده در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که ضریب ارتفاع موج با یک ساعت تأخیر در همه الگوریتم‌های بررسی شده بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ارتفاع موج ساعتی دارد. بعد از پارامتر ارتفاع موج، سرعت



شکل ۶. مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم‌های بررسی‌شده در بازه روزانه



شکل ۷. مقادیر ارتفاع موج واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم WSA در بازه روزانه

در جدول ۷ نتایج کلی پیش‌بینی ارتفاع موج با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در دو بازه ساعتی و روزانه آمده است. در این جدول علاوه بر مقدار ضریب تبیین  $(R^2)$ ، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، مربع میانگین خطای استاندارد (MSE)، مربع میانگین خطای استاندارد نرمال‌شده (NMSE)، میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) و شاخص توافق ویلموت (d) نیز آمده است. به‌وسیله این جدول و این مقادیر می‌توان میزان اختلاف داده‌های پیش‌بینی‌شده و داده‌های محاسبه‌شده را مشاهده کرد.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تا حدودی تمرکز داده‌ها روی خط نیمساز است و ضریب تبیین،  $0.8558$  نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول الگوریتم WSA در پیش‌بینی روزانه ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و مقایسه آنها در دو بازه ساعتی و روزانه مشاهده می‌شود که روش‌های بررسی‌شده در پیش‌بینی ساعتی موفق‌تر از بازه روزانه عمل کرده‌اند. این دقت نشان‌دهنده اثرگذاری داده‌های دقیق و از نظر زمانی نزدیک به هم در پیش‌بینی ارتفاع موج است و این وابستگی روش‌ها به داده‌های ساعتی بیان‌کننده اثرگذاری پارامترها روی یکدیگر در کوتاه‌مدت در طبیعت است.

جدول ۷. نتایج مربوط به آماره‌های آماری به‌دست‌آمده از مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی با محاسباتی

SSQ	NMSE	MSE	MAPE	R <sup>2</sup>	d	MAE	RMSE	الگوریتم‌ها	بازه زمانی
۳/۳۳۲۹	۰/۰۵۰۴	۰/۰۰۵	۷/۷۵۳	۰/۹۴۹۷	۰/۹۸۷	۰/۰۴۸۳	۰/۰۷۰۴	WSA	ساعتی
۵/۱۷۰۶	۰/۰۷۸۱	۰/۰۰۷۷	۱۲/۳۲۵۵	۰/۹۲۹۳	۰/۹۷۷۶	۰/۰۶۶۵	۰/۰۸۷۷	GA	
۳/۳۶۲۵	۰/۰۵۰۸	۰/۰۰۵	۷/۶۸۵۷	۰/۹۴۹۲	۰/۹۸۶۸	۰/۰۴۸	۰/۰۷۰۷	HS	
۳۷/۲۷۷۷	۰/۱۴۵۲	۰/۰۳۰۴	۲۶/۳۲۹۹	۰/۸۵۵۸	۰/۹۵۹۹	۰/۱۱۳۸	۰/۱۷۴۲	WSA	روزانه
۷۷/۶۹۱۲	۰/۳۰۲۶	۰/۰۶۳۳	۴۹/۷۶۱۸	۰/۶۹۹	۰/۹۰۰۷	۰/۱۷۱۵	۰/۲۵۱۵	GA	
۳۹/۲۳۰۲	۰/۱۵۲۸	۰/۰۳۱۹	۲۶/۸۰۰۹	۰/۸۴۸۱	۰/۹۵۸۷	۰/۱۱۴۱	۰/۱۷۸۷	HS	

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی WSA، HS و GA به پیش‌بینی ارتفاع موج در دو بازه ساعتی و روزانه برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ برای منطقه چابهار پرداخته شد. به‌منظور به‌کارگیری داده‌ها در شبیه‌سازی ارتفاع موج با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، ابتدا داده‌ها به‌صورت نرمال درآمدند که این امر موجب تسریع کار و افزایش دقت در الگوریتم‌های بررسی شده شد. نتایج بیان‌کننده عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم‌های تکاملی در هر دو بازه زمانی است، به‌گونه‌ای که ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) برای الگوریتم‌های WSA، HS و GA در بازه ساعتی به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۹۷، ۰/۹۲۹۳ و ۰/۹۴۹۲ و در بازه روزانه به‌ترتیب برابر ۰/۸۵۵۸، ۰/۶۹۹ و ۰/۸۴۸۱ به‌دست آمد. با توجه به پیش‌بینی‌های انجام‌شده و مقایسه آن‌ها در دو بازه ساعتی و روزانه مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های بررسی شده در پیش‌بینی ساعتی موفق‌تر از بازه روزانه عمل کرده‌اند. این دقت نشان‌دهنده اثرگذاری داده‌های دقیق و از نظر زمانی نزدیک به هم در پیش‌بینی ارتفاع موج است و این وابستگی روش‌ها به داده‌های ساعتی بیان‌کننده اثرگذاری پارامترها بر یکدیگر در کوتاه‌مدت در طبیعت است. الگوریتم‌های بررسی شده در پیش‌بینی نقاط اکسترمم، دقت قابل قبولی داشته که نشان‌دهنده کارآمدی آنها در پیش‌بینی مسائل هیدرومتئورولوژی است که تا پیش از این در این زمینه کمتر استفاده شده‌اند. همچنین ضرایب به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های بررسی شده برای معادله تجربی میزان اثرگذاری عواملی چون ارتفاع موج و سرعت باد با یک واحد تأخیر را بر ارتفاع موج نشان می‌دهد. الگوریتم جست‌وجوی گرگ در پیش‌بینی ارتفاع موج، برتری اندکی نسبت به دیگر الگوریتم‌های بررسی شده دارد که بیان‌کننده عملکرد مناسب‌تر آن در پیش‌بینی ارتفاع موج دریاست.

## منابع

- [1]. Derakhshan S, Gharabaghi A, Chenaghlu MR. Prediction of sea waves specification by experimental methods in Bushehr. 1<sup>st</sup> national congress on civil engineering. Sharif University. Tehran. 2004; 1-9. [Persian]
- [2]. Khalili N. Forecasting precipitation with artificial neural networks. M.Sc Thesis. Water engineering Department. Ferdowsi university of Mashhad. 2006; [Persian]
- [3]. Lari K, Pourmandi-Yekta A, Mehdipour F. Wind waves prediction by the statistical model based on neural network in Bushehr Province. 4<sup>th</sup> international conference on coasts. port and marine structures. Bandar Abbas. 2000; 1-7. [Persian]
- [4]. Pierson WJ, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. Journal of geophysical research. 1964; 69(24):5181-5190.
- [5]. Hasselmann K, Barnett TP, Bouws E, Carlson H, Cartwright DE, Enke K, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Research project. Deutsches Hydrographisches Institut; 1973.p. 7-91.
- [6]. Imani H, Kamranzadeh B. Scrutiny results of numerical simulation significant wave height in Chabahar. Sixth International Conference on Offshore Industries. Iranian Offshore Engineering Society. Tehran. 2015; 1-8. [Persian]
- [7]. Zhang S, Song Z, Li Y. An advanced inversion algorithm for significant wave height estimation based on random field. Ocean Engineering. 2016; 15(127):298-304.
- [8]. Taleghani M, Amirteymuri AR. Wave height predicted in Caspian Sea using artificial neural networks. Journal of Operational Research in Its Applications (Applied Mathematics). 2008; 5(18):39-47. [Persian]

- [9]. Zamani A, Azimian A. Wave height prediction in Caspian Sea by neural network. 9<sup>th</sup> conference of Fluid dynamics. Shiraz University. 2004; 1-11. [Persian]
- [10]. Abed-Elmdoust A, Kerachian R. Wave height prediction using the rough set theory. Ocean Engineering. 2012; 1(54):244-250.
- [11]. Amani-Dashlekeh J, Bonakdar, L. Using neural network in prediction of wave height and period with different return period in South Bandar Abbas. 10<sup>th</sup> Marine industries conference. Khoramshahr. 2008; 1-11. [Persian]
- [12]. Krishna Kumar N, Savitha R, Al Mamun A. Regional ocean wave height prediction using sequential learning neural networks. Ocean Engineering. 2017; 1(129):605-612.
- [13]. Edalatpanah F, Rezazadeh P. Prediction of wave parameters by SWAN model. 12<sup>th</sup> conference of Fluid dynamics. Nushirvani University of Babol. 2009; 1-14. [Persian]
- [14]. Pournemat-Roudsari A, Qaderi K, Bakhtiari B, Ahmadi MM. Wave height prediction in Caspian Sea by GMDH. National conference of sea water utilization. Kerman; 2011. P. 659-666. [Persian]
- [15]. Mohammadrezapour-Tabari M, Soltani J. The stream flow prediction model using Fuzzy inference system and particle swarm optimization. Water and wastewater consulting engineers research development. 2013; 24:112-124. [Persian]
- [16]. Haghghi H. Hydrology and hydrobiology of Chabahar gulf. Research project. Iranian Fisheries Science Research Institute.; 1995. p. 5-12. [Persian]
- [17]. Shirinmanesh S, Chegini V. Study estimated recoverable energy from wave and tidal flow in Chabahar bay. Journal of Khoramshahr Marine Science and Technology. 2011; 10(2):91-107. [Persian]
- [18]. Tang R, Fong S, Yang XS, Deb S. Wolf search algorithm with ephemeral memory. In Digital Information Management (ICDIM). Seventh International Conference; 2012. p. 165-172. IEEE.
- [19]. Willmott CJ. On the validation of models. Physical geography. 1981; 2(2):184-94.