

شبیه سازی ارتفاع موج دریا با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری در منطقه چابهار

سعید اکبری فرد^۱، علی محمد آخوندعلی^۲

Akbarifard_saeid@yahoo.com

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

۲- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

چکیده

با توجه به اثرگذاری امواج دریا بر فعالیت های دریایی، به بررسی ارتفاع موج و تاثیر عوامل مختلف بر این متغیر در منطقه چابهار پرداخته شد. در این پژوهش از روش الگوریتم چرخه آب (WCA) برای پیش بینی ارتفاع موج در دو بازه زمانی ساعتی و روزانه، استفاده شده است. به این منظور از اطلاعات ارتفاع امواج طی سال های آماری ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰، برای شبیه سازی روزانه و آمار ماه های بهمن و اسفند سال ۱۳۸۵ برای شبیه سازی ساعتی استفاده شد. نتایج حاصل از الگوریتم WCA با نتایج الگوریتم های گروه ذرات (PSO)، رقابت استعماری (ICA)، جستجوی هارمونی (HS) و ژنتیک (GA) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد الگوریتم چرخه آب در هر دو بازه ساعتی و روزانه عملکرد بهتری داشته، 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 ۰/۹۵۰۶، ۰/۰۶۹۷، ۰/۹۸۷۱ و ۰/۰۴۷۳ برای شبیه سازی ساعتی و ۰/۸۵۹۳، ۰/۱۷۱۵، ۰/۹۶۱۱ و ۰/۱۰۸۸ برای بازه روزانه حاصل شد. مقایسه نتایج بدست آمده، حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم چرخه آب در شبیه سازی ارتفاع موج برای این منطقه بوده است.

واژگان کلیدی: ارتفاع موج دریا، پیش بینی، الگوریتم چرخه آب، چابهار.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۰۸/۰۹

۱- مقدمه

پی‌درپی به شبیه‌سازی ارتفاع موج اقیانوس پرداختند. مقایسه عملکرد بین MRAN و GAP-RBF نشان می‌دهد که MRAN با حداقل ساختار عملکرد بهتری نسبت به GAP-RBF دارد [۷]. ژنگ و همکاران (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 [۸].

به موازات استفاده از روش‌های عددی، روش‌های آماری متکی بر پیش‌بینی سری‌های زمانی و همچنین بهره‌گیری از روش شبکه‌های عصبی نیز در امر پیش‌بینی امواج مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی و عظیمیان (۱۳۸۳) به وسیله شبکه عصبی سه لایه پیش‌رو و با استفاده از داده‌هایی که مربوط به دو مکان مختلف در دریای خزر و دو فاصله زمانی متفاوت بود ارتفاع موج را شبیه‌سازی کردند [۹]. طالقانی و امیرتیموری (۱۳۸۷) برای پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر در دوره‌های زمانی مختلف از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده و نشان دادند، روش مورد بررسی در دوره‌های زمانی کوتاه مدت دارای دقت و سرعت خوبی می‌باشد [۱۰]. 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 پرپود امواج بوده است [۱۱]. عدالت‌پناه و رضازاده (۱۳۸۸) برای پیش‌بینی پارامترهای موج در خلیج فارس و دریای عمان از مدل SWAN استفاده کردند. برای پیش‌بینی عددی، مدل مورد نظر با مدل MM5 که یک مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا است، ترکیب شد. نتایج نشان داد که مدل مورد بررسی در پیش‌بینی مولفه‌های موج دقت مناسبی داشته است [۱۲]. 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 [۱۳]. لطف‌اللهی یقین و همکاران (۱۳۹۲) به مدل‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص دریای

وظیفه مطالعه خصوصیات امواج از نقطه نظر اثرات آن در مهندسی سواحل دارای اهمیت می‌باشد. امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل بوده و دارای تأثیر عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراه‌ها و سایر مصارف ساحلی و دریایی می‌باشند. همچنین به علت اثرگذاری عوامل مختلف بر ارتفاع و پرپود امواج رسیده به سازه‌های دریایی، شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی نمایند [۱]. هر چند بررسی وضعیت دریا همواره مورد توجه بوده، با این وجود مدل‌های ریاضی در مورد مسائل دریا تا قرن ۱۹ پیشرفت چندانی نداشت ولی امروزه با گسترش مدل‌های عددی در سراسر دنیا به ارزیابی‌های دقیقی از وضعیت دریاها، دریاچه‌ها و بنادر پرداخته شده است. امروزه پژوهشگران با ابداع و پیشرفت علمی چون روش‌های هوشمند که ابزاری توانمند، انعطاف‌پذیر و مستقل از مدل‌های دینامیکی سیستم هستند، در جستجوی راه‌هایی برای پیشرفت و شبیه‌سازی 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 فیلیبس 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. همچنین پژوهشگرانی چون پیرسن و موسکوویچ و هاسلمن در این زمینه مطالعاتی انجام دادند [۳، ۴]. عابد علم‌دوست و کراچیان (۲۰۱۲) به پیش‌بینی 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 [۶]. کریشنا کومار و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه عصبی یادگیرنده

۰/۹۷۹ نسبت به همبستگی ۰/۵۲۴ و ۰/۵۲۵ برای روش‌های ANN و GP در مسئله مورد بررسی بوده است [۱۷]. در این مطالعه با توجه به توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری در شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت بالا به شبیه‌سازی ارتفاع موج با استفاده از پنج الگوریتم فراابتکاری، با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط بویه در منطقه چابهار پرداخته شده است. کدنویسی الگوریتم‌های WCA، GA، PSO، HS و ICA در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2012a) انجام شد. از نوآوری این تحقیق می‌توان به آزمون و کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در شبیه‌سازی امواج دریا که دارای عدم قطعیت می‌باشد، نام برد.

۲- مواد و روش‌ها

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. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی دوارتن این منطقه در محدوده اقلیمی خشک واقع می‌شود. خلیج چابهار بزرگ‌ترین خلیج ایران در حاشیه سواحل دریای عمان و نزدیک‌ترین آبراه به اقیانوس هند است. این خلیج به خاطر شکل حلقه‌ای (Ω) خود در زمین‌شناسی از نوع خلیج امگایی یا نعلی شکل می‌باشد. شکل‌های (۱) و (۲) نشان‌دهنده موقعیت این منطقه می‌باشد. عرض دهانه آن حدود ۲۰ کیلومتر و فاصله شرق تا غرب آن حدود ۱۷ کیلومتر است. چابهار دارای ۱۱ کیلومتر مربع مساحت و ۵۹۲۰ کیلومتر سطح آب‌های ساحلی می‌باشد [۱۸].

میانگین دمای هوای این منطقه ۲۶/۵ درجه سانتی‌گراد است. قرار گرفتن در مسیر بادهای موسمی شبه قاره هند به نام "مونسون" در تابستان، چابهار را به خنک‌ترین و در زمستان آن را به گرم‌ترین بندر جنوبی کشور تبدیل کرده است [۱۹]. 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. متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه شامل سرعت و جهت باد، سرعت تند باد، فشار و دمای هوا، دمای آب، رطوبت و ارتفاع موج می‌باشد (جدول (۱)).

خزر با استفاده از نظریه آشوب پرداختند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول این نظریه در پیش‌بینی کمی ارتفاع موج شاخص دریا در منطقه مورد بررسی بوده است [۱۴]. رجائی و شهبابی (۱۳۹۳) به پیش‌بینی تغییرات کوتاه مدت تراز سطح دریا در منطقه چابهار با استفاده از مدل ترکیبی موجک- شبکه عصبی پرداختند. نتایج حاصل از مدل مورد بررسی با دو روش، مدل شبکه عصبی و رگرسیون خطی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از برتری مدل ترکیبی موجک- شبکه عصبی در پیش‌بینی تراز سطح دریا در دوره کوتاه مدت (۱۲ ساعته) نسبت به دو مدل دیگر بوده است [۱۵]. ایمانی و کامران‌زاده (۱۳۹۴) با استفاده از داده‌های ۶ ساعته باد، مدل اروپایی و اطلاعات موج اندازه‌گیری شده در بویه چابهار و مدل عددی SWAN، ارتفاع امواج در خلیج چابهار را مدل‌سازی کردند. از آنجا که دقت میدان باد ورودی مدل عددی، تاثیر زیادی در دقت نتایج خروجی مدل دارد، چگونگی تاثیر 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 SWAN مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که اصلاح خروجی‌های مدل عددی دقت بیشتری را در مقایسه با اصلاح میدان باد ورودی مدل نشان می‌دهد [۱۶].

در این پژوهش با توجه به توانایی بالای الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل مختلف بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، به پیش‌بینی ارتفاع موج دریا با استفاده از تعدادی الگوریتم فراابتکاری پرداخته شده است. همانطور که به تازگی در پژوهش روی و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان داده شده است، الگوریتم‌های فراابتکاری جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم سنتی که در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت‌کارایی کافی ندارند، می‌باشند. روی و همکاران (۲۰۱۶) به مقایسه روش‌های مرسوم سنتی و محاسبات نرم ترکیبی در اقیانوس اطلس شمالی پرداختند. آن‌ها مدلی ترکیبی بر مبنی ماشین بردار پشتیبان (SVM) به همراه الگوریتم کرم شب عصبی (FFA) توسعه دادند. همچنین از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) به عنوان روش‌های مرسوم سنتی جهت مقایسه استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری روش پیشنهادی (SVM-FFA) با همبستگی



شکل (۲) موقعیت منطقه چابهار در پهنه ایران.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

توسط سیستم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری خاص پردازش می‌شود و فقط اطلاعات ارتفاع و پیروید مشخصه متوسط موج در فواصل زمانی مشخص (معمولاً ۳ ساعت) به صورت متوسط به ایستگاه مادر در ساحل ارسال می‌گردد [۲۰]. برای انجام این پژوهش از اطلاعات موج و اطلاعات هواشناسی در منطقه واقع در بویه شامل فشار هوا، دمای هوا، سرعت باد و دمای آب استفاده شده است.

۲-۱- ثبت داده توسط بویه‌های موج نگار

معمولاً بویه‌های موج نگار تغییرات تراز سطح آب را برحسب زمان ثبت می‌نمایند. برخی از آن‌ها در چند سال اخیر در آب‌های ایران به آب انداخته شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به علت تعداد زیاد داده‌ها و محدودیت حافظه بویه‌های موج نگار معمولاً اطلاعات اولیه در خود موج نگار

جدول (۱) نمونه‌ای از داده‌های ساعتی برداشته شده توسط بویه در منطقه چابهار.

سرعت تند باد (ms^{-1})	فشار هوا (Hpa)	رطوبت نسبی (%)	دمای آب ($^{\circ}C$)	دمای هوا ($^{\circ}C$)	جهت باد (Deg)	سرعت باد (ms^{-1})	ارتفاع موج شاخص (m)	ساعت	
۰/۹۹	۱۰۱۳/۲۸۱	۷۸/۴۱	۲۳/۵۹	۲۱/۶۲	۲۳۲/۷۳	۰/۰۵۸	۰/۲۷۳	۱۹:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۱
۶/۰۳	۱۰۱۳/۲۲۱	۷۵	۲۳/۵۹	۲۱/۵۶	۱۷۶/۴۸	۴/۳۹	۰/۲۳۴	۲۰:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۱
۳/۹	۱۰۱۴/۱۱۶	۸۰/۳۷	۲۳/۴	۲۱/۴۴	۱۸۷/۰۳	۳/۱	۰/۳۱۲	۲۱:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۱
۴/۸	۱۱۴/۴۵۳	۷۹/۸۸	۲۳/۴	۲۱/۵۰	۱۸۱/۴	۳/۴۵	۰/۳۱۲	۲۲:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۱
۳/۷	۱۱۴/۴۵۳	۳۱/۷۴	۲۳/۴	۲۱/۶۲	۱۶۳/۸۲	۲/۸۱	۰/۳۵۱	۲۳:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۱
۴/۲	۱۰۱۳/۲۲۱	۷۶/۴۶	۲۳/۴	۲۱/۸۵	۱۶۳/۸۲	۲۰/۶	۰/۳۹	۰۰:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۲
۵/۱	۱۰۱۳/۲۸۱	۷۹/۱۹	۲۳/۳	۲۱/۹۱	۱۵۱/۱۷	۲/۶۹	۰/۴۲۹	۱:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۲
۴/۳	۱۰۱۳/۴۲۸	۸۳/۶۹	۲۳/۳	۲۰/۹۷	۱۳۵/۷	۳/۳۹	۰/۴۲۹	۲:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۲
۳/۴	۱۰۱۲/۶۹۵	۸۷/۵۹	۲۳/۳	۲۰/۲۷	۴۴/۲۹	۲/۸۱	۰/۳۹	۳:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۲
۴/۵	۱۰۱۱/۹۶۳	۸۵/۷۴	۲۳/۳	۲۰/۶۲	۳۷/۲۶	۲/۲۸	۰/۴۲۹	۴:۳۰	۱۳۸۶/۵/۱۲

از قطرات باران خوب به عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان پیدا می‌کنند. در روش WCA به یک راه‌حل واحد «قطره باران» اطلاق می‌شود. در روش‌های PSO, GA, و HS و ICA اصطلاحاً چنین آرایه‌ای به ترتیب «کروموزوم»، «موقعیت ذرات»، «حافظه هارمونی» و «کشور» نامیده می‌شوند. در یک مسئله بهینه‌سازی چند بعدی، یک قطره

۲-۲- الگوریتم چرخه آب (WCA)

الگوریتم چرخه آب یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید است که توسط اسکندر و همکاران (۲۰۱۲)، بر پایه چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت ارائه شد [۲۱]. مشابه دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، روش WCA نیز با جمعیت اولیه به اصطلاح قطرات باران شروع می‌شود. در ابتدا، فرض می‌شود که باران یا بارش وجود دارد. بهترین فرد (بهترین قطره آب) به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی

که، C مقداری بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای C برابر با دو در نظر گرفته می شود [۲۱]. d فاصله فعلی بین نهر و رودخانه می باشد. مقدار X در رابطه (۷) متناظر با یک عدد تصادفی توزیع شده (یکنواخت و یا ممکن است هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و $(C \times d)$ می باشد. موقعیت جدید نهرها و رودخانهها را می توان با روابط (۸) و (۹) محاسبه نمود.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (8)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (9)$$

که، $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع شده بین صفر و یک است. اگر راه حل ارائه شده توسط یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می شود (یعنی نهر، رودخانه می شود و رودخانه، نهر می شود). این تبادلی نیز می توانند به همین شکل برای رودخانهها و دریا اتفاق افتد.

یکی از مهم ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم (همگرایی نابالغ) و به دام افتادن در بهینه های محلی جلوگیری می کند تبخیر است. فرآیند تبخیر باعث می شود که آب دریا با تبخیر به صورت جریان رودخانهها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. شبه کد زیر چگونگی تعیین اینکه آیا رودخانه به دریا می ریزد یا نه را نشان می دهد.

$$\text{if } |X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i \rightarrow 1, 2, 3, \dots, N_{SR} - 1 \quad (10)$$

پایان \rightarrow فرآیند بارش و تبخیر

که، d_{max} عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است. بنابراین، اگر فاصله بین رودخانه و دریا کمتر از d_{max} باشد، نشانگر آن است که رودخانه به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرآیند تبخیر اثر می کند و همان طور که در طبیعت دیده می شود بعد از تبخیر کافی، باران (بارش) شروع خواهد شد. d_{max} شدت جستجو در نزدیکی دریا (راه حل بهینه) را کنترل می کند. مقدار d_{max} به صورت رابطه (۱۱) در هر مرحله کاهش می یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\text{Max Iteration}} \quad (11)$$

پس از برآورده شدن فرآیند تبخیر، فرآیند بارندگی اعمال می شود. در فرآیند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان های مختلف تشکیل می دهند (شبهه به عملگر جهش

باران، آرایه ای به شکل $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می شود.

$$\text{Raindrop} = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_{var}}] \quad (1)$$

که، X_1 تا $X_{N_{var}}$ بیانگر متغیرهای تصمیم می باشند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه $N_{pop} \times N_{var}$ به طور تصادفی ایجاد می گردد.

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} \text{Raindrop}_1 \\ \text{Raindrop}_2 \\ \vdots \\ \text{Raindrop}_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & X_3^1 & \dots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & X_3^{N_{pop}} & \dots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که، N_{var} و N_{pop} به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی می باشند. مقادیر تابع هزینه (۳) داده شده از رابطه (۳) به دست می آید.

$$C_i = \text{Cost}_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{N_{var}}^i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (3)$$

که، C_i مقدار هدف هر قطره می باشد. در گام اول، به تعداد N_{pop} قطره باران ایجاد و سپس به تعداد N_{SR} از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به عنوان دریا و رودخانه انتخاب می شوند. قطره باران با کمترین مقدار به عنوان دریا در نظر گرفته می شود. N_{SR} ، مجموع تعداد رودخانهها (که یک پارامتر کاربردی است) و یک دریا (رابطه ۴) می باشد. بقیه جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانهها و یا به طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \overset{\text{sea}}{\bar{1}} \quad (4)$$

$$N_{\text{Raindrops}} = N_{\text{pop}} - N_{SR} \quad (5)$$

به منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانهها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه (۶) استفاده می شود.

$$N_{S_n} = \text{round} \left\{ \left(\frac{\text{Cost}_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} \text{Cost}_i} \right) \times N_{\text{Raindrops}} \right\}, \quad n = 1, 2, \dots, N_{SR} \quad (6)$$

که، N_{S_n} تعدادی از نهرها است که به رودخانههای خاص و یا دریا جریان می یابد. یک نهر جریان تا رسیدن به رودخانه در امتداد خط اتصال بین آنها با استفاده از یک فاصله که به طور تصادفی انتخاب شده، جریان می یابد که این فاصله با توجه به رابطه (۷) مشخص می شود.

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \quad (7)$$

که در آن، N تعداد گام‌های زمانی، O_t و S_t به ترتیب ارتفاع موج مشاهداتی و محاسبه شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی (محاسباتی) در زمان t می‌باشند.

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و شاخص توافق ویلموت (d) بهره‌برده شده است که در معادلات (۱۶) تا (۱۹) آورده شده‌اند [۲۲].

$$R^2 = \left(\frac{\sum(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \times \sum(S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (17)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (18)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{S}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (19)$$

در روابط فوق S_i داده‌های محاسبه شده از الگوریتم‌های مورد بررسی، O_i داده‌های مشاهداتی، \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی و n تعداد مشاهدات می‌باشد. دامنه تغییرات شاخص توافق ویلموت از $-\infty$ تا 1 است که مقدار 1 توافق کامل بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد. کم بودن مقدار RMSE و بالا بودن و نزدیک به یک بودن ضریب R^2 بیانگر دقت قابل قبول مدل و همبستگی بین داده‌ها و نشان دهنده برتری آن نسبت به مدل دیگر است. MAE اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای را نشان می‌دهد که هرچه این مقدار کوچکتر باشد یعنی کار نتیجه بخش‌تر است [۲۲].

۲-۴- اعتبارسنجی الگوریتم‌ها با استفاده از توابع

محک

برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های مورد بررسی، از شش تابع محک استاندارد استفاده شد. جدول (۲) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری 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. نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) نشان‌دهنده عملکرد بالایی

در (GA). برای تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل گرفته، از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (12)$$

که، LB و UB به ترتیب، کران پایین و بالای تعریف شده توسط مسئله است. بهترین قطرات باران جدید تشکیل شده به عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران جدید به عنوان نهرهای جدید که به سمت رودخانه‌ها در جریانند و یا ممکن است به طور مستقیم به دریا برسند، در نظر گرفته می‌شوند. به منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = X_{Sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (13)$$

که، μ ضریبی است که محدوده جستجوی در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد. $randn$ عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقادیر بزرگ μ امکان خروج از منطقه امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد و مقادیر کوچک μ منجر به جستجوی الگوریتم در منطقه کوچک‌تر در نزدیکی دریا می‌شود. مقدار مناسب μ ، 0.1 تعیین شده است [۲۱].

۲-۳- پیش‌پردازش داده‌ها و معیارهای ارزیابی

پیش‌پردازش شامل انتخاب متغیرهای موثر، انتخاب الگوهای آموزش و آزمون و نیز نرمال‌سازی (بی‌بعدسازی) داده‌ها می‌شود. اصولاً وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت مسئله می‌شود. برای احراز از چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان کردن ارزش داده‌ها برای ورود به مدل، عمل بی‌بعدسازی صورت گرفته است. معمولاً نرمال‌سازی الگوها، تبدیلی است که در آن‌ها داده‌ها از مقدار واقعی به بازه مشخصی مانند $[0, 1]$ نگاشت می‌شوند. در این پژوهش کلیه داده‌های ورودی قبل از اعمال با استفاده از معادله ۱۴ نرمال شدند:

$$Z_i = \frac{(X_i - X_{min})}{X_{max} - X_{min}} \quad (14)$$

که در آن‌ها X_i مقدار مشاهده شده در گام زمانی i ام، X_{max} بیشترین مقدار مشاهداتی و X_{min} کمترین مقدار مشاهداتی می‌باشد.

در پژوهش حاضر، تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مطابق رابطه ۱۵ تعریف شده است:

$$OF = \sum_{t=1}^N (O_t - S_t)^2 \quad (15)$$

سرعت و جهت باد، سرعت تندباد، فشار و دمای هوا، دمای آب و رطوبت به شبیه‌سازی ارتفاع موج شاخص با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته شده است. در این پژوهش معادله تجربی برای محاسبه ارتفاع موج با استفاده از یک زمان تأخیر در داده‌ها در معادله (۲۰) آمده است.

$$\begin{aligned} Wh(i+1) = & A(1) \times Wh(i)^{B(1)} + \\ & A(2) \times Pa(i)^{B(2)} + A(3) \times Ta(i)^{B(3)} \\ & + A(4) \times M(i)^{B(4)} + A(5) \times Tw(i)^{B(5)} \\ & + A(6) \times Wd(i)^{B(6)} + A(7) \times Hs(i)^{B(7)} \\ & + A(8) \times Ws(i)^{B(8)} + A(9) \end{aligned} \quad (20)$$

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، A ماتریس ضرایب و B ماتریس توان‌ها می‌باشد.

الگوریتم WCA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در مسائل با ابعاد کوچک (۲ بعدی)، عملکرد هر پنج الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است. با افزایش بعد مسأله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با بعد ۱۰)، عملکرد الگوریتم‌ها سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است، اما الگوریتم WCA نسبت به الگوریتم‌های دیگر خطای پایین‌تری دارند. بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله شبیه‌سازی ارتفاع امواج در جدول (۳) آمده است.

۳- بحث و نتایج

در این پژوهش با استفاده از داده‌های ساعتی ارتفاع موج ثبت شده در بویه موج نگار سازمان بنادر و کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران و همچنین داده‌های آب-هواشناسی شامل

جدول (۲) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری روی توابع محک استاندارد.

تابع	بعد	مقدار هدف	GA	HS	PSO	ICA	WCA
Goldsten-Price	۲	۳	۳/۰۰۰۴	۳	۳	۳	۳
McCormick	۲	-۱/۹۱۳۳	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲
Rosenbrock	۲	۰	۲/۳×۱۰ ^{-۵}	۱/۰۸×۱۰ ^{-۶}	۰	۲/۷×۱۰ ^{-۱۵}	۸/۹۱×۱۰ ^{-۹}
Rosenbrock	۱۰	۰	۴/۵۵	۱/۴۳	۰/۰۳۵	۰/۰۵۵	۴/۰۶۴×۱۰ ^{-۷}
Shekel	۴	-۱۰/۵۳۶۴	-۱۰/۴۳۳۹	-۶/۴۶۱۹	-۱۰/۵۳۳۲	-۱۰/۵۳۳۲	-۱۰/۵۳۳۲
Six-Hump Camel	۲	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶

جدول (۳): مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله شبیه‌سازی ارتفاع امواج.

پارامتر	تعداد تکرار	N _{pop}	N _{SR}	N _{var}	C ₁	C ₂	dmax
WCA	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۲۰	۱۷	۲	۱
PSO	پارامتر	تعداد تکرار	N _{pop}	N _{var}	C ₁	C ₂	*
PSO	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۱۷	۱/۴۹	۱/۴۹	*
ICA	پارامتر	تعداد تکرار	تعداد کشور اولیه	تعداد متغیرهای تصمیم	تعداد استعمارگر اولیه	نرخ انقلاب	نرخ جذب
ICA	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۱۷	۲۰	۰/۴	۰/۵
GA	پارامتر	تعداد تکرار	N _{pop}	تعداد ژن‌ها	نرخ جهش	نرخ تزیج	*
GA	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۱۷	۰/۰۱	۰/۸	*
HS	پارامتر	تعداد تکرار	اندازه حافظه هارمونی	تعداد متغیرهای تصمیم	HMCR	PAR	*
HS	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۱۷	۰/۹۵	۰/۳	*

۳-۱- شبیه‌سازی ارتفاع موج ساعتی

در شبیه‌سازی ساعتی ارتفاع موج، سری زمانی داده‌های مورد استفاده از تاریخ ۱۳۸۵/۱۱/۱۸ تا ۱۳۸۵/۱۲/۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. بهترین مقدار برای ماتریس ضرایب (A) و ماتریس توان‌ها (B) که توسط الگوریتم‌های مورد بررسی بهینه شده در جداول (۴) و (۵) آورده شده‌اند.

همان‌طور که در جداول (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، با توجه به ضریب ارتفاع موج با یک ساعت تاخیر در تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی، می‌توان این برداشت را نمود که این پارامتر بیشترین تاثیر را در شبیه‌سازی ارتفاع موج ساعتی دارد. بعد از پارامتر ارتفاع موج، سرعت باد با ضرایب مثبتی که حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی می‌باشد تاثیرگذارترین پارامتر در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا می‌باشد.

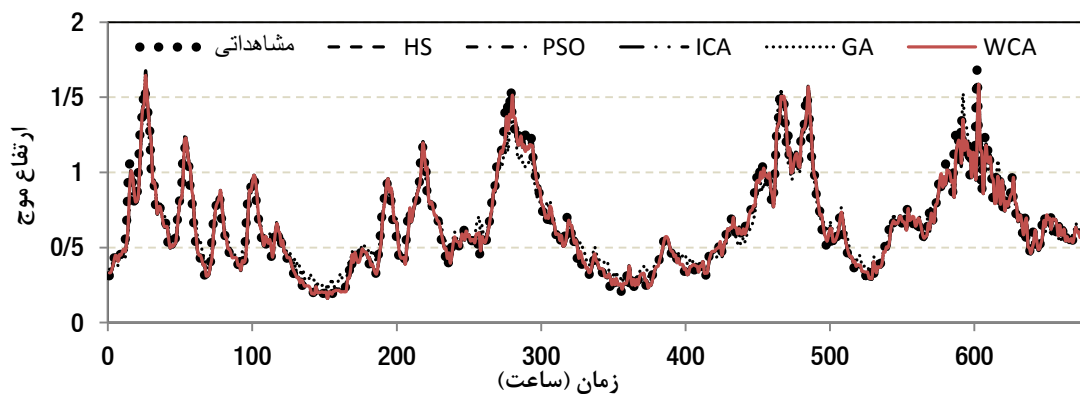
شکل (۳) مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه ساعتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، تمامی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج دریا دارند. در بین الگوریتم‌های مورد بررسی، الگوریتم‌های WCA، PSO و ICA به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۵۰۷، ۰/۹۵۰۶ و ۰/۹۵۰۱، بهترین عملکرد را داشته‌اند و در پیش‌بینی نقاط بیشینه و کمینه سری زمانی ارتفاع موج قابلیت بالایی داشته و توانسته‌اند به خوبی و با دقت بالا نقاط بیشینه و کمینه را برآورد کنند. همچنین الگوریتم GA با ضریب تبیین ۰/۹۲۹۳، عملکرد ضعیف‌تری در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا در بازه ساعتی را داشته است.

جدول (۴) ماتریس ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه ساعتی.

	A(9)	A(8)	A(7)	A(6)	A(5)	A(4)	A(3)	A(2)	A(1)	
WCA	۰	۰/۱۸۹۱	-۰/۱۲۰۳	-۰/۰۱۳۵	۰/۰۲۵۷۵	۰/۰۱۱۲۴	۱/۴۱۲۳	۰/۰۷۳۹۵	۰/۸۸۶۱۴	
GA	$۳/۳ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۲۹۳۶	-۰/۰۶۸	۰/۰۴۳۸	۰/۰۶۶۹	-۰/۰۳۵	۰/۰۹۳۲	۰/۲۶۷۵	۰/۷۰۶۹	
PSO	$۶/۷ \times ۱۰^{-۱۷}$	۰/۱۸۹۶	-۰/۱۱۸۰	-۰/۰۱۳۲	۰/۰۳۵۴	۰/۰۱۴۱	۰/۱۳۶۴	۰/۰۶۷۲	۰/۸۸۳۷	
HS	$۱/۳۹ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۱۷۳۷	-۰/۱۲۷۶	-۰/۰۱۷۴	۰/۰۴۵۴	۰/۰۲۷	۰/۱۲۴۸	۰/۰۴۳۳	۰/۹۱۱۴	
ICA	$۴/۷۱ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۲۸۷۵	-۰/۱۹۷۲	-۰/۰۰۸۹	۰/۰۳۴۵	۰/۰۱۶۸	۰/۰۷۰۶	۰/۰۶۸۱	۰/۸۸۰۴	

جدول (۵) ماتریس توان‌های بهینه شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه ساعتی.

	B(8)	B(7)	B(6)	B(5)	B(4)	B(3)	B(2)	B(1)	
WCA	۲/۸۷۹۵	۱۵/۱۱۶۸	۲/۵۴۱۶	۱/۳۳۶۴	۵/۳۲۴۸	۶۰/۶۵۳۲	۷/۶۰۲۸	۰/۹۴۴۳۲	
GA	۳/۰۱۴۹	۱۲/۵۳۸	۳/۳۳۸	۳/۷۸۶	۳/۹۶۷	۲۹/۳۱	۷/۲	۰/۸۹۴۷	
PSO	۲/۸۴۶	۱۶/۲۳۹	۳/۴۹۶۱	۲/۱۶۸۵	۶/۰۴۹۶	۶۰/۶۳۹	۶/۱۵۲۴	۰/۹۴۵۸	
HS	۳/۱۸	۱۷/۲۵۵	۳/۸۵۲	۴/۸۴۸	۸/۸۳۹	۵۰/۴	۶/۸۵۴	۰/۹۹۵۹	
ICA	۳/۴۲۸	۶/۸۸۸	۲/۴۹۲	۲/۱۰۸	۶/۲۶۵۵	۲۲/۵۵۷	۵/۶۴۲	۰/۹۴۷۳	



شکل (۳) مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه ساعتی.

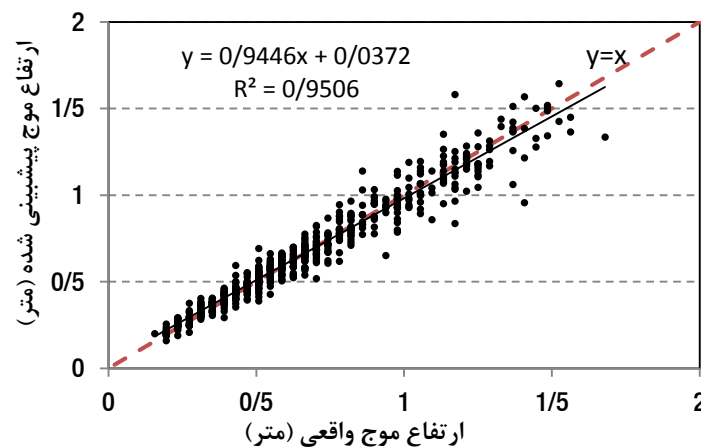
که توسط الگوریتم‌های مورد بررسی بهینه شده در جداول (۶) و (۷) آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که ضریب ارتفاع موج با یک روز تاخیر در تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی بیشترین تاثیر را در شبیه‌سازی ارتفاع موج روزانه دارد. بعد از پارامتر ارتفاع موج، سرعت باد با ضرایب مثبتی که در رابطه تجربی پیش‌بینی ارتفاع موج ایجاد می‌کند، تاثیرگذارترین پارامتر در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا می‌باشد.

شکل (۵) مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در بازه زمانی روزانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، تمامی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج دریا دارند.

شکل (۴) مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم WCA را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود عمدتاً داده‌ها بر روی خط نیمساز متمرکز شده و ضریب تبیین، $0/9506$ نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم WCA در پیش‌بینی ساعتی ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار می‌باشد.

۳-۲- شبیه‌سازی ارتفاع موج روزانه

در شبیه‌سازی روزانه ارتفاع موج، سری زمانی ۵ ساله داده‌ها از تاریخ $1386/1/1$ تا $1390/12/29$ مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار ماتریس ضرایب (A) و ماتریس توان‌ها (B)



شکل (۴) مقادیر ارتفاع موج واقعی و شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم WCA در بازه ساعتی.

جدول (۶) ماتریس ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه روزانه.

A(9)	A(8)	A(7)	A(6)	A(5)	A(4)	A(3)	A(2)	A(1)	
$1/1 \times 10^{-2}$	0/2926	-0/459	-0/297	-0/0513	0/0256	0/0823	-0/0172	0/86316	WCA
$6/28 \times 10^{-2}$	0/2622	0/22	0/0049	-0/0795	0/3172	0/1471	-0/1031	0/4213	GA
$6/7 \times 10^{-17}$	$5/2 \times 10^{-10}$	0	0	-0/057	0/037	0/0625	-0/0203	0/8361	PSO
$1/9 \times 10^{-2}$	0/0539	$3/3 \times 10^{-3}$	-0/0238	-0/0117	0/0397	0/0159	-0/055	0/8521	HS
0	$1/68 \times 10^{-5}$	$5/9 \times 10^{-9}$	3×10^{-6}	-0/0174	0/0339	0/0607	-0/0075	0/8551	ICA

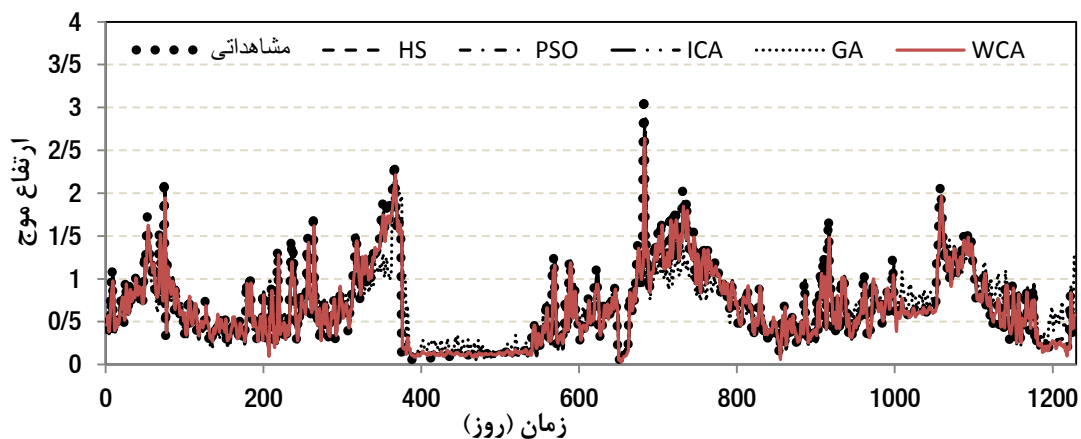
جدول (۷) ماتریس توان‌های بهینه شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه روزانه.

B(8)	B(7)	B(6)	B(5)	B(4)	B(3)	B(2)	B(1)	
1/11	1/692	1/021	19/185	4/164	9/414	4/801	0/9612	WCA
2/204	8/417	4/373	1/362	7/0355	12/879	1/407	0/575	GA
2/585	4/04	4/198	14/307	2/749	5/033	0	0/877	PSO
1/43	14/395	3/964	3/53	8/325	11/89	3/262	0/935	HS
3/661	6/816	3/142	1/009	3/928	4/994	9/245	0/909	ICA

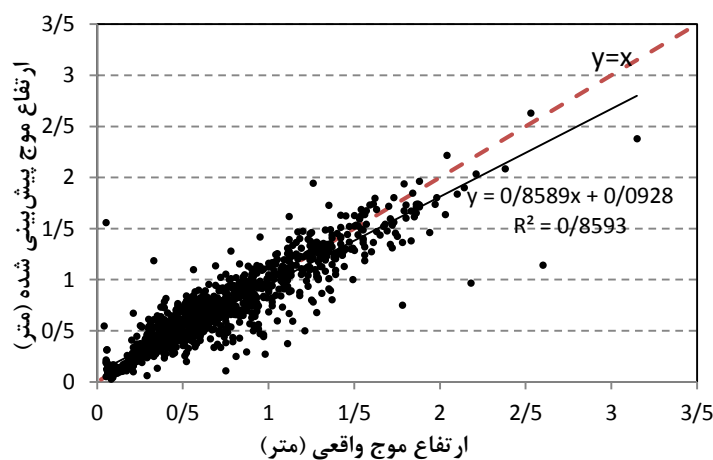
بررسی در شبیه‌سازی ساعتی موفق‌تر از بازه روزانه عمل کرده‌اند. این دقت نشان‌دهنده اثرگذاری داده‌های دقیق و از نظر زمانی نزدیک به هم در شبیه‌سازی ارتفاع موج است. لازم به ذکر است که این وابستگی روش‌ها به داده‌های ساعتی حاکی از اثرگذاری پارامترها بر روی یکدیگر در کوتاه مدت در طبیعت است.

در جدول (۸) نتایج کلی شبیه‌سازی ارتفاع موج با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری 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) و شاخص توافق ویلموت (d) نیز آمده است. به وسیله این جدول و این مقادیر می‌توان میزان اختلاف داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های محاسبه شده را مشاهده کرد.

در بین الگوریتم‌های مورد بررسی، الگوریتم WCA با ضریب تبیین ۰/۸۵۹۳ و دقت بالا در پیش‌بینی نقاط بیشینه و کمینه، بهترین عملکرد را داشته، که نشان دهنده قابلیت بالای این الگوریتم در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا که دارای عدم قطعیت بالایی است، می‌باشد. همچنین الگوریتم GA با ضریب تبیین ۰/۶۹۹، عملکرد ضعیف‌تری در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا در بازه زمانی روزانه داشته است. شکل (۶) مقادیر ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در بازه زمانی روزانه، توسط الگوریتم WCA، در مقابل یکدیگر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تا حدودی تمرکز داده‌ها بر روی خط نیمساز بوده و ضریب تبیین، ۰/۸۵۹۳ نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول الگوریتم WCA در پیش‌بینی روزانه ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار می‌باشد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه آن‌ها در دو بازه ساعتی و روزانه مشاهده می‌شود که روش‌های مورد



شکل (۵) مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در بازه روزانه.



شکل (۶) مقادیر ارتفاع موج واقعی و شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم WCA در بازه روزانه.

جدول (۸) آماره‌های آماری حاصل از مقایسه ارتفاع موج مشاهداتی و محاسباتی.

بازه زمانی	الگوریتم‌ها	RMSE	MAE	d	R ²	SSQ
ساعتی	WCA	۰/۰۶۹۷	۰/۰۴۷۳	۰/۹۸۷۱	۰/۹۵۰۶	۱/۴۰۹۸
	GA	۰/۰۸۷۷	۰/۰۶۶۵	۰/۹۷۷۶	۰/۹۲۹۳	۲/۲۲۷۹
	PSO	۰/۰۶۹۶	۰/۰۴۷۳	۰/۹۸۷۱	۰/۹۵۰۷	۱/۴۰۶۷
	HS	۰/۰۷۰۷	۰/۰۴۸	۰/۹۸۶۸	۰/۹۴۹۲	۱/۴۴۸۸
	ICA	۰/۰۷۰۱	۰/۰۴۷۸	۰/۹۸۷	۰/۹۵۰۱	۱/۴۲۳۴
روزانه	WCA	۰/۱۷۱۵	۰/۱۰۸۸	۰/۹۶۱۱	۰/۸۵۹۳	۳/۸۲۴۲
	GA	۰/۲۵۱۵	۰/۱۷۱۵	۰/۹۰۰۷	۰/۶۹۹	۸/۰۳۲۵
	PSO	۰/۱۷۴۴	۰/۱۱	۰/۹۵۹۶	۰/۸۵۴۵	۳/۸۶۳۴
	HS	۰/۱۷۸۷	۰/۱۱۴۱	۰/۹۵۸۷	۰/۸۴۸۱	۴/۰۵۶
	ICA	۰/۱۷۴۸	۰/۱۰۹۸	۰/۹۵۹۶	۰/۸۵۳۸	۳/۸۸۰۹

دریا در بازه ساعتی را داشته‌اند. همچنین در بازه روزانه الگوریتم WCA با ضریب تبیین ۰/۸۵۹۳، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار داشته است.

دقت قابل قبولی داشته که نشان دهنده کارآمدی آن‌ها در پیش‌بینی مسائل آب-هواشناسی که تا پیش از این در این زمینه کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌باشد. همچنین ضرایب بدست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای معادله تجربی میزان اثرگذاری عواملی چون ارتفاع موج و سرعت باد با یک واحد تاخیر را بر ارتفاع موج نشان می‌دهد. الگوریتم چرخه آب در پیش‌بینی ارتفاع موج، برتری نسبی در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی داشته است. در نهایت با توجه به سرعت عمل، دقت بالا و سهولت اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل مهندسی دریا از یک‌سو، و لزوم توجه، توسعه و تمرکز بر روی طیف‌های بومی پیش‌بینی کننده امواج از سوی دیگر، به نظر می‌رسد این روش‌های هوشمند اگر همراه با طیف‌های پیش‌بینی کننده امواج مورد استفاده قرار گیرند نتایج رضایت بخشی خواهند داشت.

۵- مراجع

[۱] درخشان، ش.، مصطفی قره‌باغی، ا. و چنقلو، م. "پیش‌بینی مشخصات امواج دریا با روش‌های تجربی در منطقه بوشهر"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شریف، تهران، ۱۳۸۳.

همانطور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های WCA، PSO، ICA و به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۵۰۷، ۰/۹۵۰۶ و ۰/۹۲۹۳، عملکرد ضعیف‌تری در پیش‌بینی ارتفاع موج

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری WCA، GA، PSO، HS و ICA به شبیه‌سازی ارتفاع موج در دو بازه ساعتی و روزانه بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ برای منطقه چابهار پرداخته شد. به منظور بکارگیری داده‌ها در شبیه‌سازی ارتفاع موج با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، ابتدا داده‌ها به صورت نرمال درآمدند که این امر موجب تسریع کار و افزایش دقت در الگوریتم‌های مورد بررسی گردید. پیش از استفاده از داده‌های ارتفاع موج، نیاز یا عدم نیاز به ضریب اصلاحی (ضریب پایداری) در آن بررسی شد که نتایج نشان دهنده عدم نیاز داده‌ها به استفاده از این ضرایب بود. نتایج حاصل شده حاکی از عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم‌های فراابتکاری در هر دو بازه زمانی می‌باشد، به گونه‌ای که ضریب تبیین (R²) برای الگوریتم‌های WCA، GA، PSO، HS و ICA در بازه ساعتی به ترتیب برابر ۰/۹۵۰۶، ۰/۹۲۹۳، ۰/۹۵۰۷، ۰/۹۴۹۲ و ۰/۹۵۰۱ و در بازه روزانه به ترتیب برابر ۰/۸۵۹۳، ۰/۶۹۹، ۰/۸۵۴۵، ۰/۸۴۸۱ و ۰/۸۵۳۸ بدست آمد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه آن‌ها در دو بازه ساعتی و روزانه مشاهده می‌شود که روش‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی ساعتی موفق‌تر از بازه روزانه عمل کرده‌اند. الگوریتم‌های مورد بررسی در پیش‌بینی نقاط اکسترمم،

- [۱۳] پورنعمت رودسری، ع.، قادری، ک.، بختیاری، ب. و احمدی، م. م. "پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از رویکرد استقرایی (GMDH)"، کنفرانس ملی بهره‌برداری از آب دریا، کرمان، ۱۳۹۰.
- [۱۴] لطف‌اللهی یقین، م. ع.، لشته‌نشانی، م. ا.، قربانی، م. ع. و بیک‌لریان، م. "مدل‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص دریای خزر با نظریه آشوب"، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)، سال چهل و پنجم، شماره ۱، صفحه ۹۷ الی ۱۰۵، ۱۳۹۲.
- [۱۵] رجایی، ط. و شهابی، ا. "کاربرد مدل ترکیبی موجک-شبکه عصبی در پیش‌بینی تغییرات کوتاه مدت تراز سطح دریا (مطالعه موردی: بندر چابهار)"، نشریه دریافنون، دوره ۱، شماره ۲، صفحه ۵۳ الی ۴۲، ۱۳۹۳.
- [۱۶] ایمانی، ح. و کامران زاده، ب. "تدقیق نتایج شبیه‌سازی عددی ارتفاع موج شاخص در چابهار"، ششمین همایش بین المللی صنایع فراساحل، تهران، ۱۳۹۴.
- [17] Roy, C., Motamedi, S., Hashim, R., Shamshirband, S. and Petković, D., "A comparative study for estimation of wave height using traditional and hybrid soft-computing methods", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, Issue. 7, pp. 1-12, 2016.
- [۱۸] حقیقی، ح. "پروژه هیدرولوژی و هیدروبیولوژی خلیج چابهار"، مجله علمی شیلات، صفحه ۱۰، ۱۳۷۴.
- [۱۹] شیرین‌منش، س. و چگینی، و. "مطالعه و بررسی برآورد انرژی قابل استحصال از موج و جریان جزر و مدی در خلیج چابهار"، مجله علوم و فنون دریایی، دوره ۱۰، شماره ۲، صفحه ۹۱ الی ۱۰۷، ۱۳۹۰.
- [۲۰] کتابداری، م. و شهریبجاری، ع. "مدل کامپیوتری جامع جهت آنالیز دیتاهای خام ناشی از بویه‌های موج‌نگار"، هشتمین همایش صنایع دریایی، بوشهر، ۱۳۸۵.
- [21] Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. and Hamdi, M., "Water Cycle Algorithm -A Novel Metaheuristic Optimization Method for Solving constrained engineering optimization problems", *Computers and Structures*, Vol.110-111, pp.151-166, 2012.
- [22] Willmott, J., "On the Validation of Models", *Physical Geography*, Vol.2, No.2, pp.184-194, 1981.
- [۲] خلیلی، ن. "پیش‌بینی بارش با استفاده از شبکه‌های عصبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵.
- [۳] لاری، ک.، پورمندی‌یکتا، ا. و مهدی‌پور، ف. "پیش‌بینی امواج ناشی از باد بر اساس مدل آماری و شبکه‌های عصبی در منطقه بوشهر"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بندر و سازه‌های دریایی، بندر عباس، ۱۳۷۹.
- [4] Pierson, W. J. and Moskowitz, L., "A Proposed Spectral Form for Developed Wind Sea Based on the Similarity Theory of S.A", *Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research*, Vol.69, pp.5181-5190, 1964.
- [5] Hasselmann, K., Barnett, T.nP., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.nE., Enke, K., Ewing, J.nA., Gienapp, H., Hasselman, D.nE., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.nJ., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. "Measurement of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North SeaWaveProject (JONSWAP)", Report, German Hydrographic Institute, Hamburg, 1973.
- [6] Abed-elmdoust, A. and Kerachian, R. "Wave Height Prediction using the Rough Set Theory", *Journal of Ocean Engineering*, Vol.54, pp.144-250, 2012.
- [7] Krishna Kumar, N., Savitha, R. and Almamun, A., "Regional Ocean Wave Height Prediction using Sequential Learning Neural Networks", *Ocean Engineering*, In Press, 2016.
- [8] Zhang, S., Zhanjie, S. and Ying, L., "An Advanced Inversion Algorithm for Significant Wave Height Estimation based on Random Field", *Ocean Engineering*, Vol.127, pp.298-304, 2016.
- [۹] زمانی، ا. و عظیمیان، ا. "پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از شبکه مصنوعی عصبی"، نهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۳.
- [۱۰] طالقانی، م. و امیرتیموری، ع. "پیش‌بینی ارتفاع امواج دریای خزر با استفاده از شبکه مصنوعی عصبی"، مجله ریاضیات کاربردی واحد لاهیجان، سال پنجم، شماره ۱۸، صفحه ۳۹ الی ۴۷، ۱۳۸۷.
- [۱۱] امانی داشلجه، ج. و بنکدار، ل. "استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی ارتفاع و پرید امواج با دوره بازگشت-های مختلف رسیده به ساحل جنوبی شهر بندعباس"، دهمین همایش صنایع دریایی، خرمشهر، ۱۳۸۷.
- [۱۲] عدالت‌پناه، ف. و رضازاده، پ. "پیش‌بینی پارامترهای موج با استفاده از مدل SWAN"، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.