

(مقاله پژوهشی)

گذری فراسوی به اصلاح روش SPM و مقایسه آن با مدل هوشمند GIDS

همایون احمدوند^۱، محمد علی نجارپور^۲، محمد اکبری نسب^۳، ایمان اسمعیلی پایین افراکتی^۴

homayoon.ahmadvand@kmsu.ac.ir

۱- دکترای فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی

۲- استادیار فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی

۳- دانشیار فیزیک دریا، دانشگاه مازندران، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی

۴- استادیار مهندسی برق، دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی برق

چکیده

در چند دهه اخیر از روش‌های مختلف الگوی پیش‌بینی موج استفاده شده است. روش‌های تجربی، مدل‌های عددی و الگوریتم محاسبات نرم از این گونه روش‌ها محسوب می‌شود. در این تحقیق، در ۲ بخش مختلف به پیش‌بینی ارتفاع امواج خلیج مکزیک پرداخته شده است. در بخش اول الگوریتم ALM و مدل GIDS و در بخش دوم روش‌های تجربی SPM و CEM بررسی شده است. بدین منظور در ابتدا با استفاده از مدل ALM و GIDS به پیش‌پردازش داده‌های جمع‌آوری شده و فاکتور تنش باد در مدل SPM پرداخته شد. پس از بررسی‌ها مشخص گردید که فاکتور تنش باد بایستی با ضریب اصلاحی بدون بعد $(p/\frac{1}{\rho}u_1^2)$ تصحیح شود. در مرحله بعد مناسب‌ترین ورودی مدل GIDS انتخاب و جهت کاهش زمان این مدل‌سازی ترکیبات مختلفی از فاکتور تنش باد اصلاح شده (U_a) با طول موج‌گاه، در نظر گرفته شد که نتیجه بر آن شد که پارامتر $U_a (gX)^{-0.02}$ مناسب‌ترین ورودی مدل GIDS در پیش‌بینی ارتفاع امواج است. در قسمت دوم مقاله هر یک از مدل‌های SPM و CEM اجرا و با مدل GIDS بهینه شده مورد مقایسه قرار داده شد. نتایج نشان داد که مدل GIDS، در پیش‌بینی ارتفاع امواج خلیج مکزیک دقت بالاتری را دارد. سپس ضریب تصحیح سرعت باد با بکارگیری الگوریتم ژنتیک اصلاح گردید و با این عمل مدل SPM اصلاح و به عنوان مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی ارائه گردید.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی ارتفاع موج - خلیج مکزیک - روش SPM - روش CEM - مدل GIDS - الگوریتم ژنتیک



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

DOI: ۱۰,۲۲۰۳۴/ijmt.۲۰۲۲,۵۴۳۶۹۶,۱۷۵۳

صص ۷۳-۹۰

۱. مقدمه

امواج یکی از مهم‌ترین پدیده‌های قابل مشاهده و اندازه‌گیری در دریا می‌باشند که در اثر نیروهای وارده بر آب‌ها نظیر فشار هوا، نیروی گرانش زمین و اجرام آسمانی و غیره به وجود می‌آیند. یکی از مهم‌ترین امواجی که در سطح آب‌های بسته یا باز تشکیل می‌شود امواج ناشی از باد است. این امواج به صورت امواج ساده ی منفرد نیستند و اکثراً به صورت امواج نامنظم منتشر می‌شوند. پارامتری که در آنالیز امواج کاربرد زیادی دارد پارامتر ارتفاع H_n است. این پارامتر نشان‌دهنده متوسط ارتفاع مربوط به n درصد از بلندترین امواج در آمار امواج ثبت شده است. به طور مثال H_{10} برابر متوسط ارتفاع مربوط به ۱۰ درصد از بلندترین امواج است. معمولاً ارتفاع امواج به صورت ارتفاع موج شاخص گزارش می‌شود که طبق تعریف برابر متوسط ارتفاع یک سوم بلندترین امواج در آمار مورد نظر است. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در این رابطه H_{rms} جذر میانگین مربعات ارتفاع موج است [۱].

$$H_s = 1.416 H_{rms} \quad (1)$$

بررسی و پیش‌بینی این ارتفاع موج در تحلیل سامانه های دریایی از جمله نیروهای وارد بر سازه های دریایی و انتقال رسوب برای طراحی، بهره برداری و مطالعات مربوط به گستره دریایی، اهمیت دارد [۲ و ۳]. پارامتر سرعت باد مهم‌ترین پارامتر تولید این گونه امواج است. در برخی تحقیقات نیز علاوه بر این پارامتر جهت باد را نیز به عنوان ورودی مدل‌های پیش‌بینی در نظر گرفته‌اند که مبین آن است که جهت باد نیز تا حدودی اندک در افزایش دقت پیش‌بینی مؤثر است [۴] در چند دهه اخیر به دلیل هزینه بر بودن مدل‌های مختلف پیش‌بینی موج از قبیل روش‌های تجربی و مدل‌های طیفی- عددی که بر اساس حل معادله تعادل انرژی طیف استوار هستند، تمایل زیادی به به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین شده است [۴-۱۴].

ولی با چشم‌پوشی از هزینه‌بر بودن مدل‌های عددی، این گونه مدل‌ها دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های محاسبات نرم هستند [۱۵]. ویرا و همکاران (۲۰۲۰) با

استفاده از شبکه عصبی به تکمیل داده های ثبت شده پرت پرداخته اند. در این تحقیق داده های موج و باد ورودی مدل بوده اند [۱۶]. ایکس ما و همکاران (۲۰۲۱)، یان و همکاران (۲۰۱۹) و کیم و هان (۲۰۲۰) در تحقیقات خود به بررسی مقدار و کیفیت داده ها در مدل سازی شبکه عصبی در پرداخته اند [۱۷-۱۹].

صادقی فر و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی^۱، سیستم استنتاج عصبی-فازی^۲ و مدل $M^{\circ}P$ به پیش بینی ارتفاع امواج خلیج فارس پرداخته اند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل $M^{\circ}P$ نسبت به سایر مدل مدل ها مناسب تر پیش بینی می کند [۲۰]. هی ونگ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق به پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص پرداخته‌اند. در این تحقیق داده‌های سه ساله ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ از مدل Wave watch III در مقیاس جهانی و اندازه‌گیری‌های SCAT به الگوریتم یادگیری عمیق با چند لایه پنهان داده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین اندازه‌گیری‌های SCAT و پیش‌بینی موج با مقدار میانگین خطای مربعات ۰/۵ متر وجود دارد [۲۱].

ساویتا و عبدالله المامون در سال ۲۰۱۷ با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری متوالی (MRAN) و شبکه رشد و هرس شعاعی (GAP-RBF) و مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (SVR) و ELM به بررسی داده‌های ارتفاع امواج سه منطقه خلیج مکزیک، منطقه کره و منطقه انگلستان پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داده است که مدل MRAN با مدل GAP-RBF بهتر از سایر مدل‌های SVR و ELM عمل می‌کنند [۲۲].

شائوبو ینگ و همکاران (۲۰۱۹) بر اساس مدل CS-BP (تلفیق مدل شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته) به پیش‌بینی ارتفاع امواج جنوب دریای چین پرداخته‌اند. سپس نتایج مدل سازی خود را با دیگر مدل‌های آماری ARIMA, BP, ELM, GA, BP, PSO-BP مقایسه نموده اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل CS-BP با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها ارتفاع موج شاخص را پیش‌بینی

ANN - ۱

ANFIS - ۲

نتایج پیش بینی مدل SPM و بهترین مدل شناسایی شده مدل GIDS پرداخته می شود.

۲. مدل و روش های مورد استفاده

۲-۱. مدل ALM

مدل ALM یکی از روش های پیش بینی و کلاس بندی داده ها است که توسط شورکی (۲۰۱۶) ابداع شده است [۲۶]. در ساختار این مدل با استفاده از عملگر IDS^2 ارتباط بین ورودی ها و خروجی ها تعیین می شود. این الگوریتم از نحوه پخش جوهر بر روی صفحه الگو گرفته است. در واقع عملگری بر پایه ی کاهش وضوح داده است که به انتشار اطلاعات در همسایگی نقاط در فضای مسئله می پردازد. بدین معنی که ما نه تنها می توانیم در برخورد با یک داده، اطلاعات مربوط به آن نقطه از فضا را داشته باشیم بلکه می توانیم اطلاعات مربوط به اطراف آن نقطه را نیز تا حدودی استخراج کنیم. ولی هر چه از آن نقطه در فضا دورتر می شویم اعتقاد کمتری به اطلاعات به دست آمده از آن نقطه وجود دارد. بنابراین از صفحات IDS دو متغیر مسیر باریک و پراکندگی داده ها حول آن ها به دست می آید. که مسیر باریک نشان دهنده رفتار خروجی نسبت به یک ورودی و پراکندگی داده ها نشان دهنده مقدار تأثیرگذاری یک ورودی بر خروجی است. چنانچه فرض کنیم که رویه ای با دو ورودی همانند شکل ۱- الف داشته باشیم، نگاشت حاصل از ورودی ها به صفحات $Y-X_1$ و $Y-X_2$ به صورت شکل های (۱-ب) و (۱-ج) خواهد بود. با اعمال عملگر پخش جوهر بر روی داده ها در صفحه $Y-X_2$ ، به شکل (۱-د) دست خواهیم یافت. روش ALM نیازمند به یک الگوریتم بهینه سازی دارد تا بتواند بهترین کارایی را از خود نشان دهد. با استفاده از ایده ی ALM و بر پایه ی اپراتور IDS اسمعیلی (۲۰۱۷) تکنیک $GIDS^3$ را معرفی نمود [۲۷]. در این ساختار به ازای هر داده آموزشی یک گروه IDS در نظر گرفته می شود و سپس با استفاده از قوانین فازی خروجی استنتاج می شود. این ساختار قابلیت نگاشت بر

می کند [۲۳]. شانداثوفن و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شبکه حافظه کوتاه مدت LSTM به پیش بینی ارتفاع امواج یک و شش ساعت آینده ۱۰ ایستگاه مختلف در آب های خارج از خلیج مکزیک پرداخته است. ورودی های این مدل سرعت باد ۴ ساعت گذشته و ارتفاع امواج و جهت باد یک ساعت گذشته بوده است. نتایج این پیش بینی با مدل های شبکه عصبی پس انتشار، ELM، SVR، الگوریتم بهینه سازی جنگل تصادفی مورد مقایسه قرار داده شده است و نتایج نشان داده که LSTM می تواند اثرات شرایط پایدار را پیش بینی نماید [۲۴]. هائودای و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از ۴ الگوی مختلف و ماشین محدود بولتزمن مشروط - شبکه اعتقاد عمیق (CRBM-DBN) به پیش بینی ارتفاع امواج خلیج مکزیک پرداخته اند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که در پیش بینی زمان های ۲۴ یا ۴۸ ساعت آینده الگوی چند متغیره ارتفاع موج شاخص، جهت موج، سرعت باد و جهت باد محدودیت شاخص های خطا به صورت $0.18 < RMSE < 0.40$ و $0.93 < CE < 0.72$ در محدوده ۲۶ درجه عرض شمالی است و به تدریج با افزایش عرض جغرافیایی به سمت شمال و کاهش عرض جغرافیایی به سمت جنوب این مقدار کاهش می یابد [۲۵]. روش های تجربی پیش بینی موج یکی از روش های پیش بینی شاخص های امواج ناشی از باد در دریا است که در دهه های گذشته مورد استفاده بوده است ولی همچنان روابط این گونه روش ها در حال بررسی و اصلاح هستند. این موضوع یکی از موضوعات مهم در مبحث فیزیک دریا است که می تواند در محاسبات مباحث انرژی های نو و حتی در محاسبات طراحی های مهندسی در نزدیک ساحل و فراساحل از آن استفاده نمود. بنابراین برای دست یافتن به این هدف در این تحقیق ابتدا با بکارگیری الگوریتم روش یادگیری فعال^۱ و مدل پیش بینی $GIDS$ پارامترهای موثر در پیش بینی امواج ناشی از باد شناسایی و سپس و با استفاده از آن مدل تجربی SPM تا حد امکان اصلاح شده است. در مرحله بعد به مقایسه

^۳ - Group of IDS

^۱ - Active Learning Method

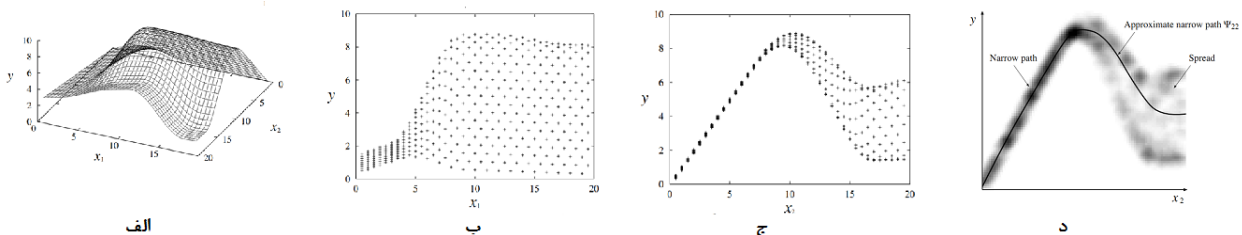
^۲ - ink drop spread

بهبینه می‌باشد. این درحالی است که پیاده‌سازی مدل GIDS آسان و نیاز به تنظیم هیچ یک از موارد فوق نیست.

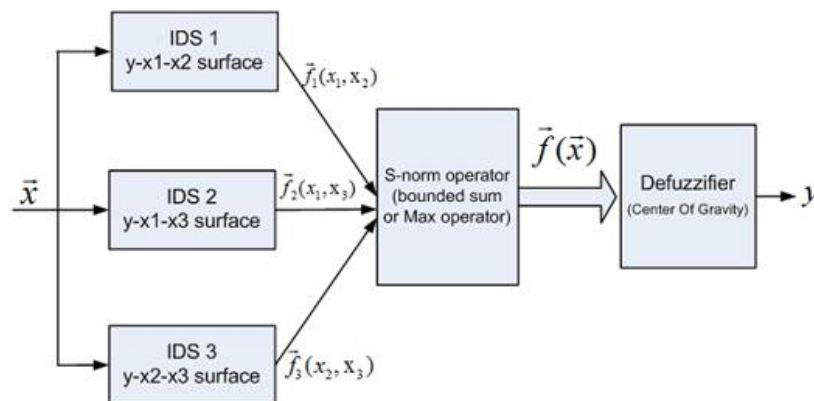
۲-۲. روش‌های آیین‌نامه‌ای پیش‌بینی امواج

روش‌های آیین‌نامه‌ای پیش‌بینی امواج بر اساس روابط تجربی و نیمه تجربی ارائه شده‌اند. این روش‌ها می‌توانند برای محاسبه مختصات امواج محلی در مناطقی که هندسه نسبتاً ساده‌ای دارند مورد استفاده قرار گیرند. در این روش‌ها معمولاً برای محاسبه ارتفاع و پریود موج شاخص و یا پریود قله طیف، از پارامترهای ورودی نظیر سرعت باد، طول موجگاه و زمان تداوم وزش باد به کار می‌گیرند.

روی ساختارهای شبکه‌های عصبی را هم داراست. در شکل ۲ ساختار مدل به شیوه الگوریتم‌های شبکه عصبی نمایش داده شده است. در این شکل فرض شده است که مدل شامل دو گروه IDS است که هر یک از آنها دارای دو صفحه IDS هستند. بنابراین سیستم ورودی شامل دو ورودی است. فضاهای ورودی و خروجی به سه سطح کوانتیزه شده است. عملگر T-norm در لایه اول بر روی مقدار هم‌پیکسل‌های یک سطح در یک گروه اعمال می‌شود. در لایه دوم نتیجه لایه ی قبل وارد واحدهایی می‌شود که عملگر S-norm را پیاده سازی می‌کنند. از مزایای مدل GIDS نسبت به سایر مدل‌ها این است که در مدل‌های MLP و SVM و سایر مدل‌های دیگر، به منظور دستیابی به مدل بهینه، نیازمند به تنظیم پارامترهای مختلفی می‌باشند به طوری که تغییر در آنها در عملکرد مدل اثرگذار است. بعلاوه برای پیاده‌سازی هر یک نیازمند به الگوریتم آموزش جهت دستیابی به مدل



شکل (۱) روند تشکیل صفحات IDS (الف) تابع نمونه با دو ورودی (ب) نگاهت نقاط بر روی صفحه $y-x_1$ (ج) نگاهت نقاط بر روی صفحه $y-x_2$ (د) پخش نقاط در صفحه $y-x_2$ و استخراج خط باریک با اعمال عملگر IDS



شکل (۲) نمایش بلوکی مدل‌سازی با استفاده از مفهوم قطره‌های جوهر سه بعدی

۲-۲-۱. روش SPM

در این مدل زمان تداوم لازم برای حالت محدودیت طول موج‌گاه از رابطه ۲ به دست می‌آید [۲۸]:

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \quad 8m < z < 12m \quad (6)$$

که Z ارتفاع محل اندازه‌گیری سرعت باد نسبت به سطح دریا بر حسب متر و U_z سرعت باد در ارتفاع Z متری از سطح دریا بر حسب متر بر ثانیه است. بر اساس روش CEM برای محاسبه طول موج‌گاه در یک جهت خاص می‌توان از تغییرات $\pm 15^\circ$ در جهت وزش باد و $\pm 2/5$ متر بر ثانیه در سرعت باد (نسبت میانگین) صرف نظر نمود و خط ساحلی مقابلی که باد از آن جهت می‌وزد را محدودکننده طول موج‌گاه در نظر گرفت. بدین ترتیب برای به دست آوردن طول موج‌گاه در یک جهت خاص باید از دو محدوده $\pm 15^\circ$ نسبت به جهت اصلی وزش باد شعاع‌هایی ترسیم نمود. این شعاع‌ها به ساحل مقابل نقطه مورد نظر محدود می‌شوند. طول موج‌گاه برابر میانگین حسابی شعاع‌های ترسیمی است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (7)$$

در روابطی که روش CEM برای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص و پرپود قلّه طیف ارائه کرده است از سرعت برشی باد U^* استفاده می‌شود. برای محاسبه U^* روابط زیر پیشنهاد شده است.

$$C_D = 0.001 (1.1 + 0.035 U_{10}) \quad (8)$$

$$u_* = U_{10} (C_D)^{0.5} \quad (9)$$

که C_D ضریب دراگ و U_{10} سرعت باد در تراز ۱۰ متری بر حسب متر بر ثانیه است. طبق مدل CEM می‌توان امواج تولید شده در شرایط محدودیت طول موج‌گاه، محدودیت زمان تداوم باد و امواج کاملاً رشد یافته را پیش‌بینی نمود. برای این کار ابتدا باید زمان تداوم واقعی باد مورد نظر را به دست آورد، سپس طبق رابطه ۱۰ زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موج‌گاه را محاسبه نمود [۲۹].

$$t_{x,u} = 77.23 \frac{X^{0.67}}{U_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (10)$$

این روش در کتاب راهنمای حفاظت از سواحل (۱۹۸۴) آمده است که برگرفته از روش طیفی جان سوپ است.

$$t_{\min} = 68.8 \left(\frac{U_A}{g} \right) \left(\frac{gX}{U_A} \right)^{2/3} \quad (2)$$

در این رابطه U_A فاکتور تنش باد است که طبق رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$U_A = 0.71 U^{1.23} \quad (3)$$

در مدل SPM تصحیحات سرعت باد به علت تغییر دما به این صورت است که اگر اختلاف دمای هوا و آب صفر باشد، لایه مرزی پایدار بوده و تصحیح سرعت باد ضروری نیست و اگر این اختلاف دما منفی باشد لایه مرزی ناپایدار بوده و سرعت باد تأثیر بیشتری در رشد موج دارد. اگر اختلاف دمای هوا و آب نیز مثبت باشد تأثیر باد در رشد موج کمتر است. این مدل ارتفاع و پرپود موج محاسبه شده در آب عمیق $\left(\frac{h}{L} > \frac{1}{3} \right)$ را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$H_s = \frac{U_A}{g} 0.0016 \sqrt{gF} \quad (4)$$

در این روش برای محاسبه طول موج‌گاه، ۹ شعاع از نقطه برآورد ارتفاع موج تا نقطه ای که ساحل را قطع می‌کند، به شعاع ۳ درجه رسم می‌شود و طول موج از میانگین‌گیری طول این ۹ شعاع به دست می‌آید.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^9 F_i}{9} \quad (5)$$

۲-۲-۲ روش CEM

در این بخش روش ارائه‌شده در راهنمای مهندسی سواحل CEM^۱ در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استفاده از این روش، ابتدا می‌بایست اصلاحاتی روی سرعت باد اندازه‌گیری شده انجام شود [۲۹]. در این مدل از سرعت باد اندازه‌گیری شده در تراز ۱۰ متری نسبت به سطح دریا استفاده می‌شود. در صورتی که سرعت باد در ترازهای ۸ تا ۱۲ متری نسبت به سطح دریا اندازه‌گیری شده باشد، با استفاده از رابطه ۶ می‌توان سرعت باد در تراز ۱۰ متری را محاسبه نمود.

^۱ - Coastal Engineering Manual

معرفی عملگرهای انتخاب ه) معرفی عملگرهای تولید مثل

در الگوریتم‌های ژنتیک ابتدا به‌طور تصادفی، چندین جواب به صورت جمعیت اولیه تولید شده، که هر جواب یک کروموزوم می‌نامیم. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک پس از انتخاب کروموزوم‌های بهتر، کروموزوم‌ها را باهم ترکیب کرده و جهشی در آن‌ها ایجاد می‌شود. در نهایت نیز جمعیت فعلی را با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها حاصل شده، ترکیب می‌شود [۳۰].

۳- منطقه مورد مطالعه و داده های جمع آوری شده

خلیج مکزیک یک حوضه اقیانوسی است که بیشتر آن توسط قاره آمریکای شمالی و آمریکای مرکزی احاطه شده است. این خلیج در شمال غرب و شمال شرق به سواحل خلیجی ایالات متحده محدود است و در جنوب غرب و جنوب به مکزیک و در جنوب شرق به کشور کوبا منتهی می‌شود. خلیج مکزیک سالانه درگیر طوفان های گرمسیری که گاهاً ارتفاع امواج این منطقه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این منطقه بیش از ۷۰ بویه موج نگاری مستقر است که توسط سازمان مرکز ملی داده بویه^۱ ndbc قرار گرفته شده اند [۳۱]. منطقه مورد مطالعه ایستگاه بویه اندازه گیری داده های باد و موج شماره ۴۲۰۳۶ در شرق خلیج مکزیک با موقعیت جغرافیایی $28^{\circ} 30' 00'' N$, $84^{\circ} 31' 00'' W$ و عمق ۵۴/۵ متری است که در شکل ۳ نشان داده شده است. آرشیو داده های ثبت شده این بویه از سال ۱۹۹۴ تا سال ۲۰۲۰ می‌باشد که در این تحقیق از داده های ثبت شده باد و موج سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی با گام یک ساعته استفاده شده است.

که t_x, u زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه بر حسب ثانیه، X طول موجگاه بر حسب متر و g برابر $9/81$ است. اگر زمان تداوم واقعی بزرگ‌تر از t_x, u باشد، رشد موج توسط طول موج‌گاه محدود می‌شود و طبق روابط زیر می‌توان ارتفاع موج شاخص را به دست آورد.

$$\frac{gH_{mo}}{u_*^2} = 4.13 \times 10^{-2} \left(\frac{gX}{u_*^2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

در روابط فوق، X طول موجگاه بر حسب متر، u_* سرعت برشی باد بر حسب متر بر ثانیه، H_{m0} ارتفاع مشخصه موج بر حسب متر است.

در شرایط محدودیت زمان تداوم، با جایگزین نمودن زمان تداوم واقعی باد در رابطه ۱۲ می‌توان طول موجگاه اصلاح شده را به دست آورد.

$$\frac{gX}{u_*^2} = 5.23 \times 10^{-3} \left(\frac{gt}{u_*} \right)^{2/3} \quad (12)$$

۲-۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک الگوریتم بهینه‌سازی است که با استفاده از الگوبرداری از زیست‌شناسی مانند وراثت، جهش زیست‌شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند. در این روش برای حل یک مساله از تکامل ژنتیکی استفاده می‌کند. بدین طریق که مسئله ای که باید بهینه شود دارای ورودی‌هایی است که با استفاده از برنامه‌نویسی و بکارگیری از الگوی تکامل ژنتیکی به راه‌حل‌ها می‌شود و این راه‌حل‌ها توسط تابع برازش یا تابع برازندگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. شرط خاتمه الگوریتم نیز به بهینه رسیدن مساله مورد نظر است. در این الگوریتم مبتنی بر تکرار حل مساله، روند استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به صورت زیر است:

الف) معرفی جواب‌های مسئله به عنوان کروموزوم (ب) معرفی تابع برازندگی (ج) جمع‌آوری اولین جمعیت (د)

^۱ - national data buoy center

$$\frac{gT}{2\pi U} = \varphi_1 \left(\frac{gX}{U^2} \text{ و } \frac{gt}{U} \right)$$

$$\frac{gH}{U^2} = \varphi_2 \left(\frac{gX}{U^2} \text{ و } \frac{gt}{U} \right)$$

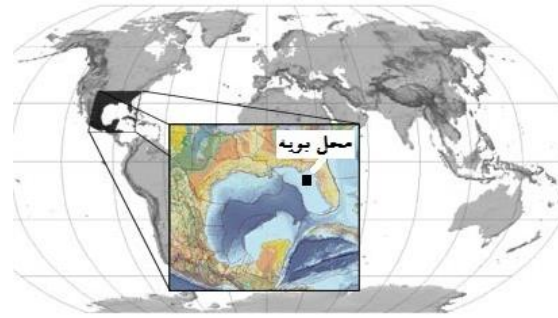
(۱۵)

که T پریود موج است. در شرایط محدودیت طول موج-گاه، مشخصات امواج مستقل از زمان تداوم وزش باد است لذا مقادیر بدون بعد ارتفاع و پریود امواج توسط روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌شوند.

$$\frac{gH}{U^2} = a_1 \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{b_1} \quad (۱۶)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = a_2 \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{b_2} \quad (۱۷)$$

با استفاده از داده‌های میدانی مقادیر مختلفی برای پارامترهای مجهول روابط فوق ارائه شده است و بر همین مبنا، روش‌های تجربی و آیین‌نامه‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی امواج توسعه یافته است. بنابراین مطالعات اولیه روی مدل‌های آیین‌نامه‌ای و اثر سرعت باد روی ارتفاع موج ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس در ابتدا با استفاده از مدل ALM، منحنی خط باریک و ارتباط بین هر یک از پارامترهای ورودی سرعت باد، سرعت برشی، فاکتور تنش باد، فشار هوا، جهت باد، اختلاف دمای هوا و آب، طول موج‌گاه، مدت زمان وزش باد، پریود موج با ارتفاع موج ترسیم گردید. در اجرای مدل ALM، با تابع گوسین و شعاع لکه جوهر برابر با ۱۰ همراه با وضوح ورودی‌ها و خروجی‌های برابر با ۲۵۶ r_{sn} تنظیم شد. شکل ۳ منحنی‌های خط باریک هر یک از پارامترهای ذکر شده با ارتفاع موج شاخص اندازه‌گیری شده توسط بویه را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها هر چه منحنی خط باریک، زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افق داشته باشد، وابستگی ارتفاع موج اندازه‌گیری شده به ورودی مورد نظر بیشتر و آن پارامتر در پیش‌بینی مؤثرتر است. با توجه شکل‌ها پارامترهای



شکل (۳) موقعیت جغرافیایی بویه ۴۲۰۳۶ در شرق خلیج مکزیک

۴. نتایج

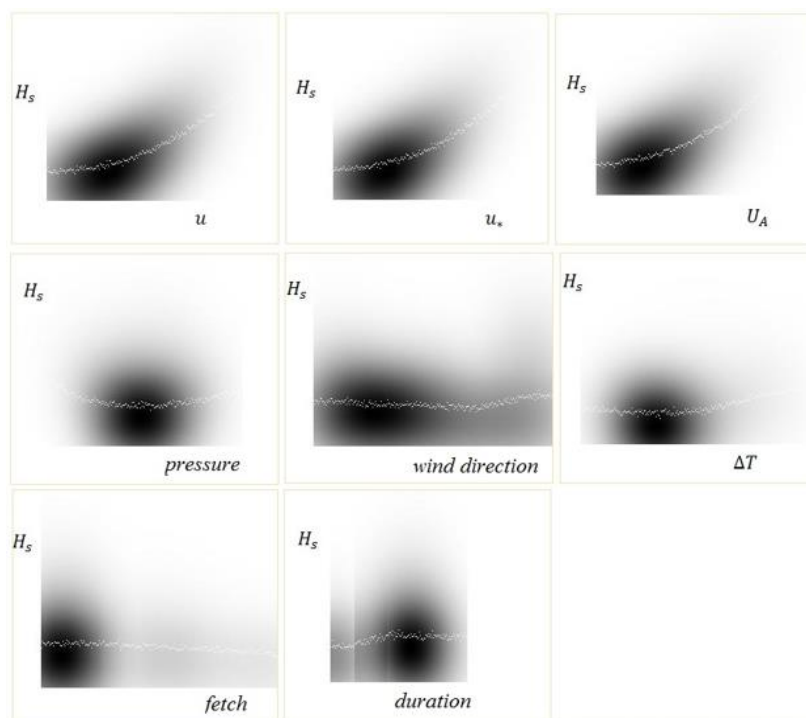
۴-۱. بررسی رفتار پارامترهای میدانی جمع آوری شده امواج ناشی از باد با استفاده از مدل ALM معمولاً بعد از جمع‌آوری داده‌ها الگویی برای توضیح یک پدیده تکرارپذیر ارائه می‌شود. در بررسی امواج ناشی از باد نیز همین موضوع را بایستی در نظر گرفت. برای بررسی این‌گونه امواج در دریا، بایستی ابتدا به مروری بر آیین‌نامه‌های گذشته پرداخته شود و در صورت لزوم الگوی جامع‌تری برای این پدیده ارائه داد، به نحوی که در صورت تکرار این نوع امواج در دفعات بعدی، بتوان نتیجه قابل قبولی به دست آورد. با توجه به این موضوع بررسی‌های زیادی برای بهبود پیش‌بینی روش‌های نیمه تجربی صورت گرفته است و روش CEM (۲۰۰۶) جدیدترین روش نسبت به روش‌های نیمه تجربی دیگر از قبیل SPM، SMB و دیگر روش‌های نیمه تجربی ارائه شده در دهه‌های قبل برای این پدیده است. مبنای روش‌های نیمه تجربی تحلیل ابعادی است. در آب عمیق سرعت و ارتفاع امواج به پارامترهایی نظیر سرعت باد (U)، طول موج‌گاه (X)، زمان تداوم وزش باد (t) و شتاب ثقل (g) بستگی دارند. بدین ترتیب با فرض هم‌جهت بودن باد و موج برای سرعت امواج (C) و ارتفاع امواج (H) می‌توان نوشت:

$$c = f(U, X, t, g) \quad (۱۳)$$

با توجه به اینکه در آب عمیق C برابر با $\frac{gT}{2\pi}$ است، در این حالت روابط فوق در حالت بدون بعد به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) نوشته می‌شوند:

تکرار رخداد ورودی در محدوده مقدار معینی H_s بیشتر باشد، تراکم نقاط در آن محدوده بیشتر است و هاله تاریک تری در آن محدوده وجود دارد که همراه با احتمال رخداد بالاتری از ورودی در آن مقدار H_s است. به عنوان نمونه در شکل ۳، هنگامی که سرعت باد به عنوان ورودی و ارتفاع موج به عنوان خروجی مدل ALM در نظر گرفته شود، مقادیر ارتفاع امواج بالا در سرعت‌های زیاد، مقادیر ارتفاع امواج با ارتفاع متوسط در سرعت‌های میانی و مقادیر امواج کوتاه ارتفاع در سرعت‌های کم تشکیل می‌شود و احتمال رخداد ارتفاع امواج متوسط در خلیج مکزیک نسبت به ارتفاع‌های کم یا بالا، بیشتر است، چرا که نقاط تاریک در امواج با ارتفاع متوسط متمرکز شده است.

سرعت باد u ، u_* ، U_A که از لحاظ تحلیل ابعادی هم بعد با سرعت باد هستند و واحد اندازه‌گیری یکسانی دارند، با خروجی مدل ALM همبستگی دارند و در پیش‌بینی ارتفاع موج مؤثر هستند. اختلاف دمای آب و هوا و همچنین فشار هوا در مقادیر بالای این کمیت‌ها نیز در پیش‌بینی خروجی مدل مؤثر نشان می‌دهند و حاکی از آن است که در مدل‌های پیش‌بینی نیمه تجربی نیز به نحوی این پارامترهای را بایستی لحاظ نمود. هر یک از پارامترهای مدت زمان وزش باد، طول موج‌گانه نیز با ارتفاع موج اندازه‌گیری شده همبستگی ندارند که مطابق با نتایج تحقیقات گذشته است [۳۲]. در پیاده‌سازی مدل ALM نقاط تاریک روشن در نتیجه خروجی این مدل گویای احتمال حضور پارامتر ورودی در تشکیل مقادیر خروجی است. بنابراین بر اساس شکل ۴، در یک بازه زمانی ثبت داده‌ها، هر چقدر دفعات



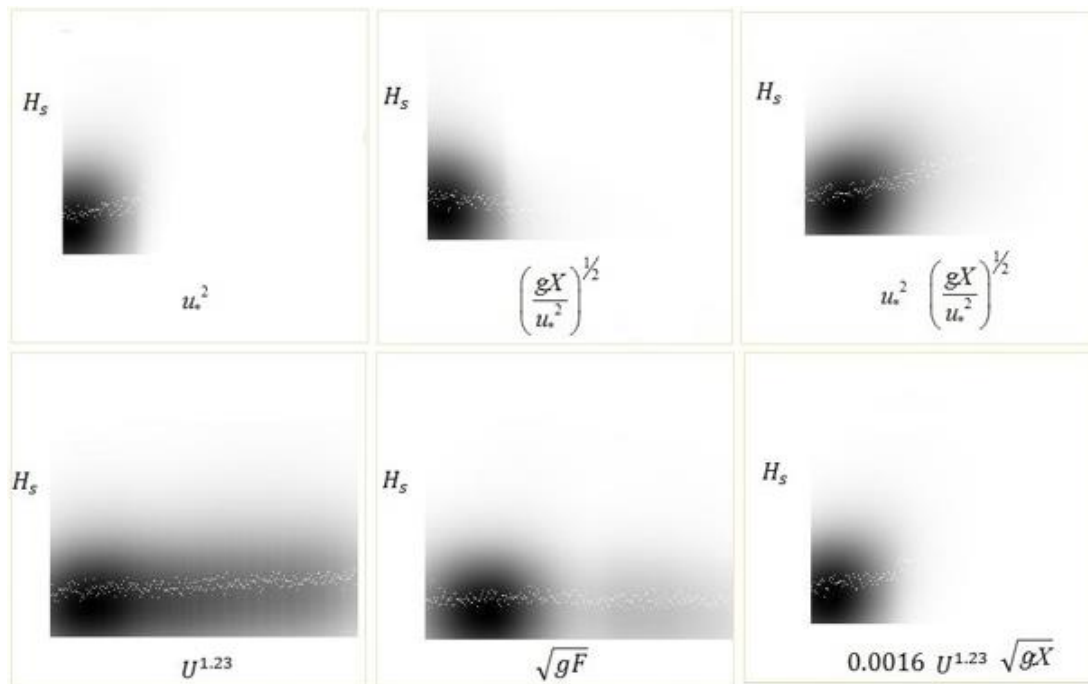
شکل (۴) رفتار گرافیکی داده‌های جمع‌آوری شده میدانی سرعت باد، اختلاف دمای هوا و آب، جهت باد، فشار هوا، طول موج‌گانه، مدت زمان وزش باد در تشکیل امواج ناشی از باد

این مدل، نقاط تاریک در مقادیر میانی فشار و اختلاف دمای آب و هوا تشکیل می‌شود. به منظور پیش پردازش

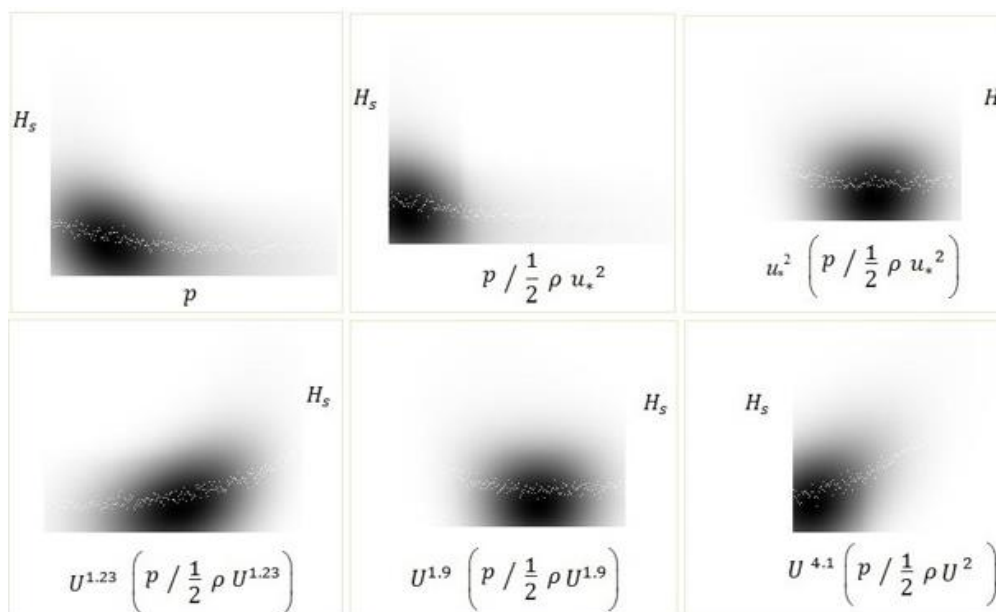
اگر فشار هوا و اختلاف دمای هوا و آب نیز به عنوان ورودی مدل ALM در نظر گرفته شوند، در خروجی

دارد. در ترکیبات یاد شده همبستگی سرعت برشی باد و فاکتور تنش باد با ارتفاع موج شاخص در نظر گرفته شد ولی در هیچ یک از این ترکیبات اثر فشار هوا مورد ارزیابی قرار نگرفته شده است. بدین منظور سناریوهای مختلف دیگری از فشار هوا با توان های مختلف از سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری در نظر گرفته شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این تصاویر مشاهده می شود که HS با ترکیب پارامتر بی بعد $\frac{P}{\rho u_*^2}$ ضریب همبستگی وجود ندارد. در حالی که حاصل ضرب $U^{4.1}$ در پارامتر بی بعد $\frac{P}{\rho U}$ بهترین منحنی برازش همبستگی را نشان می دهد.

اولیه و محاسبات مدل سازی دقیق تر، آزمون و خطاهای متعددی برای برازش بهتر ارتفاع موج با پارامتر ورودی صورت گرفت و مطابق شکل ۵، ورودی های این مدل را در چند سناریو مختلف سرعت برشی باد، فاکتور تنش باد و ترکیب هر یک از سرعت های برشی یا فاکتور تنش باد با طول موج گاه در نظر گرفته شد. در این شکل هنگامی که ترکیب ضرب پارامتر بی بعد $\left(\frac{gX}{u_*^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ در u_*^2 به عنوان ورودی مدل بکار می رود خروجی HS وابستگی بیشتری به ورودی مورد نظر دارد و خط برازش زاویه نزدیک به ۴۵ درجه با محورها را می سازد. در تصاویر دیگر نیز همین موضوع مشهود است. یعنی هنگامی که ترکیب ضرب دو پارامتر \sqrt{gX} در $U^{1.23}$ به عنوان ورودی مدل به کار می رود خروجی HS وابستگی بیشتری به ورودی مورد نظر



شکل ۵) احتمال حضور ارتفاع موج با ترکیب های مختلفی از سرعت باد و طول موج گاه



شکل (۶) اجرای الگوریتم ALM و خروجی آن با ترکیب‌های مختلفی از سرعت باد و فشار هوا

یکسانی را با این انتخاب پیش‌بینی می‌نماید. این وضعیت برای مدل ALM نیز تا حدود زیادی صادق است که به طور کلی رفتار این نتیجه‌گیری را قبل از پیاده‌سازی مدل GIDS مدل‌سازی نموده است. در عوض انتخاب پارامتر جدید u_a نتیجه مناسب‌تری در پیش‌بینی را ارائه می‌دهد. بنابراین ملاک انتخاب‌های دیگر ورودی‌های الگوریتم GIDS، بر اساس نتایج مدل ALM در سناریوهای مختلف پارامتر u_a با پارامتر طول موج‌گاه است که نتایج پیش‌بینی آن در جدول ۲ آمده است. شایان ذکر است که در تعریف u_a ، سرعت u_{10} سرعت باد محلی در ارتفاع ۱۰ متری است و برای تبدیل به سرعت باد در سطح دریا، شرایط اثر پایداری و یا ناپایداری سطح دریا بر اساس آیین‌نامه CEM و SPM برای u_{10} لحاظ گردیده است. همچنین در این جدول هر چه مقدار پارامتر ضریب همبستگی R و شاخص پراکندگی SI به عدد یک نزدیک باشد پیش‌بینی دقیق‌تر انجام شده است. همچنین هر چه پارامتر خطای جزر میانگین مربعات RMSE و میانگین خطای مطلق MAE به صفر نزدیک‌تر باشند پیش‌بینی بهتر انجام شده است.

۴-۲. بررسی مدل GIDS در پیش‌بینی ارتفاع

امواج ناشی از باد

با استفاده از مدل ALM، به درک بهتر رفتار داده‌های میدانی پی برده شد و مشخص گردید که سرعت باد، فشار هوا، اختلاف دمای آب و هوا امتیاز بالایی در تشکیل امواج ناشی از باد نسبت به دیگر پارامترها دارند. جهت پیاده‌سازی مطلوب‌ترین حالت مدل‌سازی GIDS، ابتدا ورودی‌های این مدل سرعت برشی باد، فاکتور تنش باد و پارامتر $\left(\frac{p}{\rho u_{1.2}^2}\right)^{0.41}$ در نظر گرفته شد و قدرت پیش‌بینی مدل GIDS با استفاده از تعریف ورودی‌های فوق مورد بررسی قرار گرفته شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. معیار مناسب‌ترین پیش‌بینی اجرای الگوریتم GIDS، کمترین خطای آماری پیش‌بینی ارتفاع امواج است. اساس اجرای این الگوریتم به این صورت است که تا حد امکان هر چه قدر مقدار شعاع (R) کمتر باشد دقت بررسی بیشتر است، بنابراین در این جدول مقادیر شعاع لکه جوهر بر اساس آزمون خطا به دست آمده است و نتایج جدول بر اساس مناسب‌ترین مقدار شعاع ثبت شده‌اند. با قیاس بین نتایج این جدول، در مدل‌سازی تفاوت چندانی بین حالت انتخاب u_* و U_A وجود ندارد و مدل نتایج

صرفه جویی شده است. شکل ۷ مقادیر پیش بینی شده توسط مدل E و اندازه گیری شده در ماه های مختلف سال را نشان می دهد. همان طور که در قبل گفته شد جهت باد در افزایش دقت پیش بینی تأثیری ندارد. جهت بررسی دوباره این موضوع مدل F با تعریف دو ورودی $U_a (gX)^{-0.2}$ و θ (جهت باد) تعریف گردید که دقت پیش بینی آن نسبت به مدل E کاهش قابل ملاحظه ای داشت که تأکیدی دوباره بر درستی نتایج مدل ALM است.

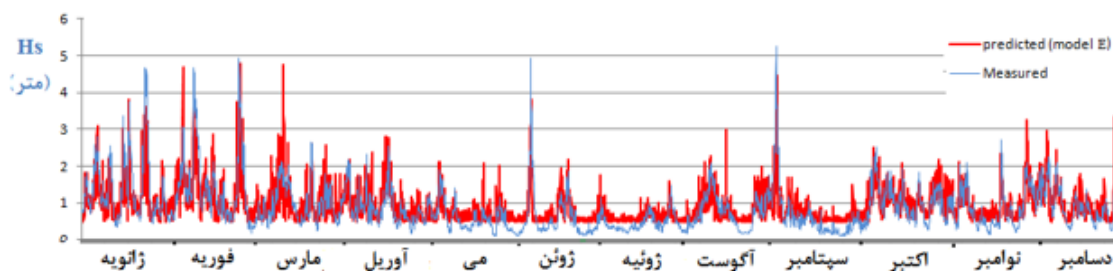
جدول ۲ نشان می دهد که با در نظر گرفتن u_a همراه با پارامتر بی بعد $\left(\frac{gX}{U_a^2}\right)^{\frac{1}{3}}$ دقت پیش بینی کمتری نسبت به هنگامی که u_a با \sqrt{gX} به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود دارد. اجرای هر بار مدل GIDS زمان بر است و با انتخاب دو ورودی به طور متوسط زمانی معادل ۵ ساعت و ۱۵ دقیقه لازم است تا نتایج مدل استخراج شود. در حالی که با انتخاب ۱ ورودی این زمان به ۲ ساعت و ۵۸ دقیقه کاهش می یابد. بنابراین جهت بهبود مدل سازی و کاهش زمان اجرای مدل سناریوهای D و E طراحی گردید و تعداد ورودی مدل به ۱ ورودی کاهش یافت که نتیجه مدل E دقیق تر از مدل B است، با این تفاوت که در زمان اجرای مدل

جدول (۱) نتایج خطای آماری اجرای مدل GIDS با استفاده از سرعت برشی باد، فاکتور تنش باد و U_a به عنوان ورودی مدل (rsn=۲۵۶)

ورودی	شعاع لکه جوهر	R	RMSE	SI	MAE
$u_* = u_1 \cdot \sqrt{CD}$	۵	۰/۷۵۰	۰/۶۸۸	۰/۸۱۴	۰/۶۱۳
$U_a = ۰.۶۷ U_1^{۱.۲۳}$	۵	۰/۷۵۰۹	۰/۶۹۱	۰/۸۱۷	۰/۶۱۶
$U_a = u_1 \cdot \left(\frac{p}{\rho u_1^2}\right)^{۰.۴۱}$	۱۰	۰/۷۷۹۳	۰/۵۴۲	۰/۶۴۰	۰/۴۶۰

جدول (۲) نتایج خطای آماری اجرای مدل GIDS در ترکیبات مختلف U_a با طول موج گاه (rsn=۲۵۶)

مدل	ورودی	شعاع لکه جوهر	R	RMSE	SI	MAE
A	U_a	۱	۰/۷۷۹۳	۰/۵۴۱۵	۰/۶۴۰۷	۰/۴۶۰۳
B	U_a و \sqrt{gX}	۱	۰/۷۵۴۸	۰/۴۲۶۶	۰/۵۴۰۴	۰/۲۹۹۴
C	U_a و $\left(\frac{gX}{U_a^2}\right)^{\frac{1}{3}}$	۱	۰/۷۴۰۶	۰/۷۷۱۵	۰/۹۱۲۷	۰/۶۹۸۴
D	$U_a \sqrt{gX}$	۰/۲۵	۰/۶۷۰۳	۰/۵۲۱	۰/۶۱۶	۰/۳۹۹
E	$U_a (gX)^{-0.2}$	۰/۱	۰/۷۶۵۵	۰/۴۱۶۲	۰/۴۹۲	۰/۲۹۷
F	$U_a (gX)^{-0.2}$ و θ	۰/۲۵	۰/۶۹۹	۰/۴۵۹	۰/۵۴۳	۰/۳۱۵



شکل ۷. مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی مدل E در الگوریتم GIDS

۳-۴. بهبود مدل SPM

با اجرای مدل ALM و الگوریتم GIDS مدل نهایی E حاصل شد که نتیجه‌گیری می‌شود پارامتر $U_a (gX)^{-0.02}$ مشابه رابطه $H_s = U_a (gX)^{-0.02}$ در مدل SPM است که در آن پارامتر U_a و U_A به صورت زیر هستند.

$$U_A = 0.71 U^{1.23} \quad (18)$$

$$U_a = \alpha u_{1.2}^{4.1} \left(\frac{p}{\rho u_{1.2}} \right) \quad (19)$$

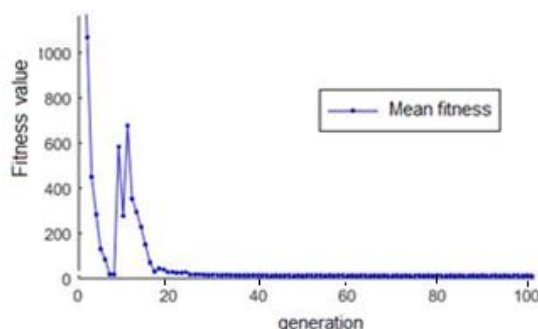
که ضریب ثابت رابطه U_a است. از این روابط می‌توان چنین استنباط نمود که با اجرای مدل‌های GIDS تا حد امکان به طور غیرمستقیم به ترکیبات مختلفی از پارامترهای ورودی دست یافت که قادر هستند ارتفاع امواج را پیش‌بینی نمایند و همچنین می‌توان به تصحیحاتی در رابطه ریاضی پارامتر فاکتور تنش باد در مدل SPM پردازیم. به این صورت که پارامتر فاکتور تنش باد تعریف شده در مدل SPM، تابعی از فشار هوا و سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۱۰ متری است و ضریب در U_a عددی ثابت نیست. بنابراین می‌توان پارامتر فاکتور تنش باد را به صورت زیر تعریف نمود:

$$U_a = f(p, u_{1.2}) u_{1.2}^{4.1} \quad (20)$$

که در این رابطه داریم:

$$f(p, u_{1.2}) = \alpha \left(\frac{p}{\rho u_{1.2}} \right) u_{1.2}^{2.87} \quad (21)$$

همان‌طور که گفته شد در این رابطه α ضریبی ثابت است و بایستی در محل مورد مطالعه بومی‌سازی شود. در ادامه تحقیق با توجه به اینکه مدل CEM روشی کامل‌تر از روش SPM است، بنابراین سعی بر آن شد از تعاریف استفاده شده در مدل CEM در مدل SPM بکار گرفته شود و مدل SPM اصلاح گردد. سپس ضرایب مدل توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بهینه حالت انتخاب گردد. اجرای الگوریتم ژنتیک به صورت شکل ۸ آمده است. در اجرای الگوریتم ژنتیک تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰ کروموزوم انتخاب گردید. مطابق این شکل مسئله بهینه‌سازی بعد از ۱۰۳ نسل به جواب رسیده است.



شکل ۸. تغییرات تابع هزینه در تولید نسل در الگوریتم مدل SPM اصلاح شده

س) رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از باد: این مدل ارتفاع محاسبه شده در آب عمیق (نسبت عمق به طول موج بیشتر از ۰/۵) را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$H_s = 0.27 + 0.05 U_A (gF)^{-0.02} \quad (25)$$

در شرایط محدودیت زمان تداوم، با جایگزین نمودن زمان تداوم واقعی باد در رابطه زیر می‌توان طول موجگاه اصلاح شده را به دست آورد.

$$\frac{gX}{U_A} = 0.23 * 10^{-3} \left(\frac{gt}{U_A}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (26)$$

ش) طول موج‌گاه: محاسبه طول موج‌گاه در این مدل نیز مطابق روش SPM انجام می‌شود.

پس از پارامترسازی ضرایب مدل در محل مورد مطالعه با داده‌های سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵، نتایج آماری مدل اصلاح شده SPM با هریک از مدل‌های CEM و SPM مورد مقایسه قرار گرفته شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. نتایج تست مدل اصلاح شده نیز برای داده‌های سال ۲۰۱۶ در این جدول آمده است. در جدول ۴ نیز مقادیر پیش‌بینی مدل‌های SPM، CEM و مدل اصلاح شده SPM در زمان رخداد هاریکن‌های هرمین، کولین، متیو و زمانی که داده‌های شامل هاریکن‌های فوق‌الذکر حذف شده باشد نشان داده شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز مقادیر ارتفاع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده داده‌های سال ۲۰۱۶ توسط مدل‌های SPM، CEM و SPM اصلاح شده نشان داده شده است.

نتایج بهینه‌سازی الگوریتم CEM-SPM در پیش‌بینی امواج ناشی از باد خلیج مکزیک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

الف) اصلاح تراز اندازه‌گیری: مطابق مدل SPM، سرعت باد در ترازى که بویه اندازه‌گیری نموده است به سرعت باد استاندارد ۱۰ متری یعنی رابطه ۶ تبدیل می‌شود.

ب) تصحیح فشار هوا در سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری: مطابق این مدل بعد از تصحیح سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری مطابق رابطه زیر تصحیح فشار هوا روی آن انجام می‌شود:

$$U_p = 1.02 U_{10} \cdot \left(\frac{P}{\rho U_{10}^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

ج) تصحیح پایداری: مشابه مدل SPM، تصحیحات سرعت باد به علت تغییر دما به این صورت است که اگر اختلاف دمای هوا و آب صفر باشد، لایه مرزی پایدار بوده و تصحیح سرعت باد ضروری نیست و اگر این اختلاف دما منفی باشد لایه مرزی ناپایدار بوده و سرعت باد تأثیر بیشتری در رشد موج دارد. اگر اختلاف دمای هوا و آب نیز مثبت باشد تأثیر باد در رشد موج کمتر است.

د) محاسبه زمان وزش باد: زمان وزش باد طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن t زمان تداوم لازم برای ایجاد حالت محدودیت طول موجگاه بر حسب ثانیه، و g برابر ۹/۸۱ است.

$$t = 77.23 \frac{X^{0.27}}{U_A g^{0.23}} \quad (24)$$

جدول (۳) مقادیر خطای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص بویه ۴۲۰۳۶ با استفاده از مدل‌های SPM(۱۹۸۴)، CEM(۲۰۰۶) و مدل SPM اصلاح شده

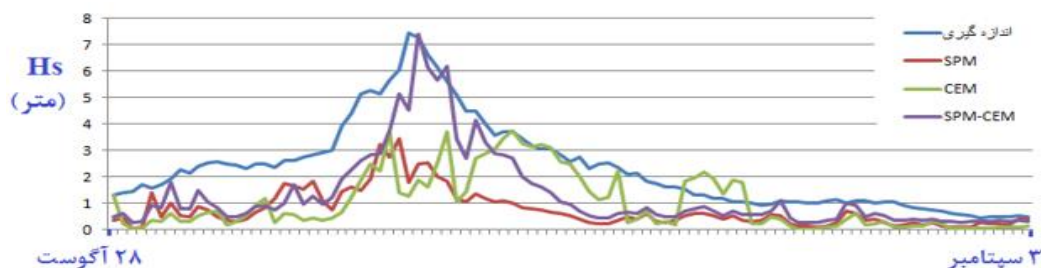
مدل	شاخص‌های آماری		
	R	RMSE	Bias
SPM(۱۹۸۴)	۰/۵۷۱	۰/۶۱۶	-۰/۰۳۲
CEM(۲۰۰۶)	۰/۶۱۶	۰/۶۳۵	-۰/۱۶۲
SPM اصلاح شده (داده‌های آموزش)	۰/۷۸۵	۰/۳۹۸	-۰/۱۸۲

هاریکن متیو	SPM(۱۹۸۴)	۰/۷۴۲	۰/۵۰۵	۰/۴۵۸	۰/۱۳۷	۱/۱۰۴
	CEM(۲۰۰۶)	۰/۷۵۶	۰/۵۰۷	۰/۴۵۹	۰/۲۹۷	۱/۱۰۴
	SPM اصلاح شده	۰/۸۳۳	۰/۴۶۶	۰/۴۰۴	-۰/۲۶۵	۱/۱۰۴
همه داده‌ها به جز داده‌های شامل هاریکن	SPM(۱۹۸۴)	۰/۵۹۵	۰/۵۸۵	۰/۶۹۹	-۰/۰۵۰	۰/۸۳۶
	CEM(۲۰۰۶)	۰/۶۲۷	۰/۶۲۷	۰/۷۴۹	-۰/۱۸۳	۰/۸۳۶
	SPM اصلاح شده	۰/۷۹۴	۰/۴۲۶	۰/۵۰۹	-۰/۱۷۴	۰/۸۳۶

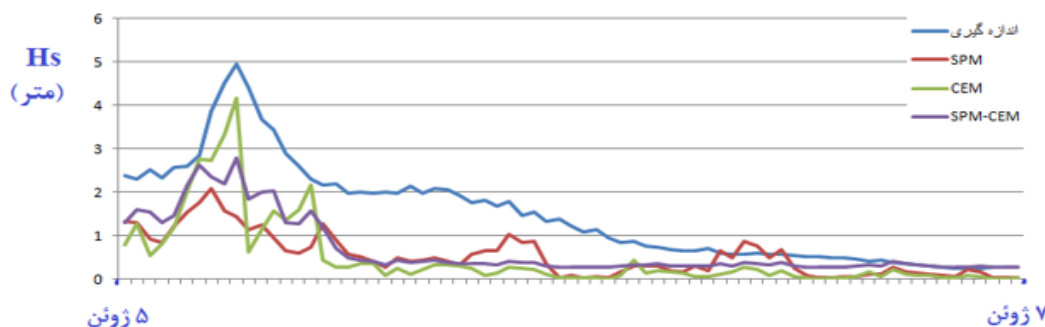
ارتفاع‌های عظیم ناشی از تندرهای این هاریکن را پیش‌بینی می‌نماید. روش CEM نیز دقت پیش‌بینی کمتری نسبت به SPM در هنگام رخداد این نوع هاریکن دارد. با کاهش میانگین ارتفاع موج شاخص و رخداد هاریکن‌های کولین و متیو، دقت روش پیشنهادی این تحقیق کمترین خطای پیش‌بینی را دارد ولی روش CEM اعتبار بیشتری در پیش‌بینی نسبت به روش SPM پیدا می‌کند. هنگامی که داده‌های شامل وقوع هاریکن از مجموعه داده‌ها برداشته شوند، همچنان روش SPM اصلاح شده بیشترین سهم در دقت پیش‌بینی دارد ($R=۰/۷۹۴$).

در هر یک از شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مقادیر ارتفاع‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در هنگام رخداد هر یک از هاریکن‌های هرمین، کولین و متیو نشان داده شده است. در شکل ۱۵ نیز مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع موج توسط مدل‌های SPM، CEM، SPM اصلاح شده بدون حضور رخداد هاریکن ها نشان داده است.

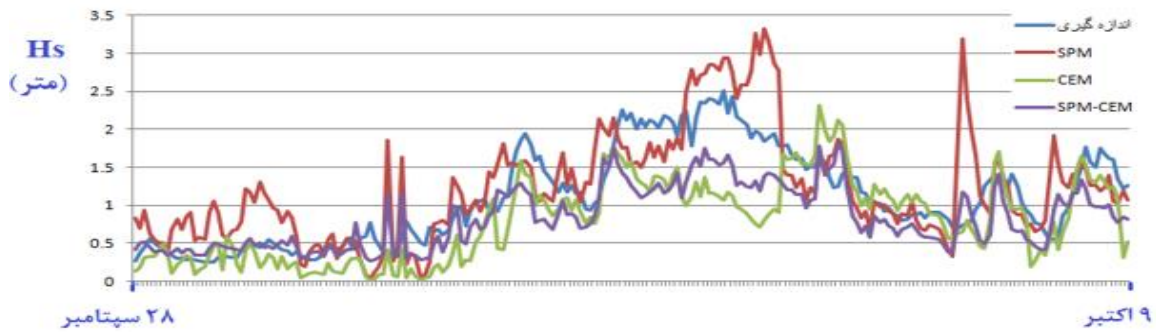
مطابق جدول ۴، در هنگام وقوع هاریکن هرمین میانگین ارتفاع امواج شاخص بیشترین مقدار را نسبت به وقوع هاریکن‌های کولین، متیو و یا زمانی که هاریکن رخ نداده است. در پیش‌بینی ارتفاع امواج هاریکن هرمین مدل SPM اصلاح شده بیشترین دقت پیش‌بینی را دارد و با ضریب همبستگی $R=۰/۹۰۳$



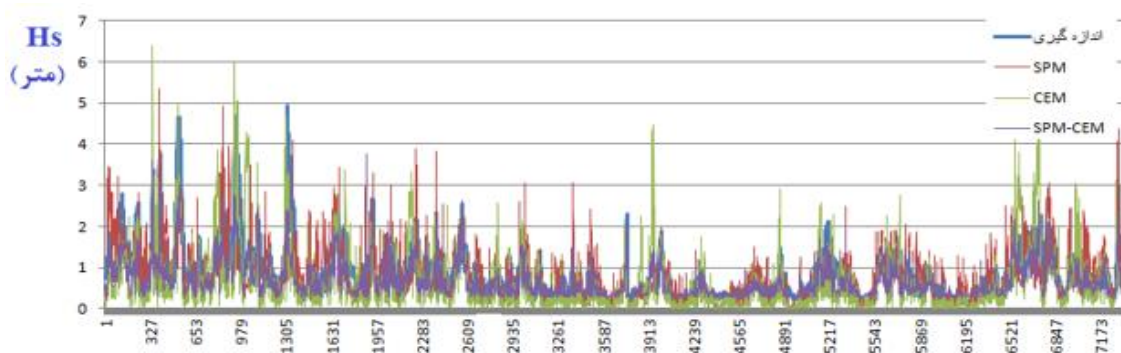
شکل (۱۲) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع موج توسط مدل‌های CEM-SPM, SPM, CEM در زمان رخداد هاریکن هرمین



شکل (۱۳) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع موج توسط مدل‌های CEM-SPM, SPM, CEM در زمان رخداد هاریکن کولین



شکل (۱۴) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع موج توسط مدل‌های CEM-SPM, SPM, CEM در زمان رخداد هاریکن متیو



شکل (۱۵) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی ارتفاع موج توسط مدل‌های CEM, SPM, SPM اصلاح شده بدون حضور رخداد هاریکن‌ها

U_A ارزیابی شده است. مطابق این جدول حضور پارامتر بی‌بعد $\left(\frac{P}{\frac{1}{3}\rho V^2}\right)$ سبب کاهش چشمگیر خطای پیش‌بینی می‌گردد.

۴-۴. تعیین میزان اثرگذاری پارامتر U_A در میزان پیش‌بینی برای بررسی پارامتر U_A جدول ۵ تشکیل و میزان تأثیرگذاری هر یک از اجزای پارامتر فاکتور تنش باد

جدول (۵) بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از اجزای پارامتر فاکتور تنش باد در پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از باد

	R	RMSE	SI	Bias
$U_A = u_{1, \epsilon, 1} \left(\frac{P}{\frac{1}{3}\rho V^2}\right)$	۰/۸۰۴۱	۰/۴۴۲	۰/۵۰۸	-۰/۱۸۷
$U_A = u_{1, \epsilon, 1}$	۰/۶۱۸	۰/۵۷۴۲	۰/۶۵۹۷	۰/۱۷۳۱

۵. نتیجه گیری
 بد، طول موج‌گاه و مدت زمان وزش باد در پیش‌بینی ارتفاع موج تأثیر چندانی را نشان نمی‌دهد که مطابق نتایج تحقیقات گذشته است. همچنین با استفاده از پارامترهای سرعت باد، اختلاف دمای هوا و آب، فشار هوا می‌توان به پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از باد پرداخت. در مرحله بعد با ترکیب سرعت باد با طول موج‌گاه، برآزش مناسب خط باریک نسبت به محور افق ساخته شد که نشان داد ترکیب

نتایج اجرای مدل ALM در پیش‌بینی ارتفاع امواج نشان داد که ارتفاع موج نسبت به پارامترهای سرعت باد اندازه‌گیری شده توسط بویه، سرعت برشی باد و فاکتور تنش باد همبستگی دارد. پارامتر اختلاف دمای آب و هوا و فشار هوا در مقادیر بالای این پارامترها، نیز مقدار اندکی با ارتفاع موج همبستگی دارند. همچنین بررسی شد که پارامتر جهت

SPM تصحیح و محاسبه گردید. با توجه به بررسی های انجام شده در بویه ۴۲۰۳۶ در ۹۹ درصد موارد شرایط محدودیت زمان تداوم باد غالب وجود داشت، لذا با جایگزین نمودن زمان تداوم واقعی باد در روابط SPM طول موج گاه اصلاح شده به دست آمد.

با مقایسه مدل های GIDS، CEM، SPM اصلاح شده مشخص گردید که مدل SPM اصلاح شده مناسب ترین مدل پیش بینی را در بین دو روش دیگر است. بعلاوه این مدل در هنگام رخداد هاریکن هر مین ارتفاع موج را با ضریب همبستگی $R=0/903$ و در زمان رخداد هاریکن کولین با ضریب همبستگی $R=0/844$ پیش بینی می نماید.

منابع

[۱] Nayak S, Panchang V. Coastal Wave-Height Statistics during Hurricane Ike. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. ۲۰۱۶ May ۱;۱۴۲(۳):۰۴۰۱۵-۲۶.

[۲] اکبری فرد، سعید، زارعی، حیدر، زلفی، ابراهیم. پیش بینی ساعتی و روزانه ارتفاع موج دریا در منطقه چابهار. اکوهیدرولوژی ۱۱۴۰-۱۱۲۹: ۴(۴): ۱۳۹۶،

[۳] Elbisy MS, Elbisy AM. Prediction of significant wave height by artificial neural networks and multiple additive regression trees. Ocean Engineering. ۲۰۲۱ Jun ۱۵;۲۳۰:۱۰۹۰۷۷.

[۴] Nikoo, M.R., Kerachian, R. and Alizadeh, M.R., ۲۰۱۸. A fuzzy KNN-based model for significant wave height prediction in large lakes. Oceanologia, ۶۰(۲), pp.۱۵۳-۱۶۸.

[۵] LeCun, Yann, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. ۲۰۱۵. Deep learning. nature ۵۲۱,۷۵۵۳: ۴۳۶.

[۶] DeVries, P.M., Thompson, T.B. and Meade, B.J., ۲۰۱۷. Enabling large-scale viscoelastic calculations via neural network acceleration. Geophysical Research Letters, ۴۴(۶), pp.۲۶۶۲-۲۶۶۹.

[۷] Li, M. and Liu, K., ۲۰۲۰. Probabilistic prediction of significant wave height using dynamic bayesian network and information flow. Water, ۱۲(۸), p.۲۰۷۵.

[۸] Elbisy, M.S., ۲۰۱۹. The use of group method of data handling and multilayer perceptron neural network for the prediction of significant wave height. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS) ۶۰, . ۱۸۳- ۱۷۴

[۹] Elbisy, M.S., ۲۰۱۹. The use of group method of data handling and multilayer perceptron neural network for the prediction of significant wave height. American Scientific Research Journal for

ضرب پارامتر سرعت باد در طول موج گاه در پیش بینی موج، منحنی برازشی مناسب را می سازد. سپس اصلاح اختلاف دمای هوا و آب در سرعت باد اندازه گیری شده، مطابق با روش SPM انجام و با پارامتر فشار هوا ترکیب شد که نتیجه خروجی مدل این چنین نشان داد که ترکیب ضرب $u_{1.4}$ در پارامتر بی بعد $\frac{P}{\rho u}$ بهترین منحنی برازش همبستگی را نشان می دهد. پس از پیش پردازش اولیه، به استفاده از مدل GIDS پرداخته شد. در این مرحله از مدل سازی، پارامتر $u_a = u_{1.4} \left(\frac{p}{\rho u_{1.2}} \right)$ با هر یک از پارامترهای سرعت برشی باد (u_*) و فاکتور تنش باد (U_A) به عنوان ورودی مدل، در پیش بینی ارتفاع موج در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که پارامتر u_a با دقت بالاتری نسبت به دو پارامتر ذکر شده پیش بینی می کند. جهت کاهش زمان اجرای مدل، ترکیب u_a با فشار هوا و طول موج گاه به صورت اجرای مدل ترکیبی $(gX)^{-0.02} \left(\frac{p}{\rho u_{1.2}} \right)$ $u_{1.4}$ به مدل GIDS ارائه شد که نتیجه نشان داد این نوع تعریف ورودی برای مدل، با دقت بالاتر و زمان کمتری نسبت به پارامتر u_a پیش بینی را انجام می دهد. در انتها فاکتور تنش باد و ارتفاع موج شاخص در مدل SPM اصلاح شده، به صورت رابطه زیر تعریف شد:

$$U_a = 1.02 u_{1.4} \left(\frac{p}{\rho u_{1.2}} \right) \quad (27)$$

$$H_s = 0.27 + 0.05 U_A (gF)^{-0.02} \quad (28)$$

پس از پارامتر سازی و تصحیح ضرایب مدل، مدل اصلاح شده روش SPM با هر یک از روش های SPM (۱۹۸۴) و CEM (۲۰۰۶) مورد مقایسه قرار داده شد که نتایج حاکی از بهبود دقت پیش بینی با استفاده از روش SPM اصلاح شده است.

شایان ذکر است که محاسبات طول موج گاه با فرض محدود شدن طول موج گاه به ساحل مقابل نقطه مورد نظر انجام شده است. در نتیجه این امکان وجود دارد که طول موج گاه محاسبه شده از طول موج گاه واقعی بیشتر باشد که در صورت این شرط طول موج گاه واقعی به روش آیین نامه ای

- significant wave heights from CFOSAT's SWIM and scatterometer using deep learning. *Geophysical Research Letters*. ۲۰۲۱ Mar ۲۸;۴۸(۶):e۲۰۲۰GL۰۹۱۲۷۶.
- [۲۲] Savitha, R. and Al Mamun, A., ۲۰۱۷. Regional ocean wave height prediction using sequential learning neural networks. *Ocean Engineering*, ۱۲۹, pp.۶۰۵-۶۱۲.
- [۲۳] Yang, S., Xia, T., Zhang, Z., Zheng, C., Li, X., Li, H. and Xu, J., ۲۰۱۹. Prediction of significant wave heights based on CS-BP model in the south China sea. *IEEE Access*, ۷, pp.۱۴۷۴۹۰-۱۴۷۵۰۰.
- [۲۴] Fan, S., Xiao, N. and Dong, S., ۲۰۲۰. A novel model to predict significant wave height based on long short-term memory network. *Ocean Engineering*, ۲۰۵, p.۱۰۷۲۹۸.
- [۲۵] Dai, H., Shang, S., Lei, F., Liu, K., Zhang, X., Wei, G., Xie, Y., Yang, S., Lin, R. and Zhang, W., ۲۰۲۱. CRBM-DBN-based prediction effects inter-comparison for significant wave height with different patterns. *Ocean Engineering*, ۲۳۶, p.۱۰۹۵.
- [۲۶] Shouraki, S.B. and Honda, N., ۱۹۹۸, August. Fuzzy controller design by an active learning method. In *31th symposium of intelligent control. Tokyo, Japan* (pp. ۵۴۷-۵۵۰).
- [۲۷] Afrakoti, I.E.P., Shouraki, S.B., Bayat, F.M. and Gholami, M., ۲۰۱۷. Using a memristor crossbar structure to implement a novel adaptive real-time fuzzy modeling algorithm. *Fuzzy Sets and Systems*, ۳۰۷, pp.۱۱۵-۱۲۸.
- [۲۸] Coastal Engineering Research Center (US), ۱۹۸۴. *Shore Protection Manual* (Vol. ۱). Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
- [۲۹] Army, U.S., ۲۰۰۶. *Coastal Engineering Manual*. Chapter II-۲, Meteorology and Wave Climate.
- [۳۰] An introduction to genetic algorithms by Melanie Mitchell - *Computers* - ۱۹۹۸ - ۲۰۹ pages.
- [۳۱] NOAA. national data buoy center. [Internet]. ۲۰۱۴. [cited ۲۰۱۴ March]. Available from: <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- [۳۲] Mahjoobi, J. and Etemad-Shahidi, A., ۲۰۰۸. An alternative approach for the prediction of significant wave heights based on classification and regression trees. *Applied Ocean Research*, ۳۰(۳), pp.۱۷۲-۱۷۷.
- Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS) ۶۰, ۱۷۴-۱۸۳.
- [۱۰] Elbisy, M.S., Osra, F.A., ۲۰۱۹. Application of group method of data handling type neural network for significant wave height prediction. *Am. J. Neural Network Appl.* ۵ (۲), ۵۱-۵۷.
- [۱۱] Elgohary, T., Elbisy, M.S., Mobasher, A.M., Salah, H., ۲۰۱۸. Deep wave height prediction for Alexandria sea region by using nonlinear regression method compared to support vector machines. *Curr. Dev. Oceanogr.* ۱۰ (۱), ۱-۱۴.
- [۱۲] Stăvărache G, Ciortan S, Rusu E. Optimization of Artificial Neural Networks Based Models for Wave Height Prediction. In *ES Web of Conferences* ۲۰۲۰ (Vol. ۱۷۳, p. ۰۳۰۰۷). EDP Sciences.
- [۱۳] de Siqueira BV, de Moraes Paiva A. Using neural network to improve sea level prediction along the southeastern Brazilian coast. *Ocean Modelling*. ۲۰۲۱ Dec ۱;۱۶۸:۱۰۱۸۹۸.
- [۱۴] Yang CH, Wu CH, Hsieh CM, Wang YC, Tsen IF, Tseng SH. Deep Learning for Imputation and Forecasting Tidal Level. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. ۲۰۲۱ Jun ۲;۴۶(۴):۱۲۶۱-۷۱.
- [۱۵] Shamshirband, Shahaboddin, Amir Mosavi, Timon Rabczuk, Narjes Nabipour, and Kwok-wing Chau. "Prediction of significant wave height; comparison between nested grid numerical model, and machine learning models of artificial neural networks, extreme learning and support vector machines." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* ۱۴, no. ۱ (۲۰۲۰): ۸۰۵-۸۱۷.
- [۱۶] Vieira F, Cavalcante G, Campos E, Taveira-Pinto F. A methodology for data gap filling in wave records using Artificial Neural Networks. *Applied Ocean Research*. ۲۰۲۰ May ۱;۹۸:۱۰۲۱۰۹.
- [۱۷] Ma X, Huang L, Duan W, Jing Y, Zheng Q. The performance and optimization of ANN-WP model under unknown sea states. *Ocean Engineering*. ۲۰۲۱ Nov ۱;۲۳۹:۱۰۹۸۵۸.
- [۱۸] Yan Y, Zhang C, Su N. A Novel Data Augmentation Method for Sea Ice Scene Classification of Arctic Aerial Images. *IEEE Access*. ۲۰۱۹ Jul ۱۸;۷:۱۰۴۲۴۱-۹.
- [۱۹] Kim HI, Han KY. Urban flood prediction using deep neural network with data augmentation. *Water*. ۲۰۲۰ Mar ۲۲;۱۲(۳):۸۹۹.
- [۲۰] Sadeghifar T, Lama GF, Sihag P, Bayram A, Kisi O. Wave height predictions in complex sea flows through soft-computing models: Case study of Persian Gulf. *Ocean Engineering*. ۲۰۲۲ Feb ۱;۲۴۵:۱۰۴۶۷.
- [۲۱] Wang JK, Aouf L, Dalphinnet A, Zhang YG, Xu Y, Hauser D, Liu JQ. The wide swath significant wave height: An innovative reconstruction of