

## بررسی اثرات تغییر اقلیم بر افزایش سطح آب دریای عمان و خلیج فارس

حمید گهرنژاد<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل شمسایی<sup>۲</sup>، سارا نظیف<sup>۳</sup>، محمود ذاکری نیری<sup>۴</sup>

### چکیده

با توجه به اثرات تغییرات اقلیم در بالا آمدن سطح آب‌های آزاد و نقش آن در مدیریت سواحل و بنادر، افزایش سطح آب بایست تحلیل و بررسی شود. در تحقیق حاضر تأثیر تغییرات اقلیم بر افزایش سطح آب دریا در امتداد خط ساحلی جنوب ایران بررسی می‌گردد. پیش‌بینی‌کننده‌های بالا آمدن سطح آب دریا از متغیرهای آب و هوایی تعیین و برای انتخاب در میان متغیرهای مختلف شبیه‌سازی در این تحقیق از روش وایازی گام به گام استفاده شد. برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از نتایج شبیه‌سازی متغیرهای آب و هوایی تحت نمایشنامه ی تغییر اقلیم A1b به وسیله ی یک مدل GCM به نام CGCH3 بهره‌وری شده است. دو مدل شبکه عصبی-موجک و نروفازی-موجک برای بررسی ارتباط بین متغیرهای اقلیمی و تغییرات سطح دریا توسعه داده شد. در این نرم افزارها از نظریه موجک برای تفکیک گروه‌های زمانی داده‌های ورودی و خروجی استفاده شد و سپس از نظریه های سامانه استنتاج عصبی-فازی و شبکه عصبی برای ایجاد ارتباط بین اجزاء پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی شونده ها استفاده گردید. نتایج نرم افزارهای مختلف به کار رفته در نمایشنامه تغییر اقلیم، طیف وسیعی از تغییرات سطح دریا در ایستگاه‌های مختلف را نشان داد. مدل منتخب (Anfis-Haar) که دارای شاخص عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها بود، نشان داد که سطح آب دریا از ۴۸ سانتیمتر در منتهی الیه غربی خلیج فارس تا ۱۶ سانتیمتر در شرق دریای عمان تغییر می‌نماید. بنظر می‌رسد میزان تغییرات در آبهای کم عمق و محصور بیشتر از مناطقی باشد که در مجاورت آب‌های آزاد قرار دارند.

**واژه های کلیدی:** نمایشنامه ی تغییر اقلیم، افزایش سطح دریا، شبکه عصبی-موجک DWNN و نروفازی-موجک DWANFFS

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر - ایران - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> استاد دانشکده عمران - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران - ایران

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران - تهران - ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

نویسنده مسئول مقاله: Hgn1982@gmail.com

## ۱- مقدمه

سطح دریا یک سطح هم بالقوه است و هر تغییری در بخشی از آن در همه جا دیده می‌شود. جاذبه زمین، باد و امواج تعیین کننده سطح آب هستند. اندازه‌گیری تغییرات سطح آب دریا در نقاط مختلف ساحل و در طول زمان، نشان دهنده تغییرات قابل توجه این تراز نسبت به خشکی است. این تغییر ناشی از یک بالآمدگی کلی در تراز دریاها به علاوه احتمال بالآمدگی یا فرو رفتگی زمین ساختی (زمین‌ساختی) ساحل است (آرمانفر و همکاران، ۲۰۱۹).

تغییرات سطح آب دریا دو گونه است: محلی و ائوستاتیک در حالت اول تغییرات سطح دریا در ناحیه کوچکی دیده می‌شود ولی تغییرات ائوستاتیک در کل جهان قابل مشاهده است. البته باید توجه کرد که مقدار افزایش و یا کاهش سطح دریا در همه جا به یک اندازه نیست. عوامل زمین ساختی موجب می‌شود که تغییرات خط ساحلی بسیار پیچیده تر شوند. در نتیجه تعیین میزان مطلق کاهش و افزایش سطح دریا (سطح مطلق دریا همان سطح مطلق آبهای آزاد است که نسبت به یک نقطه ثابت مانند مرکز زمین اندازه گیری می‌شود و تحت تاثیر زمین ساخت نیست) در سواحل مشکل است. عملاً برای تعیین تغییرات سطح دریا از سطح نسبی دریا، موقعیت سطح آب نسبت به خشکی که به وسیله ی شواهدی چون سواحل قدیمی، آبنسنگهای مرجانی و ... تعیین می‌شود، استفاده می‌شود.

بالآمدگی تراز دریا از ۴ تا ۲ میلی‌متر در سال منجر به بالآمدگی ۰/۲ تا ۰/۴ متر در یک قرن می‌شود. این موضوع می‌تواند اثراتی قابل توجه روی ساحل داشته باشد، به این معنی که تراز سطح آب در جلو ساحل بالا آمده و یک عقب نشینی وجه ساحل بر اثر بالآمدگی تراز دریا حاصل می‌گردد. همین‌طور این امر دارای اثرات معنی‌داری در طراحی سازه‌های دریایی و ساحلی خواهد داشت (اخیانی و همکاران، ۲۰۱۲).

دو عامل اساسی در افزایش سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها موثر هستند. اولین عامل انبساط آب‌های اقیانوسی در اثر افزایش دمای کره زمین است. دومین عامل به ذوب یخ‌های موجود در قطب‌ها و یخچال‌های قطبی مربوط می‌شود (پنل بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷). تحقیقات اخیر در کل جهان نشان دهنده افزایش

دمای کره زمین از سال ۱۸۹۹-۱۸۵۰ تا ۲۰۰۵-۲۰۰۱ است. این افزایش دما که در نیمکره شمالی کره زمین از شیب تندتری برخوردار بوده است در حدود  $0.76^{\circ}C$  برآورد شده است، روند افزایش دمای در بعضی سال‌ها (به عنوان مثال سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۵) بیشتر از ۱ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. این گرم شدن تدریجی کره زمین بر محیط زیست و طبیعت تاثیر گذاشته و چنین به نظر می‌رسد که اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها به‌عنوان پوشش غالب کره زمین از چنین پدیده‌ای مصون نبوده و در طولانی مدت به تغییر الگوهای جریان رودخانه و سطح دریاها خواهد انجامید (پنل بین الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷).

گزارش چهارم ارزیابی (AR4) صفحه بین‌المللی تغییرات اقلیم (IPCC) نرخ افزایش سطح آب دریا (SLR) برای قرن ۲۰ را در حدود  $0.5-1.7\text{mm/yr}$  برآورد نموده است (بینداف و همکاران ۲۰۰۷). همچنین پیش‌بینی شده است که بالا آمدن سطح جهانی آب دریا برای قرن ۲۱ بین  $0.18\text{m}$  و  $0.4\text{m}$  خواهد بود (یوفیفر و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج تحلیل داده‌های ثبت شده به وسیله ی ابزارهای اندازه‌گیری جذر و مد و تکنولوژی‌های سنجش از دور ماهواره‌ای نشان می‌دهد که تغییر سطح دریا در مناطق مختلف کره زمین متفاوت است (بینداف و همکاران ۲۰۰۷). افزایش سطح آب دریاها در زندگی مردم و اقتصاد نواحی ساحلی به خصوص در مناطق پست مجاور دریا که همواره بالقوه سیل بالایی دارند، تأثیر قابل توجهی خواهد داشت. ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق ساحلی ناشی از بالا آمدن سطح دریا و استفاده از رویکردهای مناسب، مسائل کلیدی در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم است (گهرنژاد و همکاران، ۲۰۱۳). پیش‌بینی تغییرات جهانی سطح آبهای آزاد و تحت نمایشنامه‌های مختلف احتمالی تغییر اقلیم نشان دهنده این مسئله است که خطر سیل در مناطق ساحلی در اثر افزایش تراز آب دریاها افزایش می‌یابد (هاگتون و همکاران ۲۰۰۱). از این رو ارزیابی روند تغییرات سطح آب دریا در سال‌های آتی از اهمیت بسیار بالایی در برنامه‌ریزی مناطق ساحلی برخوردار است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. در جدول (۱) نتایج پیش‌بینی تغییرات سطح آب دریاها تا سال ۲۱۰۰ میلادی که به وسیله ی محققان و موسسه‌های تحقیقاتی صورت گرفته است ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات سطح آب حداقل ۱۲ سانتیمتر و حداکثر ۲۲۰ سانتیمتر است. شایان ذکر است هیچکدام از تحقیقات کاهش سطح آب دریاها را پیش‌بینی ننموده‌اند.

جدول (۱) خلاصه نتایج پیش بینی تغییرات سطح آب دریاها و اقیانوسها به وسیله ی منابع مختلف تحقیقاتی.

میزان افزایش سطح آب تا سال ۲۱۰۰ میلادی (متر)		محقق یا انجمن تحقیقاتی پیش بینی کننده
حداکثر	حداقل	
۲/۰	۰/۸	پفیر و همکاران، ۲۰۰۸
۱/۴	۰/۵	رمستورف، ۲۰۰۷
۱/۰	۰/۵	هورتون و همکاران، ۲۰۰۸
۲/۲	۰/۳	گرینستد و همکاران، ۲۰۰۹
۱/۹	۰/۷۵	ورنر و رمستورف، ۲۰۰۹
۱/۶	۰/۶	یوجوا و همکاران، ۲۰۱۰
۰/۷۶	۰/۱۲	دفر- بریتانیا

تحقیقات برای تحلیل گروه‌های زمانی با علامت غیرایستا به کار برده شده است (آدامووسکی، الف و ب، ۲۰۰۸). در نظریه موجک یک گروه زمانی غیرایستا در مقیاس‌های مختلف تجزیه شود. از این قابلیت می‌توان جهت تفسیر ساختار گروه و استخراج اطلاعات قابل توجهی از آنها با استفاده از تعدادی ضریب استفاده کرد. لو ۲۰۰۲، روش تبدیل موجک را برای تجزیه اجزای داده‌های بارش ۱ الی ۱۰ ساله در فصول بارانی به کار برد. همچنین ژینگارگ و همکاران، ۲۰۰۳، تحلیل موجک را برای بررسی طیف بارش باران و توسعه آن در چین شمالی در فصل بارش-های موسمی تابستان برای مقیاس زمانی ۱۰ ساله به کار بردند.

تحلیل موجک برای تفسیر تغییر جریان سالانه کانادا و شرح دادن ارتباط پویایی بین جریان بحرانی و تغییر اقلیم در نیمکره شمالی به کار برده شده است (کولیبالی و برن، ۲۰۰۴). روند گروه‌های بارندگی کل سالانه در سراسر ترکیه به وسیله ی کوچوک و پارتال، ۲۰۰۴، و با استفاده از تبدیل موجک گسسته بررسی و تحلیل شد. نتایج آنها نشان داد که اجزای موجک گسسته روند گروه‌های زمانی بارش را به خوبی تفسیر می‌کند. تمام این مطالعات مؤثر بودن روش موجک را برای شبیه سازی ترکیب‌های محلی با توزیع نامناسب چندگانه (چندمقیاسی) از متغیرهای اقلیمی را در زمان و مکان به اثبات می‌رسانند.

هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روند تغییرات سطح آبهای آزاد در خط ساحلی جنوب ایران شامل خلیج فارس و دریای عمان است. برای این منظور خروجی‌های یک مدل اقلیم جهانی، GCM با نام CGCM3 تحت نمایشنامه ی تغییر اقلیم A1b که

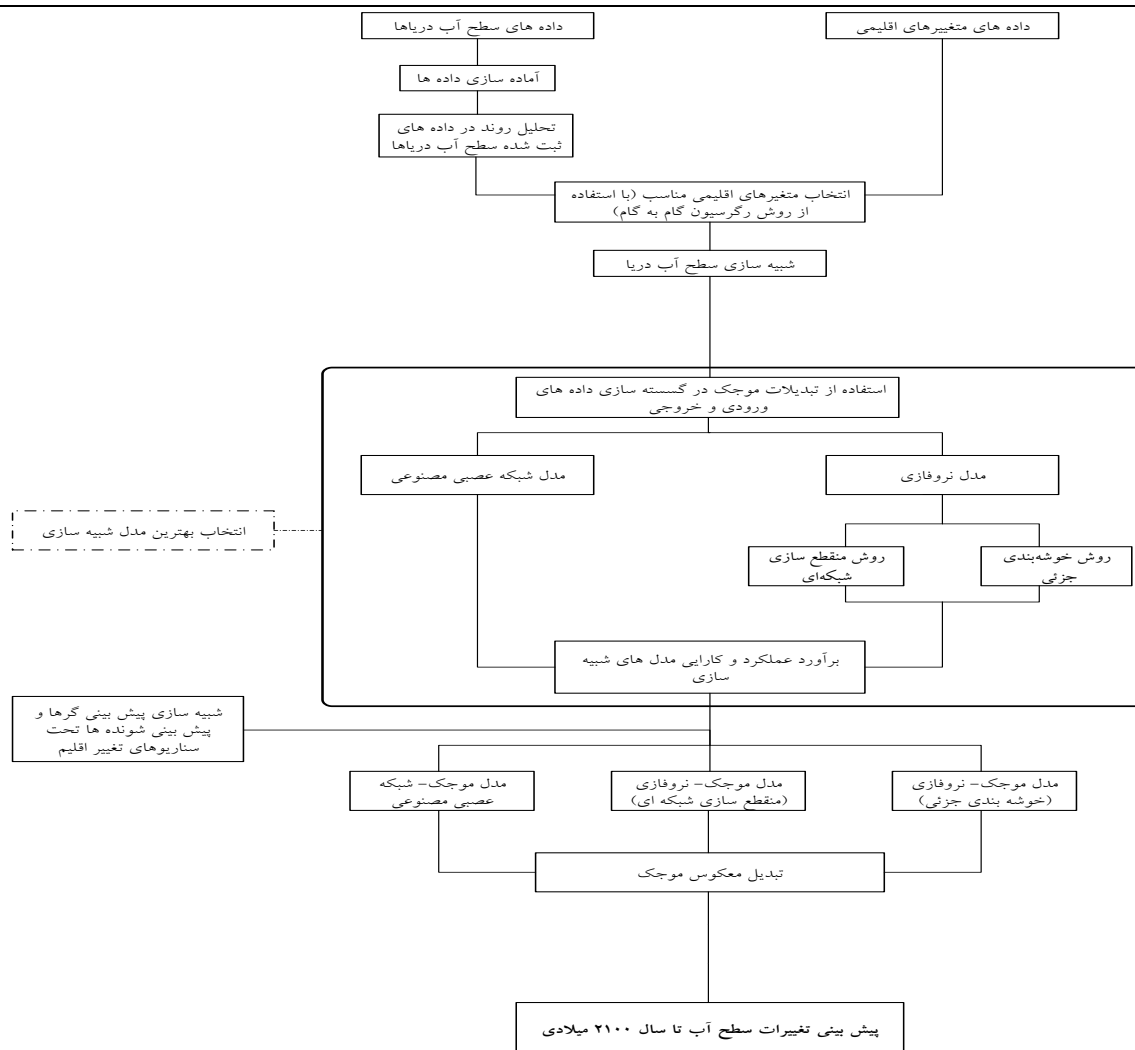
کاربردهای اخیر روش‌های هوش مصنوعی (AI) توانایی بالای خود را در مواجهه با گروه‌های زمانی تصادفی مانند سطح دریا ثابت کرده‌اند. در بین این نرم افزارها دو مدل که به طور گسترده‌ای در دهه‌های اخیر به ویژه برای تحلیل‌های اقلیمی، آشناسی و اهداف پیش-بینی استفاده شده‌اند، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سامانه استنتاج عصبی- فازی (ANFIS) هستند (امیدوار و خسروی، ۲۰۰۹). شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی برای کشف الگوهای موجود در داده‌های ثبت شده، که به وسیله ی محققان و روش‌های مرسوم آماری قابل کشف نیستند به طور گسترده و موفقی برای مدل سازی و پیش‌بینی فرایندهای آشناسی استفاده شده‌اند (توکلی و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیقاتی که در سالهای اخیر صورت گرفته اند، جهت بهره‌گیری همزمان از مزایای هر دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و سامانه استنتاج فازی، به استفاده از مدل سامانه استنتاج عصبی- فازی (ANFIS) توجه شد (خلیل‌آبادی و همکاران، ۲۰۰۳). به‌رغم انعطاف‌پذیری بالا و استفاده وسیع مدل-های شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج عصبی-فازی، کاربرد این مدل‌ها در زمینه پیش‌بینی افزایش سطح آب دریا چندان رضایت بخش نیست. دلیل این مسئله در نوسان‌ها علامت‌های کاملاً غیر ایستا و دامنه عملکرد وسیع فرایندهای اقلیمی و آشناسی هستند (گهرنژاد و اقبالی، ۲۰۱۵)

در این رخدادهای پیش‌پردازش ورودی و یا داده‌های خروجی قبل از استفاده در مدل پیش‌بینی، ضروری به‌نظر می‌رسد، و لذا برای این منظور کاربرد نظریه موجک در پردازش داده‌ها انتخاب مناسبی است (کاناس و همکاران، ۲۰۰۶). نظریه موجک در دامنه وسیعی از مطالعات و

تغییرات فراسنجهای اقلیمی در آینده را نشان می‌دهد، به کار برده شد. یک مجموعه از پیش‌بینی‌کننده‌ها که شامل بهترین فراسنجهای برای پیش‌بینی تغییر سطح دریا است با استفاده از روش وایازی مرحله‌ای برای شبیه‌سازی بالا آمدن سطح دریا از میان فراسنجهای خروجی مدل GCM انتخاب شد. از ترکیب نرم افزارهای ANFIS/ANN و نظریه موجک برای تفسیر و شرح رابطه بین پیش‌بینی‌شونده‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌ها و در نهایت بررسی تأثیر افزایش درجه حرارت کره زمین روی افزایش سطح دریا استفاده شد. از این روش می‌توان برای تعیین مناطق در معرض خطر سیل و بهبود طرح‌های اجرایی در مجاورت سواحل می‌توان بهره برد. در ادامه به شرح روش پیشنهادی و سپس مطالعه موردی و داده‌های در نظر گرفته شده پرداخته خواهد شد. پس از آن نتایج مطالعه مورد بحث قرار گرفته و در پایان خلاصه و نتیجه‌گیری ذکر شده است.

## ۲- روش شناسی

بررسی مطالعات قبلی و داده‌های موجود نشان دهنده روند صعودی افزایش سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها در مناطق مختلف کره زمین است که عمدتاً به اثرات تغییر اقلیم نسبت داده می‌شوند. مطالعات درباره تغییرات سطح آب دریاها نشان دهنده ارتباط نسبتاً قوی بین تغییرات متغیرهای اقلیمی و تغییرات سطح آب دریا است. لذا در این مطالعه سعی بر آن است تا با شناسایی و استفاده از متغیرهای اقلیمی مناسب، روند تغییرات سطح آب دریا در خط ساحلی جنوب ایران در ۱۰۰ سال آینده و تحت نمایشنامه‌ی تغییر اقلیم شناسایی تحلیل و بررسی گردد. برای این منظور پس از شناسایی متغیرهای اقلیمی موثر با تحلیل همبستگی، از دو روش شبیه‌سازی ترکیبی موجک-شبکه عصبی مصنوعی و موجک-نوروفازی برای شبیه‌سازی تغییرات آبی سطح آب دریا استفاده شده است. در شکل ۱، ساختار روش پیشنهادی برای بررسی تغییرات سطح دریا تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان داده شده است. در ادامه مراحل و گام‌های اصلی این فرآیند تشریح می‌گردند.



شکل ۱- ساختار و مراحل مطالعات برای پیش‌بینی تغییرات سطح دریا با لحاظ اثرات تغییر اقلیم.

## ۲-۱- آماده‌سازی داده‌ها

اولین گام در توسعه نرم افزارهای پیش‌بینی، آماده‌سازی و بررسی صحت و کیفیت داده‌ها است. در این تحقیق برای تکمیل گروه زمانی مورد استفاده در مدل سازی و تخمین داده مفقوده سطح آب،  $Y_x$  در ایستگاه  $x$ ، از داده‌های ایستگاه‌های مجاور با روش معکوس مربع فاصله به شرح زیر استفاده شده است:

$$Y_x = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

که  $W_i = \frac{1}{D_i^2}$  وزن ایستگاه  $i$  استفاده شده جهت

تکمیل نقصان داده‌های ایستگاه  $x$ ،  $L_i$  ارتفاع سطح آب ثبت شده در ایستگاه  $i$ ،  $D_i$  فاصله بین ایستگاه  $i$  و  $x$ ، و  $n$  تعداد ایستگاه‌های همسایه ایستگاه  $x$  است.

با توجه به محدودیت طول گروه زمانی داده‌های موجود، نیاز است تا از کفایت طول داده‌ها اطمینان حاصل شود. برای سنجش کفایت اطلاعات به لحاظ طول

دوره آماری از ضریب هرست استفاده گردید. این ضریب برای سنجش حافظه بلند مدت سری زمانی استفاده می‌شود. ضریب هرست از رابطه زیر به دست می‌آید (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۲۰۱۰).

$$K = \frac{\text{Log}(\frac{R}{\sigma})}{\text{Log}(\frac{N}{2})} \quad (2)$$

$N$  تعداد اطلاعات در سری زمانی و  $\sigma$  انحراف معیار سری می باشد. در رابطه فوق  $R$  برابر است با تفاوت بین بیشترین و کمترین مقادیر مثبت و منفی انحراف از میانگین گروه‌های زمانی که به صورت تجمعی محاسبه شده باشند:

$$R = D^+ - D^- \quad (3)$$

برای محاسبه مقادیر  $D$ ، ابتدا میانگین اطلاعات از همه اعداد کم می‌شود:

$$D_n = \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}) \quad (4)$$

مقادیر مثبت  $Z$  که از توزیع بهنجار معیار به دست می‌آید نشان‌دهنده روندهای افزایشی و مقادیر منفی  $Z$  نشان‌دهنده روند کاهشی است. فرض صفر مبنی بر نبود روند در داده‌ها برای مقادیر  $Z$  بزرگتر از  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  رد می‌شود. در این مطالعه سطح معنی‌داری  $\alpha=0.05$  به کار گرفته شده است.

## ۲-۳- انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها

با بررسی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی و داده‌های تغییر سطح دریا، متغیرهای مناسب پیش‌بینی‌کننده تغییرات سطح دریا انتخاب می‌شوند. بعضی از متغیرهای اقلیمی وابستگی قابل توجهی را با تغییرات سطح دریا از خود نشان می‌دهند ولی از آنجاکه خود این متغیرها در ارتباط با سایر متغیرهای اقلیمی عمل می‌کنند، اطلاعات اضافی را برای تحلیل تغییرات سطح دریا ارائه نمی‌دهند. برای در نظر گرفتن این مساله و حذف متغیرهای همسو و انتخاب متغیرهای مستقل، از روش وایازی گام به گام جهت تعیین پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی با حداکثر همبستگی و حداقل افزونگی استفاده می‌شود.

وایازی گام به گام یک روش سامانه‌اتیک برای اضافه کردن یا حذف برخی متغیرهای مستقل از یک مدل رگرسیون براساس اهمیت آماری آنها در عملکرد مدل است. این روش ترکیبی است از انتخاب پیشرو و حذف پس‌رو. این روش با یک مدل اولیه آغاز می‌شود و سپس قدرت تفسیر نرم افزارهای افزایشی بزرگتر و کوچکتر را با مدل مرحله قبل مقایسه می‌کند و درباره‌ی ساختار مدل تصمیم می‌گیرد.

اگر برای  $P$  متغیر مستقل  $X_{L_1}$  تا  $X_{L_p}$  در مدل وایازی چندگانه مجموع مربعات خطا حاصل از وایازی با  $SSR_{L_1, \dots, L_p}$  نشان داده شوند و میزان افزایش مجموع مربعات خطای وایازی با افزایش متغیر مستقل  $x_{L_{(p+2)}}$  با  $SSR_{L_{(p+1)}, L_1, \dots, L_p}$  نشان داده شود، مجموع مربعات خطای وایازی برابر خواهد بود با:

$$SSR_{L_{(p+1)}, L_1, \dots, L_p} = SSR_{L_1, \dots, L_{p+1}} - SSR_{L_1, \dots, L_p} \quad (9)$$

در وایازی گام به گام حذف پس‌رو بعد از هر مرحله انتخاب پیشرو اجرا می‌شود تا متغیرهای اضافه از مدل حذف شوند. در هر مرحله آماره  $P$ -value برای ارزیابی نرم افزارها با و یا بدون در نظرگرفتن متغیر لازم بررسی

سپس این سری (که حاوی مقادیر  $D$  است) به صورت تجمعی در طول زمان رسم می‌گردد. بیشترین و کمترین مقدار  $D$  در این سری برای محاسبه  $R$  محاسبه می‌گردند. مقادیر ضریب هرست برابر با  $0.5$  برای یک سری نشان دهنده یک سری مستقل بهنجار می‌باشد. هرچه فاصله این ضریب از مقدار  $0.5$  بیشتر باشد نشان دهنده این مطلب است که حافظه بلند مدت در سری زمانی بیشتر است. بدین معنی که نیازی به تطویل اطلاعات سری نیست (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۲۰۱۰).

## ۲-۲- بررسی روند

نرم افزارهایی که جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای مختلف استفاده می‌شوند، معمولاً دارای محدودیت برای در نظر گرفتن روند گروه‌های آماری هستند. لذا تحلیل روند داده‌ها و در صورت لزوم حذف آنها ضروری است. برای تحلیل روند گروه زمانی داده‌های سطح دریا از آزمون (Mann-Kendall) استفاده شده است (کندال، ۱۹۷۵). از این آزمون در گستره وسیعی در مطالعات آبشناسی و اقلیمی استفاده می‌شود (ساندرلیک و برن، ۲۰۰۴). در آزمون MK ابتدا آماره  $S$  به صورت زیر محاسبه گردد:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

به طوریکه مقدار  $x_j$  مقدار داده‌های متوالی و  $n$  طول دوره آماری است. تابع  $\text{sgn}$  به صورت زیر تعابرسنگ می‌شود:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

واریانس  $s$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (7)$$

که  $t_i$  شماره گره برای مقدار  $i$ ام و  $n$  تعداد گره‌هاست. سپس مقدار نمره معیار شده  $Z$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

سیگنال آنها را نشان ندهند. موجک دارای سه مشخصه تعداد نوسان محدود، بازگشت سریع به صفر در هر دو جهت مثبت و منفی در دامنه خود و میانگین صفر است (این سه ویژگی شرط لازم برای این است که تابعی بتواند به عنوان تبدیل موجکی عمل کند) که شرط مقبولیت نامیده شده و به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$\int \varphi(t) dt = 0 \quad (10)$$

که در آن  $\varphi(t)$  تابع موجکی می‌باشد.

در مباحث مربوط به موجک دو نوع تبدیل موجکی وجود دارد: ۱- تبدیل موجکی پیوسته (CWT) ۲- تبدیل موجکی گسسته. تبدیل موجکی پیوسته با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$CWT_s^\varphi(s, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int S(t) \varphi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (11)$$

رابطه فوق تابعی از دو متغیر  $s$  و  $\tau$  است که  $\tau$  نشان دهنده انتقال،  $s$  بیانگر مقیاس (عکس بسامد) و علامت \* نشان دهنده مزدوج مختلط است.  $S(t)$  نیز تابع موجک مادر است. فراسنجهای  $s$  و  $\tau$  اعداد حقیقی هستند و  $s$  همیشه مثبت است که ممکن است مقادیر پیوسته یا گسسته به خود بگیرد.  $s$  و  $\tau$  در تبدیل موجکی پیوسته دارای مقادیر پیوسته و در تبدیل گسسته دارای مقادیر گسسته هستند.  $\varphi(t)$  تابع موجک مادر نامیده می‌شود. عبارت مادر به این دلیل به کار رفته که توابع (موجک‌های) متفاوت به وجود آمده براساس فراسنجهای مقیاس و انتقال همگی از تابع پایه (موجک مادر) ناشی می‌شوند. به عبارت دیگر موجک مادر، موجک اصلی برای تولید توابع پنجره دیگر است. کلیه توابع پنجره  $\varphi_{s,\tau}^*(t)$  که از تابع مادر ساخته می‌شوند از رابطه زیر به دست می‌آیند (ضریب مقیاس با یکی از حروف  $a$  یا  $s$  نشان داده می‌شود).

$$\varphi_{s,\tau}(t) = \varphi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (12)$$

مقیاس به طور ساده به معنای کشیده شدن یا فشرده شدن موجک می‌باشد و میزان کشش یا مدت زمان موجک را بیان می‌کند. انتقال موجک به طور ساده به مفهوم به تاخیر انداختن یا جلو انداختن موجک و بیان کننده موقعیت موجک روی محور زمان است. تبدیل گسسته موجکی جهت پیش پردازش و تحلیل سری های زمانی مناسبتر از تبدیل پیوسته موجکی می باشد، زیرا داده ها اجزای اضافی نداشته ، و بنابراین تبدیل معکوس

محاسبه می‌شود تا در باره‌ی اضافه و یا حذف شدن متغیر مزبور تصمیم‌گیری شود. مراحل حذف پس‌خور و وایازی پیش‌خور تا جایی که دیگر نتوان در مدل تغییری ایجاد نمود، ادامه می‌یابد.

## ۲-۴- شبیه‌سازی تغییرات سطح آب دریا

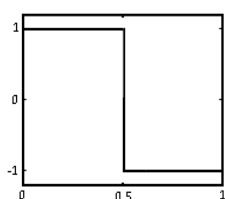
در مرحله بعد نرم افزارهای شبیه‌سازی سطح دریا توسعه داده می‌شوند. برای این منظور دو مدل شبیه‌سازی ترکیبی مختلف در نظر گرفته شده است. مدل اول ترکیبی از نظریه موجک و مدل شبکه عصبی مصنوعی به نام مدل شبکه عصبی-موجکی (DWNN)، و مدل دوم ترکیبی از نظریه موجک و سامانه استنتاج فازی-عصبی (ANFIS)، به نام مدل نروفازی-موجک (DWFANFIS) هستند. در این نرم افزارها از نظریه موجک برای تجزیه داده‌های ورودی و خروجی با استفاده از چند موجک ساده مادر استفاده شده و سپس داده‌های ورودی و خروجی تجزیه شده به وسیله موجک با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و سامانه استنتاج فازی شبیه‌سازی می‌شوند.

## ۲-۴-۱ نظریه موجک

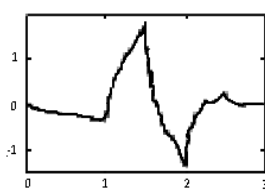
به هر کمیت متغیر در زمان یا مکان که قابل اندازه‌گیری باشد، سیگنال گویند. برای تحلیل سیگنال‌ها، از مبدل‌های ریاضی استفاده می‌شود تا بتوان اطلاعاتی را که از سیگنال‌های خام به آسانی قابل دسترس نیستند، به دست آورد تبدیل موجک در ابتدای دهه ۸۰ معرفی شده و از آن به طور گسترده در رشته‌های مختلف علمی استفاده می‌شود. لابات (۲۰۰۵)، کاربردهای جدیدی از نظریه موجک را در زمینه‌های مختلف علوم، مهندسی و زمین شناسی ارائه داد.

تبدیل موجک یکی از تبدیلهای ریاضی کارآمد در زمینه پردازش سیگنال است. موجک ها توابع ریاضی هستند که شکل مقیاس زمان از سری های زمانی و روابط آنها جهت تحلیل سری های زمانی که شامل متغیرها و ثابتها هستند را ارائه می‌دهند. تحلیل موجکی استفاده از فاصله‌های زمانی طولانی مدت را برای اطلاعات دارای بسامد پایین و تناوب‌های کوتاهتر را برای اطلاعات دارای بسامد بالا ارائه می‌دهد. تحلیل موجکی قادر به نمایش جنبه‌های مختلف داده های متفاوت، نقاط شکست و ناپیوستگیها می‌باشد که ممکن است دیگر روشهای تحلیل

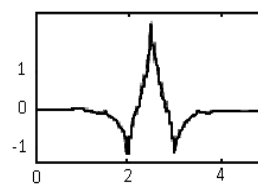
ساده‌ترین نوع هم هست و پایه‌هایی متعامد برای تنیدن فضای محاسبه را ارائه می‌دهد. موجک Daubechies هیچ ویژگی صریحی ندارد. با این حال، مدول مربع تابع تبدیل واضح و نسبتاً ساده است. Coiflet موجک‌های گسسته‌اند که تابعی از نوع مقیاس‌بندی با گشتاورهای میرا را دارند. این موجک تقریباً متقارن است و توابع موجک آن دارای  $N/3$  گشتاورهای میرا و توابع مقیاس-بندی  $N/3-1$  هستند و از آنها در مصارف مختلفی استفاده شده‌است. جهت کسب اطلاعات بیشتر به (Mallat 1998) مراجعه شود.



Haar wavelet (HAAR)



Daubechies wavelet (Db2)



Coiflet wavelet (Coif1)

شکل ۲- طرح واره توابع تبدیل موجک. (Mallat, 1998)

استفاده نماید. در ANFIS سامانه‌های استنتاج فازی FIS به‌خوبی تکامل می‌یابد. یک سامانه استنتاج فازی می‌تواند برقراری یک ترسیم غیرخطی را از متغیرها را بررسی کند که به‌صورت  $f$  بیان می‌گردد. در واقع،  $f$  مقدار تخمینی از یک مقدار خاص مشاهده شده است و می‌تواند بصورت رابطه زیر محاسبه گردد:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^m y^1 (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i))}{\sum_{i=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i))} \quad (15)$$

که  $y^1$  خروجی اولیه در استلزام ممدانی یا یک مقدار ثابت در استلزام سوگنو است. مقدار تابع عضویت  $\mu_{A_i^1}(x_i)$  بر روی نقاط فضایی ورودی  $x=[x_1, \dots, x_n]$  از قانون فازی  $I$  است. فرض ارتباط ((و)) در گزاره‌ها به-صورت حاصلضرب جبر کلاسیک (استلزام ممدانی) بوده که در این‌صورت روش چگالی مرکزی برای دی‌فازی استفاده می‌شود، بنابراین رابطه فوق به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m w_i b_i(x) \quad (16)$$

در اینجا اگر  $w_1$  برابر  $y^1$  باشد آن‌گاه مقدار  $b_1$  به-صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$b_1(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i)}{\sum_{i=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i))} \quad (17)$$

DWT تبدیل یافته را می‌توان برای هر دسته از داده‌های زمان بسامد به کار برد. فرایند تجزیه سیگنال شامل یک یا چند مرحله است که در تجزیه چند مرحله‌ای، موج پس از اولین مرحله تفکیک با تجزیه مجدد قسمت تقریبی، تجزیه موج ادامه می‌یابد (طوفانی و همکاران، ۲۰۱۱). در این مطالعه برخی از موجک‌های مادر مثل Haar، Db2 (موجک Doibecheies از مرتبه ۲) و Coif1 استفاده شدند که در شکل (۲) عرضه گردیده‌اند. موجک‌ها اولین موجک شناخته شده است که پیدایش آن به سال-های ابتدای قرن بیستم باز می‌گردد. این موجک

## ۲-۴-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی

ساختار کلی مدل شبکه عصبی پیش‌خور (Feed forward) یا MLP به صورت زیر می‌باشد:

$$y = \varphi\left(\sum_{i=1}^n \omega_i x_i + b\right) \quad (13)$$

که در آن  $W_i$  وزن منطبق با متغیر ورودی  $X_i$ ،  $b$  (چولگی) (تعامل یکسویه)،  $\varphi$  تابع محرک و  $n$  تعداد متغیرهای ورودی است.

## ۲-۴-۲ شبکه عصبی مصنوعی موجک گسسته

مدل DWNN ترکیبی از تبدیل موجک و مدل ANN است. ترکیب موجک و شبکه عصبی الگوی جدیدی از هوش مصنوعی با نام شبکه عصبی-موجکی تشکیل می‌دهد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای شبکه‌های عصبی انتشار برگشتی باشد:

$$y_{DWNN} = \varphi\left(\sum_{i=1}^n \omega_i T_{m,n} + b\right) \quad (14)$$

فرانسجهای معادله فوق همانند فرانسجهای معادلات ۱۰ و ۱۳ هستند.

## ۲-۴-۲ مدل استنتاج عصبی - فازی

سامانه استنتاج فازی عصبی تطابقی (ANFIS) اجازه می‌دهد که سامانه‌های فازی در مباحث آموزش فرانسجهای از الگوریتم انتشار خطا به عقب تطبیقی

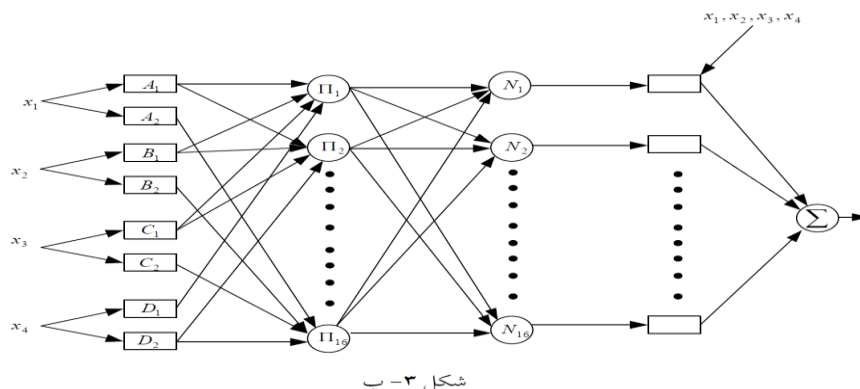
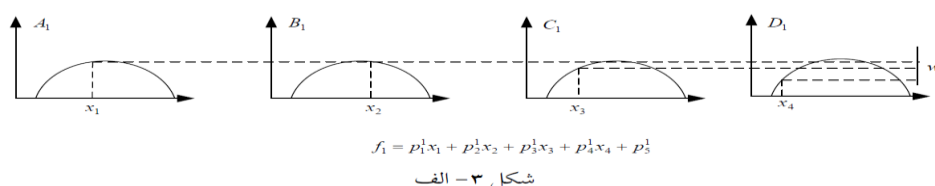


روش ANFIS می‌بایست مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر مشاهده شده  $Q^h(x)$  با مقدار محاسبه شده  $F_s(x)$  حداقل گردد، بنابراین طبق رابطه زیر:

$$\min: \sum_{j=1}^h |F_s(x^j) - Q^h(x^j)|^2 \quad (18)$$

ساختار یک سامانه استنتاج فازی شبکه عصبی ۵ لایه دارای چهار متغیر ورودی که هر ورودی دارای دو تابع عضویت است، در شکل ۳ نمایش داده شده است (کارآموز و همکاران، ۲۰۰۵).

تاکنون مقدار  $f$  برای یک نقطه از دامنه تغییرات ورودی یا برای یک  $x$  از مجموعه متغیرهای ورودی و  $D=[x_1, \dots, x_n]$  برای  $i=1, 2, \dots, n$  متغیرهای ورودی و  $j=1, 2, \dots, h$  برای داده‌های مشاهده‌ای محاسبه شده است. حال اگر  $F_s$  مقادیر محاسبه شده، متناوب نقاط مجموعه متغیر ورودی باشد، در این صورت  $F_s$  برابر  $f(x)$  برای سایر متغیرهای ورودی خواهد بود. به عبارت دیگر تابع  $F_s$  در محدوده  $[a, b]$  برای مقدار متغیرهای ورودی  $D=\{x^1, \dots, x^h\}$  خواهد بود که این متغیرها در این محدوده قرار دارند. اگر مقدار متغیر خروجی بازنه مقادیر متغیرهای ورودی  $D=\{x^1, \dots, x^h\}$  برابر  $Q^h$  باشد در



شکل ۳- سامانه استنتاج فازی شبکه عصبی دارای چهار متغیر ورودی و در هر ورودی دو تابع عضویت.

## ۲-۴-۵ سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی موجک گسسته

سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی موجک گسسته (DWANFIS) توانایی‌های DWT در استخراج و انتخاب فراسنجه‌ها را با توانایی‌های مشخص روش‌های ANFIS در هم می‌آمیزد. سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی موجک گسسته براساس نظریه تبدیل موجک گسسته ساخته می‌شود. براساس تجزیه موجک، ساختار DWANFIS به شرح زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$y(x) = \frac{\sum_i w_i f_i(\psi(D_i(x - t_i)))}{\sum_i w_i} \quad (19)$$

که در آن  $w_i$  وزن ورودی‌های DWANFIS،  $D_i$  بردارهای تاخیر مشخص‌کننده ماتریس‌های تاخیری

در استفاده از سامانه نروفازی، دو روش منقطع سازی شبکه‌ای (Grid partition) و خوشه‌بندی جزئی (Sub-Clustering) در نظر گرفته شده که در مطالعه حاضر هر دو روش مورد آزمون قرار گرفته است. تفاوت عمده این دو روش، در چگونگی تعیین تابع عضویت فازی است. بدین ترتیب که در روش جداسازی شبکه‌ای نوع تابع عضویت مربوط به اطلاعات ورودی به وسیله ی کاربر تعیین می‌شود ولی در روش خوشه‌بندی جزئی نوع تابع عضویت باتوجه به خصوصیات اطلاعات ورودی و دسته‌بندی‌های موجود در آنها به وسیله ی خود مدل تعیین می‌گردد. در روش خوشه‌بندی جزئی محدوده نفوذ بین صفرتا یک متغیر است.

پیش‌بینی غیرقابل قبولی را نشان می‌دهند. واضح است که مقادیر نزدیکتر به یک برای  $(R^2_{NS})$  و مقدار کوچک برای RMSE، بر عملکرد بهتر مدل دلالت دارند.

## ۲-۶- منطقه مورد تحقیق

خلیج فارس با مساحت  $251000 \text{ km}^2$  از شرق به خلیج عمان متصل است و انتهای غربی آن با مصب بزرگ اروندرود مشخص می‌گردد. دریای عمان تنگه‌ای است که دریای عرب را به خلیج فارس وصل می‌کند. دریای عمان حوضه‌ای نسبتاً بسته است که طیف عمق آن از ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ متر متغیر است. خلیج فارس و دریای عمان عمق چندانی ندارند و حداکثر عمق آنها ۹۰ متر و عمقشان ۵۰ متر است. اقلیم این ناحیه کمابیش شبیه اقیانوس هند است.

سامانه شبکه سنجش جذر و مد ایران که به وسیله ی مرکز نقشه نگاری ملی (NCC) اداره می‌شود، ارتفاع مد ماهانه را در ۹ نقطه از خلیج فارس و دریای عمان ثبت می‌کند. از بین این ۹ ایستگاه، ۴ ایستگاه دارای طول آماری نسبتاً مناسبی هستند که در این مطالعه از آنها استفاده شده است. برای تأمین داده‌های بیشتر و افزایش صحت تحلیلها، ایستگاه کراچی که در قسمت شرقی دریای عمان واقع است (جنوب پاکستان) و دارای طول آماری قابل توجهی نیز است، در این مطالعه لحاظ شده است. مکان ایستگاه‌های مدنظر و مشخصات آنها به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۲ آمده است. برای برآورد تأثیرات تغییر اقلیم، خروجی‌های مدل CGCM3 (Canadian Global Climate Model 3) تحت نمایشنامه ی تغییر اقلیم استفاده شده است.

اصلاحی،  $D_i$  و  $t_i$  بردارهای انتقال،  $\psi$  تابع موجک، و  $f_i$  توابع خروجی Sugeno از ANFIS است.

## ۲-۵- شاخص‌های برآورد عملکرد نرم افزار

معیارهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد نرم افزار-های پیش‌بینی وجود دارند. در این مطالعه شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R) و ضریب Nash-Sutcliffe  $(R^2_{NS})$  به کار گرفته شدند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N} \right]^{0.5} \quad (20)$$

(۲۱)

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N S_i O_i - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N O_i}{\{[N \sum_{i=1}^N S_i^2 - (\sum_{i=1}^N S_i)^2][N \sum_{i=1}^N O_i^2 - (\sum_{i=1}^N O_i)^2]\}^{0.5}}$$

$$R^2_{N.S.} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (22)$$

که در آن  $O_i$  مقدار مشاهده شده در گام زمانی  $i$  ام،  $S_i$  مقدار پیش‌بینی شده در گام زمانی  $i$  ام،  $N$  تعداد گام‌های زمانی و  $\bar{O}_i$  میانگین مقدار داده‌های مشاهداتی است. هرچه مقدار ضریب همبستگی بیشتر باشد، بیانگر عملکرد بهتر مدل خواهد بود و در کل پیش‌بینی‌های رضایت‌بخش دارای مقادیر ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۷ هستند (پریسوژ و همکاران ۲۰۱۸). مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای سنجش صحت پیش‌بینی استفاده می‌شود که مقدار آن از صفر برای پیش‌بینی‌های کاملاً صحیح تا مقادیر مثبت بزرگ متناسب با میزان خطا افزایش پیدا می‌کند. شاخص  $(R^2_{NS})$  از مقدار ۱ برای پیش‌بینی کامل به مقادیر منفی بزرگ کاهش می‌یابد. در کل مقادیر منفی  $(R^2_{NS})$  نتایج



شکل ۴- موقعیت ایستگاه‌های ثبت تغییرات سطح دریا در

نوار ساحلی جنوب ایران. (<http://earth.google.com>)

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های لحاظ شده ثبت تغییرات سطح دریا در نوار ساحلی جنوب ایران.

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	سال تاسیس ایستگاه (میلادی)	میانگین سطح آب (میلیمتر)	انحراف معیار (میلیمتر)
امام حسن	۲۹/۸۳	۵۰/۲۵	۱۹۹۰	۱۸۶۲/۱	۱۵۹/۴
شهید رجایی	۲۷/۱۰	۵۷/۰۷	۱۹۸۹	۳۲۴۲/۶	۷۸/۶
بندر چابهار	۲۵/۲۸	۶۰/۶۲	۱۹۹۰	۲۷۵۸/۶	۴۱۵/۷
کنگان	۲۷/۸۳	۵۲/۵۵	۱۹۸۹	۲۱۶۰/۲	۹۶/۴
کراچی (جزیره منورا)	۲۴/۸۰	۶۶/۹۷	۱۹۷۹	۱۷۷۱/۳	۱۱۴/۴

### ۳- نتایج و بحث و بررسی

#### ۳-۱- استحصال داده‌ها

آنچاکه مقدار این ضریب برای تمامی داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها، از ۰/۵ بیشتر بود لذا می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های موجود برای تحلیل تغییرات سطح دریا کفایت می‌کنند.

جدول ۳- نتایج ضریب هرست برای ایستگاه‌های ثبت داده‌های تغییر سطح آب.

ردیف	ایستگاه	ضریب هرست
۱	امام حسن	۰/۵۰۲
۲	شهید رجایی	۰/۵۱۹
۳	بندر چابهار	۰/۵۹۳
۴	کنگان	۰/۵۱۴
۵	کراچی (جزیره منورا)	۰/۵۳۴

داده‌های مفقوده در ثبت داده‌های سطح دریا و گروه‌های زمانی، با استفاده از روش معکوس مجذور فاصله تکمیل شده‌اند و همان‌طوری که در جدول (۳) آمده است ضریب هرست برای ۵ ایستگاه مدنظر محاسبه شد. از

ایستگاه‌ها به غیر از کراچی که روندی افزایشی را نشان می‌دهد، وجود ندارد. باید توجه داشت که به موجب خواص تبدیل موجک، این روش خواهد توانست در ایستگاه کراچی روند را در گروه زمانی موجود توزیع نماید.

وجود روند در آمارهای سطح دریا در هر ایستگاه، با استفاده از روش مان - کندال (Mann-Kadell) بررسی شد. مقدار بحرانی  $Z_c$  در سطح معنی داری ۰/۰۵، در این مطالعه مدنظر بود، که به مقدار بحرانی  $\pm 1/96$  منجر می‌شود. نتایج تحلیل روند در جدول (۴) نشان داد که روند معنی داری در تغییرات سطح آب دریا در این

جدول ۴- نتایج تحلیل روند برای ایستگاه‌های ثبت داده‌های تغییر سطح آب.

ردیف	ایستگاه	روند (mm/year)	Zs	Zcritical	تفسیر
۱	امام حسن	۱۵	۱/۰۹	۱/۹۶	بدون روند
۲	شهید رجایی	-۳	-۰/۱۶	۱/۹۶	بدون روند
۳	بندر چابهار	۱	۰/۰۰	۱/۹۶	بدون روند
۴	کنگان	-۱	۰/۰۰	۱/۹۶	بدون روند
۵	کراچی (جزیره منورا)	۲۹	۲/۱۸	۱/۹۶	روند افزایشی

#### ۳-۲- انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها

از روش وایزی گام به گام جهت انتخاب مناسب-ترین پیش‌بینی‌کننده‌های تغییرات سطح دریا استفاده گردید. متغیرهای اقلیمی با مقادیر بالاتر ضریب تبیین، SSE و P-Value کمتر به عنوان پیش‌بینی‌کننده تغییرات

پایین با استفاده از سه تابع موجک گسسته به نام‌های Haar، Db2 و Coif1 تجزیه شدند. ۸۰ درصد از داده‌های گروه‌های تجزیه شده پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی-شونده‌ها برای آموزش مدل ANN استفاده شدند و باقی

جدول ۵- نتایج روش وایزی گام به گام بر روی فراسنجهای اقلیمی CGCM3 جهت تعیین پیش‌بینی‌کننده‌های تغییرات سطح آب در نوار ساحلی جنوب ایران.

ردیف	متغیر اقلیمی	وضعیت انتخاب	P-Value	ضریب همبستگی (R2)
۱	ارتفاع سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال		۰/۰۲۲۲	۰/۶۸
۲	ارتفاع سطح فشار ۸۵۰ هکتوپاسکال		۰/۱۰۲۱	۰/۲۱
۳	باد منطقه‌ای (در سطح)		۰/۵۴۳۶	۰/۰۳
۴	باد منطقه‌ای در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال		۰/۵۶۷۲	۰/۰۵
۵	باد منطقه‌ای در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال		۰/۶۱۸۳	۰/۰۷
۶	دمای هوا		۰/۳۳۶۲	۰/۰۱
۷	دمای سطح دریا (SST)		۰/۰۰۱۳	۰/۴۰
۸	رطوبت نسبی (فقط در تراز بالای ۳۰۰ هکتوپاسکال)		۰/۱۳۴۹	۰/۰۹
۹	رطوبت ویژه (فقط در تراز بالای ۳۰۰ هکتوپاسکال)		۰/۱۶۲۰	۰/۰۸
۱۰	فشار		۰/۳۹۸۶	۰/۰۴
۱۱	امگا (تا تراز ۱۰۰ هکتوپاسکال)		۰/۶۷۸۲	۰/۰۲
۱۲	فشار سطح دریا (SLP)		۰/۰۱۱۴	۰/۶۰
۱۳	نسبت ریزش		۰/۴۵۷۹	۰/۰۵
۱۴	آب قابل بارش (SPW)		۰/۰۰۵۶	۰/۷۱
۱۵	شار اندازه حرکت (مولفه V)		۰/۵۸۳۹	۰/۰۳
۱۶	شار اندازه حرکت (مولفه U)		۰/۵۵۲۹	۰/۰۲
۱۷	مولفه سرعت منطقه‌ای (سطح)		۰/۴۶۸۱	۰/۰۳
۱۸	مولفه سرعت منطقه‌ای تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال		۰/۵۰۲۳	۰/۰۳
۱۹	مولفه سرعت منطقه‌ای تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال		۰/۵۲۸۱	۰/۰۲
۲۰	مولفه سرعت نصف‌النهاری در سطح		۰/۶۱۸۷	۰/۰۲
۲۱	مولفه سرعت نصف‌النهاری تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال		۰/۶۷۴۷	۰/۰۴
۲۲	چرخش		۰/۲۹۳۸	۰/۰۵
۲۳	واگرایی (سطح)		۰/۵۸۹۱	۰/۰۲
۲۴	واگرایی تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال		۰/۵۹۹۲	۰/۰۳
۲۵	واگرایی تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال		۰/۷۱۲۵	۰/۰۱

مانده برای آزمون مدل استفاده شد. این داده‌ها در هر مرحله به صورت تصادفی برگزیده شدند. مدل ANN مورد استفاده دارای یک لایه پنهان است. چهار نرون در لایه ورودی و یک نرون در لایه خروجی است. توابع انتقال ورودی لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی به ترتیب Tansig، Logsigs و Pureline در نظر گرفته شدند. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان (NNH) به روش زیر محاسبه می‌گردد:

$$NNH = \frac{NNI + NNO}{2} \quad (۲۳)$$

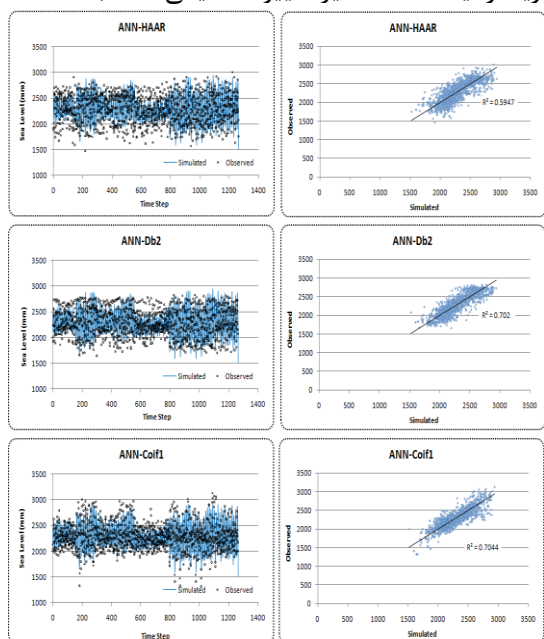
که در آن NNI تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و NNO تعداد نرون‌ها در لایه خروجی است. با استفاده از رابطه فوق تعداد نرون‌ها در لایه پنهان برابر با ۲/۵ تخمین زده می‌شود. لذا مدل ANN (بدون در نظرگیری

سطح دریا در خطه ساحلی جنوبی ایران انتخاب شدند. نتایج این بررسی در جدول (۵) آمده‌اند. متغیرهای اقلیمی فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوبالوقه (GH)، دمای سطح دریا (SSR) و آب قابل تبخیر دریا (SPW) به عنوان پیش‌بینی‌گرهای تغییرات سطح دریا در بین ۲۵ متغیر اقلیمی شبیه‌سازی شده با CGCM3 انتخاب شدند. از این متغیرها به عنوان ورودی‌های نرم افزارهای DWNN و DWANDIS استفاده گردید.

### ۳-۳- مدل شبکه عصبی مصنوعی موجک گسسته (DWNN)

در به کار گیری مدل DWNN، نخست پیش‌بینی-کننده‌ها و گروه‌های زمانی سطح دریا برای گذر بالا و گذر

موجک نیز نشان داده شده‌اند. نتایج، بهبود قابل ملاحظه عملکرد مدل با استفاده از شکل ترکیبی از مدل شبکه عصبی مصنوعی و تابع تبدیل موجک حتی در بدترین حالت را نشان دادند. برطبق این نرم افزار، عملکرد نرم افزارهای DWNN که از Db2 و Coif1 استفاده می‌کنند مشابه هم بودند لیکن مدل Coif1 در دوره واسنجی عملکرد بهتری را داشت. بنابراین مدل Coif1 به عنوان بهترین مدل DWNN برای شبیه‌سازی بالا آمدن سطح دریا در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی انتخاب شد.



شکل ۵- نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی-موجک برای پیش‌بینی تغییرات سطح دریا در دوره صحت سنجی و اعتبار سنجی و ضریب همبستگی متناظر آنها.

جدول ۷- عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی-موجک برای پیش‌بینی تغییرات سطح دریا در دوره صحت سنجی و اعتبار سنجی.

اعتبارسنجی			صحت سنجی			تابع موجک
RMSE	R2NS	R	RMSE	R2NS	R	
۰/۱۶۵۸	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۱۳۲۷	۰/۵۷	۰/۵۹	Haar
۰/۱۵۴۷	۰/۶۴	۰/۶۷	۰/۱۱۷۹	۰/۶۷	۰/۷۰	Db2
۰/۱۵۸۶	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۱۰۴۳	۰/۶۸	۰/۷۰	Coif1
۰/۲۵۱۷	۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۱۹۵۳	۰/۲۵	۰/۳۰	ANN without wavelet transformation

سامانه استنتاج عصبی فازی (ANFIS) در نظر گرفته شد. فراسنجهای واسنجی شده در مدل نروفازی شامل، تعداد توابع عضویت (MF)، نوع توابع عضویت و مراحل گسسته-سازی توابع مادر موجک.

تبدیل موجک داده‌های ورودی و خروجی و تنها جهت تعیین تعداد لایه پنهان) با مقدار نرون لایه میانی بین ۲ تا ۴ آزمون گردید. نتایج در جدول (۶) آمده‌اند. با توجه به این جدول، ۳ نرون در لایه پنهان منجر به بهترین پاسخ با کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار ضرایب همبستگی (R) و  $R^2_{NS}$  شده است.

جدول ۶- تخمین تعداد نرون‌های لایه پنهان در شبکه عصبی با استفاده از فراسنجهای بررسی عملکرد نرم افزار.

تعداد نرون‌های لایه پنهان	R	R2NS	RMSE
۴	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۱۲۷
۳	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۱۰۴
۲	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۱۴۳

در شکل ۵، گروه زمانی داده‌های استفاده شده و داده‌های شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب و همبستگی بین این داده‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، این داده‌ها قبل از ورود به مدل شبکه عصبی به وسیله ی توابع گفته شده موجک تجزیه و تحلیل گردیدند. چنانکه مشاهده می‌گردد، مقادیر شبیه-سازی شده تغییرات سطح دریا با مقادیر مشاهداتی تطابق نسبتاً خوبی را از خود نشان می‌دهند و شاید ضعیف‌ترین عملکرد مدل زمانی بوده است که از تابع تبدیل موجک Haar جهت گسسته سازی داده‌ها استفاده شده است.

مقدار شاخص‌های عملکرد مدل در جدول (۷) به صورت جداگانه در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده‌اند. در این جدول نتایج کاربرد مدل ANN بدون گسسته سازی داده‌های ورودی و خروجی به‌وسیله توابع

### ۳-۴- مدل سامانه استنتاج عصبی فازی-موجک (DWANFIS)

در دومین مدل پیش‌بینی کننده تغییرات سطح دریا، جهت بهبود عملکرد نرم افزار، داده های پردازش شده بوسیله تبدیل موجک به عنوان ورودی به مدل

در حدود نتایج مدل منتخب DWNN است. نتایج بررسی عملکرد نرم افزارها در جدول (۸) و بصورت جداگانه ارائه شده است. در این جدول نتایج کاربرد ANFIS با تبدیل موجک و بدون تبدیل موجک ارائه شده است. نتایج حکایت از کارایی نرم افزارهایی دارد که در آنها از تبدیل موجک استفاده شده است. بعلاوه نرم افزارهای توسعه یافته روش خوشه‌بندی جزئی عملکرد بهتری نسبت به نرم افزارهای منقطع سازی شبکه‌ای نشان می‌دهند البته عملکرد نرم افزارهایی که از روش منقطع سازی شبکه‌ای استفاده می‌کنند، مشابهت بیشتری به هم دارند ولی در مدل خوشه‌بندی جزئی مدل Coif1 دارای عملکرد ضعیفتری نسبت به دو مدل دیگر بود. در مدل سازی و پیش‌بینی تغییرات سطح آبهای سواحل جنوبی ایران از سه مدل موجک و روش خوشه‌بندی جزئی استفاده شد.

برای توسعه مدل سامانه استنتاج عصبی فازی-موجک در محیط نرم‌افزار MATLAB توابع عضویت trimf, trapmf, gbellmf, gaussmf, gauss2mf, pimf, dsigmf و psigmf به خدمت گرفته شدند. در مطالعه حاضر تابع عضویت gauss2mf به‌عنوان بهترین تابع عضویت که دارای حداقل RMSE در طول مراحل آموزش بود، تعیین شد.

مدل سازی سطح دریا با استفاده از مدل DWANFIS و با استفاده از توابع مختلف موجک صورت گرفت که نتایج همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای هریک از این توابع در شکل ۶ ارائه شده اند. مطابق شکل خروجی مدل شبیه‌سازی مطابقت خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد. مدل ترکیبی حاصل از روش منقطع سازی شبکه‌ای و تابع موجک Haar ضعیف‌ترین نتایج را ارائه داده است که با این حال همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در حدود ۰/۷ (دوره صحت سنجی و اعتبارسنجی) است که

جدول ۸- عملکرد مدل سامانه استنتاج عصبی فازی-موجک برای پیش‌بینی تغییرات سطح دریا در دوره صحت سنجی

و اعتبار سنجی.

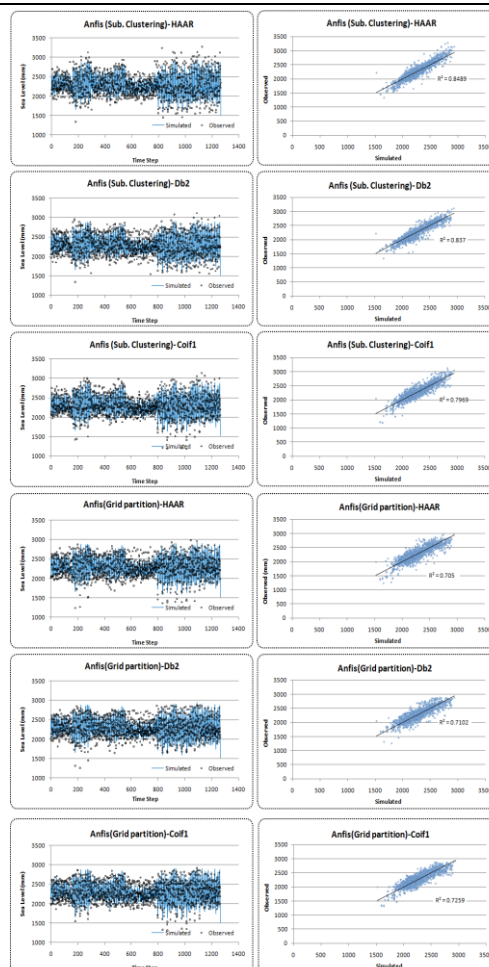
صحت سنجی			اعتبارسنجی			روش استفاده شده مدل نروفازی	تابع موجک
R2	R2NS	RMSE	R2	R2NS	RMSE		
۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۰۳۷۳	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۰۸۸۵	روش خوشه‌بندی جزئی	Haar
۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۰۵۷۳	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۱۰۳۶		Db2
۰/۸۰	۰/۷۴	۰/۰۸۵۴	۰/۷۴	۰/۷۰	۰/۱۰۷۳		Coif1
۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۴۱۷۳	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۳۴۲۸		Without wavelet transformation
۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۱۰۹۲	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۱۳۲۱	روش منقطع سازی شبکه‌ای	Haar
۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۰۹۶۸	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۱۳۰۴		Db2
۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۰۹۰۱	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۱۱۶۹		Coif1
۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۲۵۶۳	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۱۸۸۹		Without wavelet transformation

جدول ۹- برآورد تغییرات سطح آب دریا در ایستگاه‌های مورد بررسی و تحت نمایشنامه ی تغییر اقلیم CGCM3A1b در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی با استفاده از مدل خوشه‌بندی جزئی و تابع موجک Haar.

ایستگاه	مقدار افزایش تراز آب تا سال ۲۱۰۰ میلادی (سانتیمتر)
امام حسن	۴۸/۰
کنگان	۳۶/۰
شهید رجایی	۲۴/۰
چابهار	۲۴/۰
کراچی	۱۶/۰

#### ۴- جمع‌بندی

تخمین صحیحی از تغییرات سطح آب دریا در رویدادهای مختلفی از جمله مهندسی سواحل، کشتیرانی، فعالیت‌های تفریحی و در برنامه توسعه سواحل و بنادر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از مطالعه حاضر ارائه الگوی کاربردی جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر افزایش سطح آب دریا بوده است. در این مطالعه از روش وایازی گام به گام جهت تعیین فراسنجهای اقلیمی که دارای تاثیرگذاری بیشتری در تغییرات سطح آب دریا هستند و انتخاب پیش‌بینی کننده‌های مناسب استفاده شد. سپس جهت مدل سازی ترکیبی از شبکه‌های عصبی-موجک و سامانه نروفازی-موجک استفاده شد. از تبدیل موجک جهت تجزیه داده‌های پیش‌بینی‌شونده و داده‌های پیش-بینی‌کننده بهره‌وری گردید. از داده‌های ورودی که گسسته‌سازی شده بودند به‌عنوان ورودی جهت شبیه-سازی سطح آب دریا استفاده شد. تغییرات سطح آب دریا در سواحل جنوبی ایران با استفاده از داده‌های فشار در سطح آب (SLP)، دمای سطح آب (SST)، ارتفاع ژئوبالکوه (GH) و آب قابل بارش بر سطح دریا (SPW) به-عنوان ورودی در بازه زمانی مشخص و سطح آب دریا در همان بازه زمانی مدل سازی گردیدند. نتایج مدل سازی با کاربرد دو روش DWNN و DWANFIS نشان داد که مدل DWANFIS دارای عملکرد بهتر و دقت بالاتری در مدل سازی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب دریا است. نتایج نرم افزارهای مختلف به کار رفته در نمایشنامه تغییر اقلیم، طیف وسیعی از تغییرات سطح دریا در ایستگاه‌های مختلف را نشان داد که سطح آب دریا از ۴۸



شکل ۶- نتایج مدل سامانه استنتاج عصبی فازی-موجک برای پیش‌بینی تغییرات سطح دریا در دوره صحت سنجی و اعتبار سنجی و ضریب همبستگی متناظر آنها.

#### ۳-۵- الگوی افزایش سطح آب خلیج فارس و دریای عمان

متغیرهای اقلیمی CGCM3، تحت نمایشنامه ی تغییر اقلیم A1b شبیه‌سازی شده و این متغیرها به عنوان ورودی نرم افزارهای منتخب شبیه‌سازی تغییرات تراز آب جهت ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیمی بر تغییرات سطح دریا در ناحیه مطالعاتی در دوره سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ میلادی استفاده شدند. براساس نتایج به‌دست آمده ایستگاه امام حسن، حداکثر تغییرات در میانگین سطح آب دریا را طی صد سال آینده نشان می‌دهد. برای یک نمایشنامه ی اقلیمی و پنج ایستگاه، افزایش‌های سطح آب دریا برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۰۰ با استفاده از مدل‌های منتخب در جدول (۹) نشان داده شده‌اند.

- 7) Armanfar, M., Goharnejad, H., Niri, M.Z. and Perrie, W., 2019. Assessment of coastal vulnerability in Chabahar Bay due to climate change scenarios. *Oceanologia*.
- 8) Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., et al., 2007. Observations: oceanic climate change and sea level. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 387–429.
- 9) Burn, D.H., Cunderlik, J.M., 2004. Hydrological trends and variability in the Laird River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 49 (1), 53–67.
- 10) Cannas, B., Fanni, A., See, L., Sias, G., 2006. Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: wavelet transforms and data partitioning. *Physics and Chemistry of the Earth*. 31 (18), 1164–1171.
- 11) Coulibaly, P., Burn, D.H., 2005. Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. *Journal of Climate*. 18, 191–210.
- 12) Defra, (for CITES policy issues) Trevor Salmon: Trevor.Salmon@defra.gsi.gov.uk
- 13) Goharnejad, H. and Eghbali, A.H., 2015. Forecasting the Sea Level Change in Strait of Hormuz. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(11), pp.1329-1332.
- 14) Goharnejad, H., Shamsai, A. and Hosseini, S.A., 2013. Vulnerability assessment of southern coastal areas of Iran to sea level rise: evaluation of climate change impact. *Oceanologia*, 55(3), pp.611-637.
- 15) Grinsted, A., Moore, J. C. & Jefrejeva, S. *Clim. Dynam.* 34, 461–472 (2009).
- 16) Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J.,

سانتیمتر در منتهی الیه غربی خلیج فارس تا ۱۶ سانتیمتر در شرق دریای عمان تغییر می‌نماید. بنظر می‌رسد میزان تغییرات در آبهای کم عمق و محصور بیشتر از مناطقی باشد که در مجاورت آب‌های آزاد قرار دارند. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با سایر تحقیقات حاکی از تطابق مناسب و همپوشانی نتایج دارد. نتایج ارائه شده برای نمایشنامه ی A1B تغییر اقلیم به وسیله ی IPCC-AR4، IPCC-TAR، روش نیمه تجربی (استفاده از مدل TAR) و روش نیمه تجربی (استفاده از مدل AR4) بترتیب برابر با ۰/۶۹ - ۰/۱۳، ۰/۴۸ - ۰/۲۱، ۰/۸۴ و ۰/۸۸ - ۰/۶۲ است که برای نقاط مختلف دنیا ارائه شده است و با نتایج حاصل از این تحقیق همخوانی دارد.

## منابع

- ۱) اخیانی، محمود، چگینی، وحید و بیدختی، عباسعلی، ۲۰۱۱، مطالعه روند گرمایش زمین با بررسی تغییرات دمای سطحی در خلیج فارس و دریای عمان، دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
- ۲) امیدوار، کمال، خسروی، یونس، ۲۰۰۹، تعیین روند و پیش بینی تغییرات دما و بارش شهر بوشهر، همایش بین المللی خلیج فارس، ۱ و ۲ اردیبهشت: صص. ۸۸ تا ۱۰
- ۳) توکلی، مرضیه، قائدامینی اسدآبادی، حبیب اله و ناظم السادات، سیدمحمدجعفر، ۲۰۱۱، ارزیابی روند نوسانهای دمای پاییزه سطح آب پهنا شمال غرب اقیانوس هند، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور
- ۴) خلیل آبادی، محمدرضا، محمدی، حمید و بیدختی، علی اکبر، ۲۰۰۴، بررسی تغییرات تراز دریا در حوضه شمالی خلیج فارس، ششمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
- 5) Adamowski, J., 2008a. Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis. *Journal of Hydrology* 353, 247–266.
- 6) Adamowski, J., 2008b. River flow forecasting using wavelet and cross-wavelet transform models. *Hydrological Processes*. 22, 4877–4891.



- Study: Voshmgir Dam Basin, Golestan Province. Iran-water resources research, Fall 2018 , Volume 14 , Number 3
- 27) Partal, T., Küçük, M., 2006. Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey). *Physics and Chemistry of the Earth*. 31, 1189–1200.
- 28) Pfeffer, W.T., Harper, J.T., O’Neel, S., 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. *Science* 321(5894), 1340–1343.
- 29) Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810), pp.368-370.
- 30) Toufani, P., Mosaedi, A., Fakheri Fard, A., 2011. Prediction of Precipitation Applying Wavelet Network Model. *Journal of Water and Soil*. Vol. 25, No. 5, 1217-1226.
- 31) Vermeer, M. & Rahmstorf, S. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 106, 21527–21532 (2009).
- 32) Xingang, D., Ping, W., Jifan, C., 2003. Multi-scale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China. *Chinese Science Bulletin* 48, 2730–2734.
- Xiaosu, D. (Eds.), *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 639–693.
- 17) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, UK, 976p.
- 18) Jevrejeva, S., Moore, J. C. & Grinsted, A. *Geophys. Res. Lett.* doi:10.1029/2010GL042947.
- 19) Karamouz, M., Tabesh, M., Nazif, S., Moridi, M., 2005. Estimation of Hydraulic Pressure in Water Networks Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic. *Journal of Water and Wastewater*. No.53, 3–14.
- 20) Karamouz, M., Araghinejad, S., 2010. *Advance Hydrology*. Amir Kabir University Press. 523 p.
- 21) Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London.
- 22) Labat, D., 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology* 314 (1–4), 275–288.
- 23) Liang, S.X., Li, M.C. and Sun, Z.C., 2008. Prediction models for tidal level including strong meteorologic effects using a neural network, *Ocean Engineering*, 35(7), 666-675.
- 24) Lu, R.Y., 2002. Decomposition of interdecadal and interannual components for North China rainfall in rainy season. *Chinese Journal of Atmosphere* 26, 611–624
- 25) Mallat, S., 1998. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press. Elsevier, UK.
- 26) Parisooj, P., Goharnejad, H. and Moazami, S., 2018. Rainfall-Runoff Hydrologic Simulation Using Adjusted Satellite Rainfall Algorithms, a Case