

بررسی تاثیر کاهش اثرات گذرا در روند تعیین سطح متوسط دریاها از داده‌های جهانی جزر و مد بر اساس روش جمع تجمعی و تبدیل موجک پیوسته

خسرو مقتصد آذر^۱، سجاد راثی پارام^{۲*}

^۱استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده عمران - دانشگاه تبریز
moghtased@tabrizu.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی - دانشکده علوم و فنون دریایی - دانشگاه آزاد واحد تهران شمال
srprasi@gmail.com

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۱، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۱)

چکیده

برآورد ترند از سطح متوسط آبها توسط مشاهدات جزر و مد سنج‌ها آلوده به تاثیرات سیستماتیک لحظه‌ای و گذرا ناشی از تغییرات فشار اتمسفر، تاثیرات دهه‌ای یا نیم سالیانه محلی و منطقه‌ای در سطح متوسط دریا می‌باشند. در این تحقیق مدل سازی تاثیرات گذرا و لحظه‌ای سطح دریا با دو روش متفاوت انجام و مورد مقایسه قرار گرفت: (۱) استفاده از روش جمع تجمعی (توام باروش باز نمونه گیری بوت استرپ با مرتب سازی و جایجایی تصادفی از المان‌های سری‌زمانی داده‌های جزرومد به منظور افزایش سطح اطمینان جوابهای حاصل)، (۲) استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته. همچنین، آنالیز عددی حاصل از این مطالعه بروی داده‌های جزرومدسنج دائمی ایستگاه‌های بریج‌پورت (با بازه زمانی ۴۷ سال) و ایستگاه نیویورک (با بازه زمانی ۱۰۶ سال) در امریکا جهت تشخیص این تاثیرات لحظه‌ای در برآورد ترند سطح متوسط دریا استفاده شد. بدلیل داشتن توانائی توابع موجک در آنالیز سیگنال در فرکانس‌های مختلف با توان تفکیک‌های متفاوت و ایجاد یک پنجره انعطاف پذیر زمان - مقیاس، این روش کارائی خاصی در کشف نقاط بحرانی و تاثیرات لحظه‌ای بر روی باقی مانده‌های (مدل ترند) را دارا می‌باشد و به عنوان روشی مناسب در تشخیص و کشف تغییرات ناگهانی در سری‌های زمانی جزر و مد پیشنهاد می‌گردد و نتایج عددی (اندازه بردار باقی‌مانده‌ها و جذر میانگین مربع باقی‌مانده‌ها) نیز نمایشگر بهبود نسبی نتایج هنگام استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته نسبت به روش جمع تجمعی می‌باشد.

واژگان کلیدی: سری‌های زمانی جزر و مد، آنالیز موجک، روش نمودار جمع تجمعی.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

تعیین روند تغییرات سطح متوسط دریا بصورت محلی و جهانی برای مطالعه تغییرات جوی مهم می باشد. به گزارش انجمن تغییرات آب و هوایی، سطح متوسط آبها از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۳ با سرعت متوسط ۱/۸ میلی‌متر در سال و از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ با سرعت ۳/۱ میلی‌متر در سال افزایش می‌یابد با این احتساب تخمین زده می‌شود که سطح آنها ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر تا سال ۲۰۷۰ افزایش یابد [۱۲، ۱۴].

تعیین روند تغییرات سطح آبهای جهان در اثر گرم شدن جهانی زمین و خطر زیر آب رفتن مناطق ساحلی و جزایر لزوم آگاهی از روند این تغییرات را در ارتباط با پیشگیری سوانح طبیعی روشن می‌سازد و بهترین معیار برای این منظور می‌تواند نرخ تغییرات سطح متوسط دریا باشد. درحال حاضر بیش از ۱۸۰۰ ایستگاه جزر و مد سنج در دنیا داریم که اطلاعات آنها از طریق سایت

(PSMSL)^۱ واقع در بیدستون انگلیس (<http://www.psmsl.org/>) قابل دسترس میباشند. این سایت حاوی داده‌های ماهیانه و سالیانه از پایگاه‌های موجود در ۲۰۰ کشور مختلف جهان می باشد که همگی آنها نسبت به یک دیتوم مشترک اصلاح شده‌اند.

در مطالعات سطح متوسط دریا قابل دسترس بودن مدت زمان لازم برای نمونه برداری تغییرات سطح دریا در اکثر ایستگاه‌ها مورد نیاز میباشد ولی کمتر از ده درصد از جزرومد سنج‌های موجود در دنیا هستند که بیشتر از ۱۰۰ سال داده دارند زیرا هریک از آنها دارای محدودیت‌ها و شرایط خاصی می باشند. در صورت استفاده از داده‌های جزر و مد سنج برای تعیین ترند سطح متوسط دریا^۲ (از داده‌های کوتاه مدت) برآورد ترند تحت تاثیر تغییرات لحظه‌ای^۳ مدل نشده‌ای از قبیل تغییرات فشار اتمسفر، تاثیرات دهه‌ای یا نیم سالیانه محلی و منطقه‌ای در سطح متوسط دریا خواهد بود که نمی‌توان تاثیرات آنها را به راحتی حذف یا کاهش داد [۷].

بعضی از این تغییرات لحظه‌ای شامل یک بخش پریودیک می‌باشند از جمله این تغییرات می توان به موارد زیر اشاره کرد: تغییرات فشار هوا، تغییرات محلی و منطقه‌ای دمای هوا، تغییرات سالیانه و دهه‌ای در جریانات اقیانوسی تحت تاثیر باد، تغییرات بخشی از سطح دریا تحت تاثیر جریان دریائی ایدی^۴، تغییرات دما و شوری اقیانوس، ذوب شدن یخ‌ها و تخلیه رودخانه‌ها، تغییرات و حرکات تکتونیکی زمین، حرکت قائم پوسته زمین، تغییراتی ناشی از جابجایی دستگاه و غیره. پاسخ جزرومدی به تغییرات لحظه‌ای را می توان با افزودن اطلاعات جزرومدی اضافی مانند تغییرات فشار مدل سازی نمود اما بدست آوردن این نوع اطلاعات برای سری‌های زمانی بلند مدت کار بسیار مشکلی می‌باشد. درسال‌های اخیر مطالعات زیادی درآنالیز ترند سری‌های زمانی جزرومد سنج صورت گرفته است [۵، ۲، ۷، ۸، ۱۲].

ایز در سال ۲۰۰۶ تاثیر تاثیرات سیستماتیک در برآورد ترند سطح متوسط دریا را به عنوان تابعی از طول سری زمانی (داده‌های جزر و مد) بدست آورد و نشان داد که در صورت عدم حذف تغییرات لحظه‌ای و زودگذر از روی سری‌های زمانی (با طول زمانی کمتر از ۵۰ سال)، مقدار اریبی^۵ ۰/۶ میلی متر در سال در برآورد ترند آنها باقی خواهد ماند [۷]. سپس، ایز و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش جمع تجمعی^۶ اقدام به کشف وجود اثرات سیستماتیک گذرا و لحظه‌ای بر روی دو ایستگاه بریج‌پورت و ایستگاه نیویورک (هر دو با بازه زمانی ۳۳ سال بین سالهای ۱۹۶۱-۱۹۵۸ میلادی) در امریکا کردند و بعد از حذف اثرات گذرا و لحظه‌ای از آنها بروش جمع تجمعی، مقدار RMS را (برای باقی مانده مربوط به برآورد ترند سطح متوسط آب در آنها) بترتیب ۴۸/۵ میلیمتر و ۵۸/۳ میلی متر بدست آوردند. سپس محاسبات خود را در مورد ۱۸۶۲ تعداد جزر و مد سنج دائمی دیگر (موجود در جهان) تکرار کردند و نتیجه محاسبات نشان دهنده وجود تاثیرات لحظه‌ای و گذرا در مورد ۱۲۶۲ ایستگاه (از تعداد کل ایستگاه‌های جزر و مد) بود [۸].

^۴ Oceanic Eddy

^۵ Biase

^۶ Cumulative Sum Control Chart (CUSUM)

^۱ Permanet Service Mean Sea Level

^۲ Mean Sea Level

^۳ Transient Effect

در رابطه فوق t_i زمان مشاهداتی جزر و مد و $\bar{t}$ متوسط زمان داده های مشاهداتی، M تعداد کل مولفه های جزر و مدی، ضرائب α_h و γ_h دامنه مولفه های پریودیک، P_h حاوی پریود های نیمه سالیانه و سالیانه و نودال^۱ (۱۸/۶ ساله) می باشد و همچنین e_t خطای تصادفی $\text{var}(e_t) = \sigma^2$ ، $E(e_t) = 0$ می باشد. با فرض این که خطاها پیوسته نبوده و وابستگی ایستایی نسبت به زمان ندارند، پارامترهای مجهول در فرمول (۱) را می توان با استفاده از مشاهدات جزرومد و روش های کمترین بدست آورد. بنابر این وجود هر گونه اثرات سیستماتیک لحظه ای و گذرا در مدل می تواند برآورد ما را از مجهولات تحت تاثیر قرار دهد.

برای محاسبات عددی در این تحقیق، از سری های زمانی جزرومد سنج مربوط به ایستگاه های بریج پورت^۲ و نیویورک استفاده شده است که حاوی اطلاعات بلند مدتی برای ایستگاه بریج پورت از سال ۱۹۶۴ تا ۲۰۱۰ (۴۶ سال) و ایستگاه نیویورک از سال ۱۹۰۴ تا ۲۰۱۰ (۱۰۶ سال) با نمونه برداری های ماهانه می باشد (<http://www.psmsl.org/>). در شکل ۱ موقعیت ایستگاه ها و در شکل های ۲ و ۳ سری های زمانی مربوط به ایستگاه ها به ترتیب نمایش داده شده است.

همچنین، نرم بردار باقی مانده های حاصل از سرشکنی، پس از برداشتن اثر مولفه های سالیانه و نیمه سالیانه و مولفه نودال ماه، برای ایستگاه جزرومد بریج پورت ۱۸۳۷/۲۴ میلی متر مربع و برای ایستگاه نیویورک ۳۷۵۵/۹۸ میلی متر مربع می باشد (شکل های ۴ و ۵). هر چند که امکان آلودگی مقادیر باقی مانده سری های زمانی جزرومد سنج مربوط به ایستگاه های بریج پورت و نیویورک (در شکل های ۴ و ۵) به تغییرات لحظه ای وجود دارد که در ادامه با استفاده از نمودار جمع تجمعی به بررسی و امکان کشف این تغییرات می پردازیم.

هدف از این مقاله مقایسه کارائی دو روش جمع تجمعی و تبدیل موجک پیوسته در تشخیص و حذف تغییرات لحظه ای و گذرا با استفاده از میانگین مجذور خطا و نرم باقی مانده مشاهدات جزر و مد در برآورد ترند حاصل از دو روش می باشد. در این مقاله ابتدا مدل سازی داده های جزر و مد را مرور می کنیم و سپس تئوری جمع تجمعی را بیان کرده و در ادامه از این روش برای کشف اثرات سیستماتیک لحظه ای و گذرا در دو ایستگاه بریج پورت (با بازه زمانی ۴۷ سال) و ایستگاه نیویورک (با بازه زمانی ۱۰۶ سال) استفاده می کنیم.

از آنجایی که تبدیل موجک دارای توانایی های منحصر به فردی در آنالیز سری های زمانی در حوزه زمان-فرکانس را دارا می باشد و بدلیل داشتن توانائی توابع موجک در آنالیز سیگنال در فرکانس های مختلف با توان تفکیک های متفاوت و ایجاد یک پنجره انعطاف پذیر زمان - مقیاس، این روش کارائی خاصی را در کشف نقاط بحرانی و تاثیرات لحظه ای بر روی مشاهدات می تواند داشته باشد [۱۱].

لذا بعد از مروری مختصر بر تئوری تبدیل موجک پیوسته، از این روش نیز در کشف نقاط بحرانی اثرات سیستماتیک لحظه ای و گذرا در دو ایستگاه بریج پورت (با بازه زمانی ۴۷ سال) و ایستگاه نیویورک (با بازه زمانی ۱۰۶ سال) استفاده شد و نتایج حاصل از برآورد ترند در دو روش با دو معیار اندازه بردار باقی مانده ها و جذر میانگین مربع باقی مانده ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج عددی نمایشگر بهبود نسبی نتایج هنگام استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته نسبت به روش جمع تجمعی می باشد.

۲- مدل سازی داده های جزر و مدسنج ها

از آنجاییکه پدیده جزرومد دارای رفتارمتناوب می باشد بنابراین به منظور مدلسازی آن از روش آنالیز هارمونیک استفاده می شود [۸]:

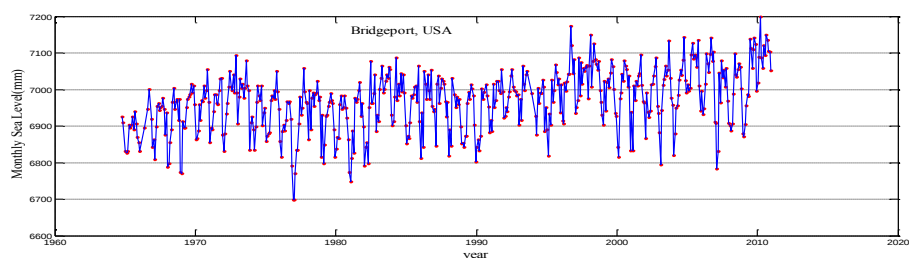
$$y_i = \alpha + \beta(t_i - \bar{t}) + \sum_{h=1}^M [\alpha_h \cos(\frac{2\pi}{P_h}(t_i - \bar{t})) + \gamma_h \sin(\frac{2\pi}{P_h}(t_i - \bar{t}))] + e_t \quad (1)$$

^۱ Nodal

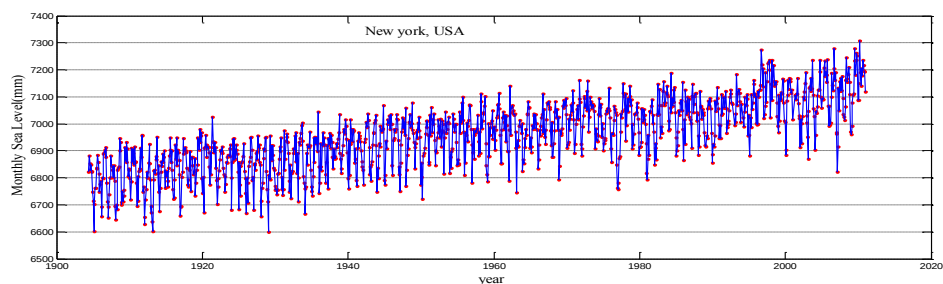
^۲ Bridgeport



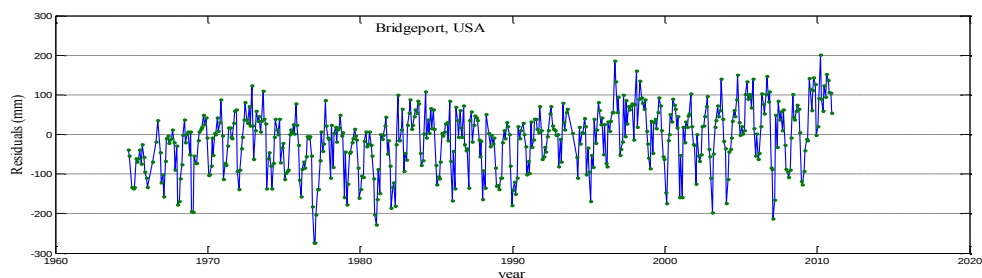
شکل ۱- موقعیت ایستگاه های جزرومدسنج آنالیز شده.



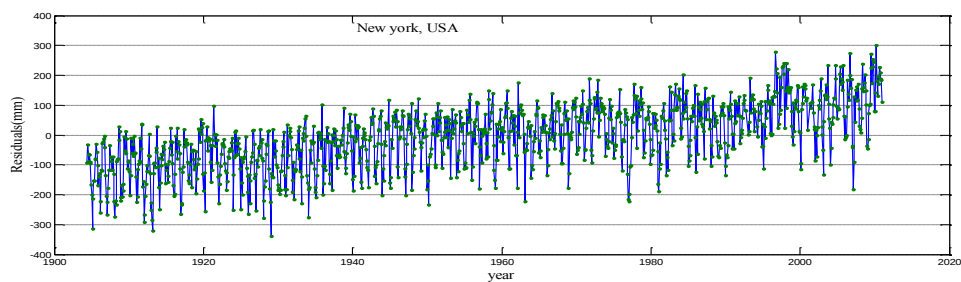
شکل ۲- مشاهدات ماهانه ایستگاه جزر و مد سنج ایستگاه بریج پورت.



شکل ۳- مشاهدات ماهانه ایستگاه جزر و مد سنج ایستگاه نیویورک.



شکل ۴- باقیمانده سری زمانی جزرومد ایستگاه بریج پورت پس از برداشتن اثر مولفه های سالیانه و نیمه سالیانه و مولفه نودال ماه



شکل ۵- باقیمانده سری زمانی جزرومد ایستگاه نیویورک پس از برداشتن اثر مولفه های سالیانه و نیمه سالیانه و مولفه نودال ماه.

۳- کشف و مدلسازی تغییرات لحظه‌ای در باقیمانده سری‌های زمانی جزرومد با استفاده از روش مجموع فزاینده

در کنترل کیفیت آماری نمودار جمع تجمعی تکنیک تجزیه و تحلیل دنباله ای از داده ها می باشد که برای کشف هر گونه تغییر در توزیع احتمال فرآیند تصادفی داده های یک سری زمانی مورد استفاده وسیع در علوم مختلف قرار می گیرد [۴، ۶، ۱۰]. در نمودار جمع تجمعی با استفاده از سری زمانی $X_1, X_2, \dots, X_n$ می-توان جمع تجمعی $S_0, S_1, \dots, S_n$ را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$S_i = S_{i-1} + (X_i - \bar{X}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

که در آن:

$$S_0 = 0, \quad \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (3)$$

اگر تغییری در مقدار میانگین داده ها رخ ندهد نمودار جمع تجمعی نمایشگر یک خط راست خواهد بود. اگر میانگین فرآیند به مقداری بیشتر از میانگین داده ها تغییر یابد، آنگاه میزان آماره های ترسیم شده روی نمودار یک روند تدریجی مثبت خواهد داشت و اگر میانگین داده ها به مقداری کمتر از میانگین داده ها تغییر یابد، روند ذکر شده منفی و آماره ها دارای شیب منفی خواهد بود. بنابراین، یک تغییر اتفاقی S_{diff} در شیب نمودار توأم با یک تغییر اتفاقی در مقدار میانگین می باشد که مقدار این تغییر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_{diff} = \max S_i - \min S_i \quad (4)$$

برای پاسخ به این سوال که با چه اطمینانی می‌توان نتیجه گرفت که یک تغییر در مقدار میانگین اتفاق افتاده است از روش باز نمونه گیری بوت استرپ^۱ با مرتب سازی و جابجایی تصادفی المان‌های سری زمانی استفاده

می کنیم [۳]. S_{diff} محاسبه شده برای تعداد زیادی از داده های بوت استرپ شده وقتی با $S_{diff}^{original}$ داده های اصلی مقایسه شود به صفر و یا مقدار متوسط داده ها میل خواهد کرد. اگر تعداد کل بوت استرپ ها را N و تعداد بوت استرپ هائی که در شرط $S_{diff} < S_{diff}^{original}$ صدق می کنند را p بنامیم سطح اطمینان از رابطه زیر قابل حصول است:

$$\text{Confidence level} = 100 \times \frac{p}{N} \quad (5)$$

وقتی که تغییری در طول سری زمانی رخ می‌دهد نیاز به دانستن موقعیت این تغییر داریم که با استفاده از عبارت زیر بدست می‌آید:

$$s_m = \max_{i=1, \dots, n} |s_i| \quad (6)$$

در رابطه فوق s_m بیشترین فاصله از صفر را در نمودار جمع تجمعی دارد. m امین داده همان آخرین داده قبل از تغییر بوده و $m+1$ امین داده، اولین داده بعد از تغییر می‌باشد. این روش در برابر تغییرات بزرگ و مشاهدات اشتباه^۲ در سری‌های زمانی روشی کارآمد می-باشد [۸، ۱۰].

شکل ۶ نمایشگر نتیجه آنالیز روش جمع تجمعی بر روی باقیمانده های حاصل از رابطه ۱ بروی ایستگاه‌های جزرومدی بریج پورت و نیویورک می باشد و متعاقباً در جدول‌های ۱ و ۲ نتایج عددی آنها آورده شده است که در هر یک از آنها از ۱۰۰۰ بار روش باز نمونه گیری استفاده شده است. ستون اول، در این جداول، نشانگر شماره نقاطی از سری زمانی جزرومدی می‌باشد که در آنها تغییرات گذرا و لحظه ای اتفاق افتاده است، ستون دوم مربوط به فواصل اطمینان برآورد شده برای تغییر کشف شده می باشد، ستون سوم، سطح اطمینان تغییری که در این فواصل اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد. ستون چهارم مقدار سری زمانی قبل از تغییر لحظه‌ای کشف شده و ستون پنجم مقدار سری زمانی بعد از تغییر لحظه‌ای کشف شده را در اختیار می‌گذارد که با استفاده

^۲ Outlier

^۱ Bootstrap Resampling

از این اطلاعات می‌توان مقدار شروع و پایان هر بازه‌ای از تغییرات را بدست آورد و ستون آخر که با عنوان سطح مشخص شده اهمیت تغییر رخ داده را نشان می‌دهد.

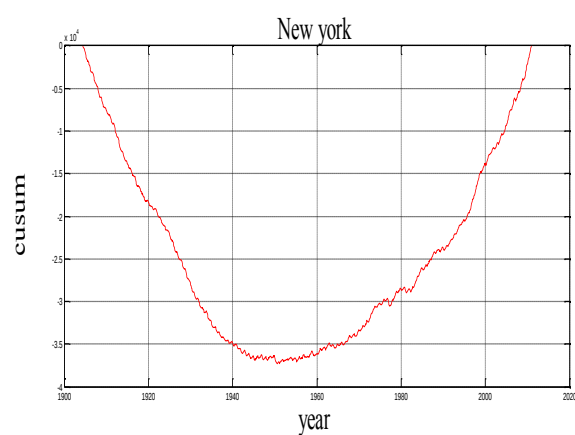
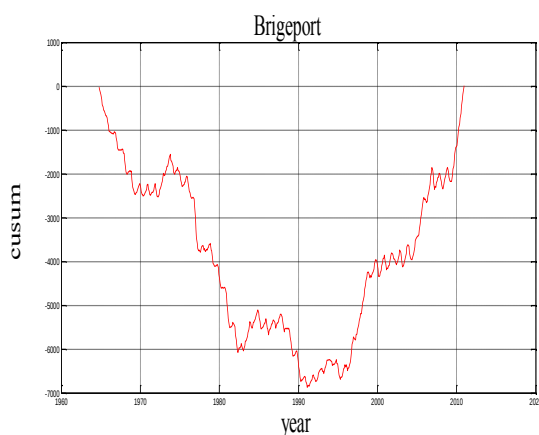
برای ایستگاه جزر و مدی بریج پورت با طول سری زمانی ۴۶ سال، ۱۱ نقطه بحرانی (با سطح اطمینان مساوی یا بالاتر از ۹۹٪) بدست می‌آید و برای ایستگاه جزر و مد نیویورک با طول سری زمانی ۱۰۶ سال، ۹ نقطه بحرانی (با سطح اطمینان مساوی یا بالاتر از ۹۹٪) بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود ایستگاه جزرومدی بریج پورت با داشتن طول سری زمانی کوتاه‌تری نسبت به ایستگاه جزرومدی نیویورک دارای تغییرات ناگهانی زیادتری می‌باشد.

تغییرات لحظه‌ای اگر بخوبی شناخته شوند و با پردازش دوباره و استفاده از اطلاعات اضافی دیگری مانند تغییرات فشار به راحتی می‌توان آنها را حذف کرد در غیر این صورت این تغییرات می‌تواند بدون اضافه کردن اطلاعات جدید و بدون شناخته شدن منبع آنها با استفاده از مدل دیگری استخراش شده و حذف

می‌گردد. برای این منظور متغیر باینری^۱ را در رابطه ۱ اضافه می‌کنیم بطوری که:

$$y_t = \alpha + \sum_{i=1}^n \Delta \alpha_i^i \delta + \beta(t - \bar{t}) + \sum_{h=1}^M (\alpha_h \cos(\frac{2\pi}{P_h}(t - \bar{t})) + \gamma_h \sin(\frac{2\pi}{P_h}(t - \bar{t}))) + e_t \quad (7)$$

در رابطه فوق δ مقدار متغیر باینری می‌باشد که اگر تغییری در مقدار باقی مانده‌های مشاهدات نباشد مقدار آن صفر و اگر تغییری در باقی مانده‌های بدست آمده از مدل دوم به همراه روش جمع تجمعی باشد مقدار آن یک خواهد بود. اگر تعداد کل نقاط تغییر یافته را با n نشان دهیم $\Delta \alpha_i^i$ میزان تغییر سطح متوسط دریا نسبت به تغییر قبلی سطح متوسط دریا برای i امین تغییر در اپک زمانی t می‌باشد [۸].



شکل ۶- نمودار جمع تجمعی باقی مانده‌های مشاهدات (حاصل از رابطه ۱) ایستگاه‌های جزرومدی بریج پورت و نیویورک.

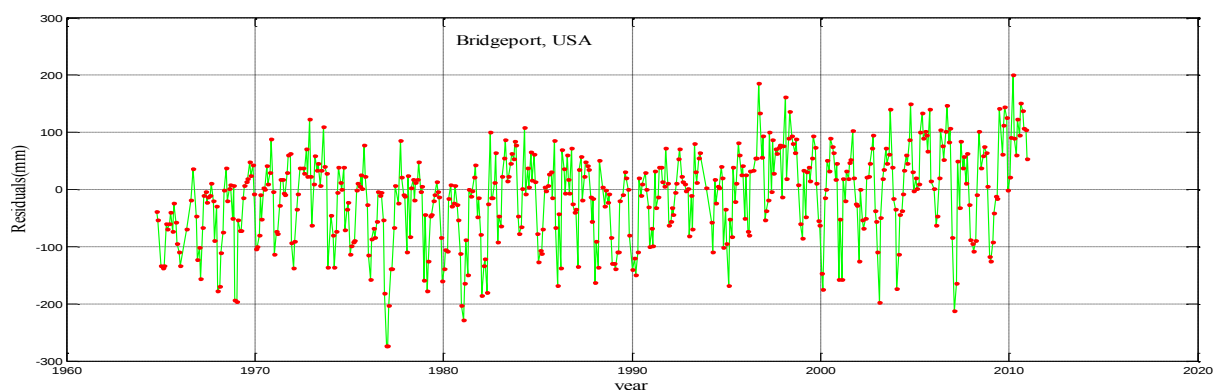
شیفت میانگین (جدول ۲) دارا می‌باشند. پس از حذف تغییرات لحظه‌ای فوق‌الذکر از روی مشاهدات، نرم بردار باقی مانده مشاهدات برای ایستگاه بریج پورت ۱۸۱۷/۸۲ میلی‌متر مربع و برای ایستگاه نیویورک ۱۰/۳۷۴۶ میلی‌متر مربع بدست می‌آید که در مقایسه با نتایج عددی بدست آمده هنگام استفاده از رابطه (۱) (۳۷۵۵/۹۸ و ۱۸۳۷/۲۴) میلی‌متر مربع برای بریج پورت و

برای حذف تغییرات لحظه‌ای کشف شده در باقی مانده سری‌های زمانی مشاهدات جزر و مد، مدل فوق (رابطه ۷) مجدداً در تعیین پارامترهای مجهول استفاده می‌شود که در آن ایستگاه بریج پورت دارای ۱۱ تغییر با حداقل درصد اطمینان ۹۹٪ در پارامتر شیفت میانگین (جدول ۱) و ایستگاه نیویورک دارای ۹ تغییر در شیفت میانگین با حداقل درصد اطمینان ۹۹٪ در پارامتر

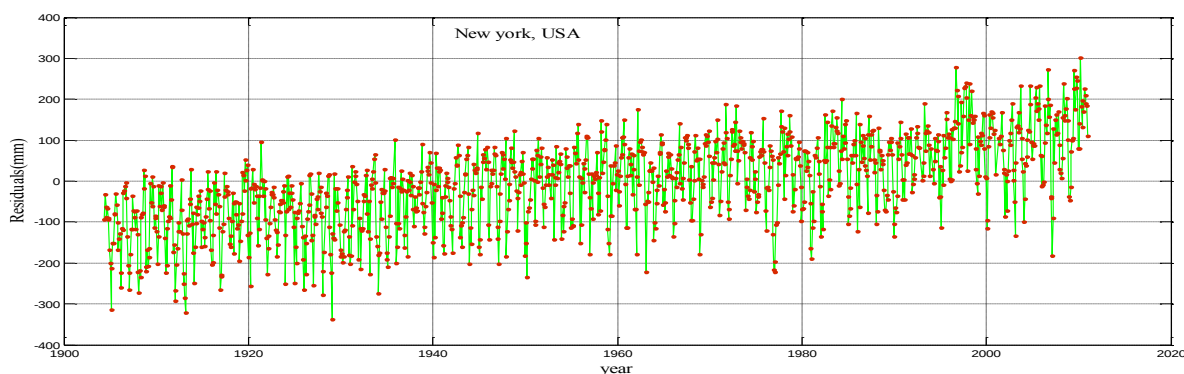
^۱ Binary Variable

برداشتن تغییرات لحظه ای در میانگین آنها با درصد اطمینان ۹۹٪ در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

میلی متر مربع برای ایستگاه نیویورک) کاهش یافته اند. باقی مانده های حاصل از سرشکنی مشاهدات پس از



شکل ۷- باقی مانده مشاهدات جزرومدی ایستگاه بریج پورت از مدل رابطه (۷).



شکل ۸- باقی مانده سری زمانی جزرومد ایستگاه نیویورک از مدل رابطه (۷).

تبدیل فوری، تبدیل فوری، تبدیل فوری زمان کوتاه) این قابلیت را ندارند. این تبدیل برخلاف تبدیل فوری قادر به بیان همزمان سیگنال در دو فضای فرکانس و زمان می باشد، و به خاطر آنالیز چندریزه سازی بودن تبدیل موجک، این روش مشکل تعیین تابع پنجره در تبدیل فوری زمان کوتاه را دارا نیست [۹].

موجکها دارای تنوع و روش های ریاضی متفاوتی جهت آنالیز داده ها می باشند. توانایی که از آنالیز در حوزه زمان فرکانس بدست می آید دلیلی بر گسترده استفاده از این روش می باشد. تبدیل موجک پیوسته^۱ به عنوان روشی جایگزین بر تبدیل فوری زمان کوتاه ارائه گردید و هدف آن فائق آمدن بر مشکلات مربوط به تفکیک پذیری در تبدیل فوری زمان کوتاه است. در آنالیز موجک مشابه با تبدیل فوری زمان کوتاه سیگنال مورد نظر در یک تابع

۴- کشف و مدل سازی تغییرات لحظه ای در باقیمانده سری های زمانی جزرومد با استفاده از آنالیز موجک

از آنجایی که محتوای فرکانسی و زمانی سری های زمانی به عنوان خصیصه های آن سری زمانی تعریف می شوند نمی توان هم تفکیک زمانی و هم تفکیک فرکانسی بالایی را بدست آورد. در آنالیز فوری، توان تفکیک فرکانسی بالایی داریم (دلتای دیراک در حوزه فرکانسی داریم) ولی توان تفکیک زمانی نداریم، یعنی تبدیل فوری اطلاعاتی از محتوای فرکانسی مولفه های سیگنال می دهد که زمان وقوع این مولفه های فرکانسی را نمی توان تعیین کرد از این رو تبدیل موجک دارای توانایی های منحصر به فردی در مشخصه سازی جنبه های مختلف داده ها دارد که دیگر روش های تحلیل سیگنال ها (نظیر

^۱ Continous Wavelet Transform (CWT)

(موجک) ضرب می‌شود که در حقیقت نقش همان تابع پنجره را دارد. در تبدیل موجک عرض پنجره به موازات تغییر مؤلفه های فرکانسی تغییر می‌کند که مهمترین ویژگی تبدیل موجک است. برای پارامترهای مقیاس (معکوس فرکانس) a و انتقال b ، تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{CWT}\{x(t); a, b\} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

$$= \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$$

که در آن $x(t)$ سیگنال (به عنوان تابعی از زمان) و $\langle \cdot \rangle$ نمایشگر ضرب داخلی میباشد. پارامتر انتقال میزان جابجایی پنجره را معلوم میکند و به وضوح اطلاعات زمانی تبدیل را در بردارد. مقیاس کردن (به عنوان یک اپراتور ریاضی) سیگنال را منقبض یا منبسط میکند بطوریکه در مقیاس های بالا که سیگنال منبسط می شود، جزئیات سیگنال (رفتار کوتاه مدت) را نمایش می دهد و در مقیاس های پائین که سیگنال منقبض می شود، محتوای کلی (رفتار بلند مدت) را خواهیم داشت. با توجه به اینکه متغیر مقیاس در مخرج کسر رابطه فوق ظاهر شده است، به ازای $b > 1$ سیگنال منبسط شده و به ازای $b < 1$ سیگنال منقبض می گردد و به ترتیب رفتار بلند مدت و کوتاه مدت سری زمانی مورد توجه قرار می گیرد [۱۱].

رابطه ۸ نمایشگر مفهوم واضحی از ضرب داخلی (یا کورولیشن متقاطع) از سیگنال $x(t)$ و تابع $\sqrt{|a|} \psi^*((t-b)/a)$ می باشد، یا به عبارتی اندازه گیری میزان شباهت سیگنال با تابع موجک (انتقال یافته و تغییر مقیاس یافته می باشد) که در آن ψ تابع پنجره (موجک مادر)^۱ نیز نامیده می‌شود. تمامی نسخه های انتقال یافته و مقیاس شده همگی از روی این تابع بدست می‌آیند و یک تابع الگو جهت تولید سایر پنجره ها می‌باشد. از انواع موجکهای مادر می توان به موجک میر^۲، سیملت^۳، دابچیز^۴، مورلت^۵، هار^۶ و کلاه مکزیکی^۷

اشاره کرد. بسته به شکل سیگنال ورودی می‌توان موجک مادر متناسب با آن را انتخاب کرد [۹].

به عبارتی CWT به عنوان یک فیلتر میان گذر^۸ عمل میکند. ضرائب CWT در مقیاسهای پائین انرژی سیگنال را فرکانسهای بالا نمایش میدهد و در مقیاسهای بالا انرژی سیگنال را در فرکانسهای پائین بیان می کند که در آن پهنای باند فیلتر نسبت عکس با مقیاس دارد و با کاهش عرض پهنای باند مقیاس افزایش می‌یابد. حال با فرض تغییر متغیر $\tilde{\psi}_a(t) = \psi^*(-t/a) / \sqrt{|a|}$ فرمول ۸ را می‌توان بفرم کانولوشن دو

$$\text{CWT} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_a^*(b-t) dt = (x * \tilde{\psi}_a)(b)$$

تابع x و $\tilde{\psi}_a$ نوشت. برای اعمال تغییر در نسخه گسسته سازی شده فرمول CWT، فرض می کنیم طول سیگنال ورودی N باشد. در آن صورت CWT برای یک سیگنال گسسته از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱، ۱۳]:

$$W_a[b] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \tilde{\psi}_a[b-n] \quad (9)$$

که توسط آن CWT را بر حسب کانولوشن $x[n]$ و $\tilde{\psi}_a[b-n]$ (بر اساس مقادیر مختلف a و b) می توان محاسبه کرد. با بدست آوردن انرژی ضرایب موجک مستخرج از تبدیل موجک پیوسته (محاسبه نرم L_2 از ضرائب CWT در رابطه (۹)) سیگنالهای جزر و مد برای باقی مانده مشاهدات (حاصل از رابطه ۱) نمودارهای مقیاس نگار^۹ بدست می آید (شکل‌های ۹ و ۱۰). منحنی‌های کوچکتر که به ترتیب در بازه های زمانی خاصی تکرار شده‌اند نشان دهنده‌ی رفتارها و تاثیرات کوتاه مدت و پریودیک می‌باشند که می‌تواند مولفه‌ای از تاثیرات فصلی باشد که بصورت پریودهای ۸ تا ۹ ماهه بصورت متغیر تکرار شده‌اند. اما منحنی‌های بزرگتر که در بعضی نقاط بصورت قرمز بوده و دارای مقادیر بزرگتری می باشند نشان دهنده‌ی رفتارها و

^۰ Morlet

^۶ Haar

^۷ Mexican Hat

^۸ Bandpass-Filter

^۹ Scalogram

^۱ Mother Wavelet

^۲ Meyer

^۳ Symlet

^۴ Daubechies

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل سازی تاثیرات گذرا و لحظه ای سطح دریا با دو روش متفاوت انجام گرفت: (۱) استفاده از روش جمع تجمعی (توأم باروش باز نمونه گیری بوت - استرپ با مرتب سازی و جابجایی تصادفی از المان های سری زمانی داده های جزر و مد به منظور افزایش سطح اطمینان جواب های حاصل)، (۲) استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته. آنالیز عددی حاصل از این مطالعه بروی داده های جزر و مدسنج دائمی ایستگاه های بریج پورت (با بازه زمانی ۴۷ سال) و ایستگاه نیویورک (با بازه زمانی ۱۰۶ سال) در امریکا جهت تشخیص این تاثیرات لحظه ای در برآورد ترند سطح متوسط دریا استفاده شد. نتایج حاصل از سرشکنی (در برآورد ترند حاصل از دو روش) با دو معیار اندازه بردار باقی مانده ها و جذر میانگین مربع باقی مانده ها مورد بررسی قرار گرفت. بدلیل داشتن توانائی توابع موجک در آنالیز سیگنال در فرکانس های مختلف با توان تفکیک های متفاوت و ایجاد یک پنجره انعطاف پذیر زمان - مقیاس، این روش کارائی خاصی در کشف نقاط بحرانی و تاثیرات لحظه ای بر روی باقی مانده های (مدل ترند) را دارا می باشد. نتایج عددی نمایشگر بهبود نسبی نتایج هنگام استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته نسبت به روش جمع تجمعی می باشد.

تاثیرات بلند مدتی در بازه های زمانی ۹ تا ۱۰ ساله می باشد که بصورت دوره ای و متغیر تکرار شده اند.

در جدول ۳ نتایج آنالیز عددی از سری های زمانی بریج پورت و نیویورک با استفاده از آنالیز موجک پیوسته ارائه شده است. در این جدول ستون اول نقاطی از سری زمانی می باشد که توسط ضرایب موجک پیوسته کشف شده اند و دارای تاثیرات لحظه ای در برآورد ترند سطح دریا می باشند، ستون دوم مربوط به بازه زمانی است که تاثیرات لحظه ای در فاصله بین آنها اتفاق می افتد، ستون سوم مقدار سری زمانی قبل از تغییر لحظه ای کشف شده و ستون چهارم مقدار سری زمانی بعد از تغییر لحظه ای کشف شده را در اختیار می گذارد که با استفاده از این اطلاعات می توان مقدار شروع و پایان بازه تغییرات را بدست آورد. برای مقایسه کارائی دو روش جمع تجمعی و تبدیل موجک در کاهش تاثیر اثرات گذرا و لحظه ای در برآورد ترند سطح متوسط دریا ها، در جدول ۴ نتایج حاصل از دو روش ارائه شده است. همانطور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده، نتایج حاصل از آنالیز موجک پیوسته بعد از حذف آثار گذرا و لحظه ای توسط موجک حاکی از بهبود یافتن نتایج در محاسبه نرم باقی مانده ها و مجذور میانگین مربع^۱ مقادیر باقی مانده ها در روش تبدیل موجک نسبت به روش جمع تجمعی می باشد.

^۱ Root Mean Square

جدول ۱- جدول نتیجه‌ی آنالیز تشخیص تغییر نقطه برای ایستگاه جزرومدی بریج پورت به همراه در صد احتمال تغییر نقاط

Table of Significant Changes for Column B

Confidence Level for Candidate Changes = 50%, Confidence Level for Inclusion in Table = 90%, Confidence Interval = 95%,
Bootstraps = 1000, With Replacement, CUSUM Estimates

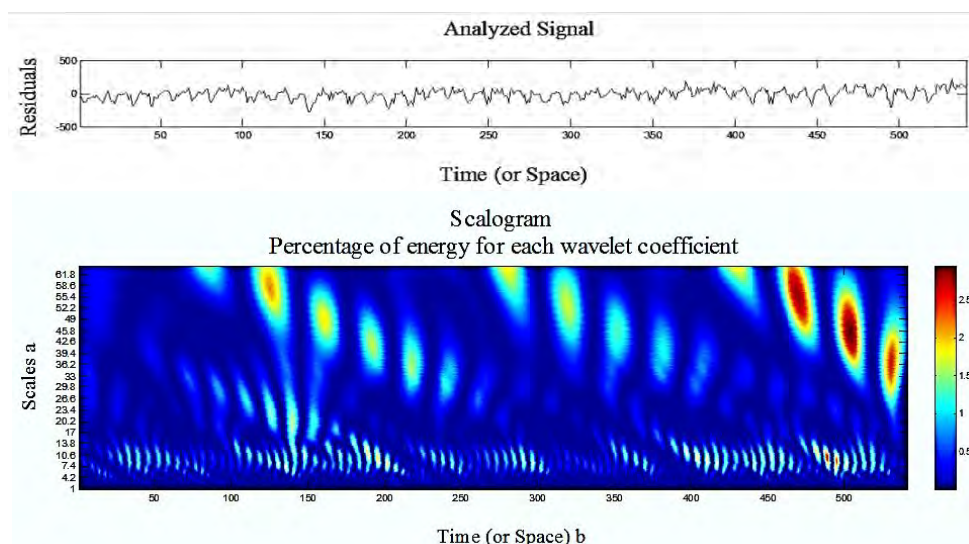
Row	Confidence Interval	Conf. Level	From	To	Level
25	(15, 25)	91%	-76.889	-10.01	5
32	(32, 34)	96%	-10.01	-108.81	9
38	(36, 39)	96%	-108.81	-2.7029	10
45	(44, 46)	90%	-2.7029	-117.75	6
50	(50, 73)	96%	-117.75	-14.846	7
86	(71, 88)	99%	-14.846	40.28	6
104	(101, 104)	99%	40.28	-88.768	8
110	(109, 110)	95%	-88.768	16.678	9
115	(115, 117)	97%	16.678	-74.507	9
122	(121, 123)	98%	-74.507	14.761	12
130	(130, 130)	98%	14.761	-102.41	3
135	(134, 136)	92%	-102.41	-26.128	6
140	(140, 142)	96%	-26.128	-182.54	8
147	(147, 149)	100%	-182.54	-3.3613	8
165	(156, 170)	93%	-3.3613	-57.303	13
176	(168, 176)	98%	-57.303	-119.36	13
181	(181, 181)	98%	-119.36	-19.462	9
188	(188, 188)	98%	-19.462	-157.5	10
194	(194, 194)	98%	-157.5	-1.7261	7
201	(201, 212)	98%	-1.7261	-56.115	6
215	(210, 219)	97%	-56.115	28.813	2
237	(230, 237)	98%	28.813	-98.682	9
242	(242, 267)	95%	-98.682	-15.081	10
277	(250, 281)	92%	-15.081	-59.161	8
289	(281, 289)	100%	-59.161	5.3443	7
295	(295, 304)	99%	5.3443	-68.664	8
310	(307, 336)	95%	-68.664	-6.3098	4
366	(354, 369)	100%	-6.3098	60.989	9
396	(389, 400)	99%	60.989	-17.42	10
414	(402, 414)	95%	-17.42	46.87	5
422	(421, 439)	93%	46.87	-8.3164	4
445	(427, 445)	96%	-8.3164	-90.051	2
450	(450, 450)	98%	-90.051	58.821	9
457	(457, 458)	98%	58.821	-61.2	10
464	(464, 468)	98%	-61.2	68.39	7
481	(470, 490)	99%	68.39	41.702	12
494	(490, 494)	99%	41.702	-137.27	7
498	(498, 499)	96%	-137.27	38.308	7
505	(504, 506)	98%	38.308	-69.538	10
511	(511, 511)	99%	-69.538	55.187	12
518	(517, 518)	94%	55.187	-67.54	8
524	(524, 527)	99%	-67.54	101.61	8

جدول ۲- نتیجه‌ی آنالیز تشخیص تغییر نقطه برای ایستگاه جزرومدی نیویورک به همراه در صد احتمال تغییر نقاط.

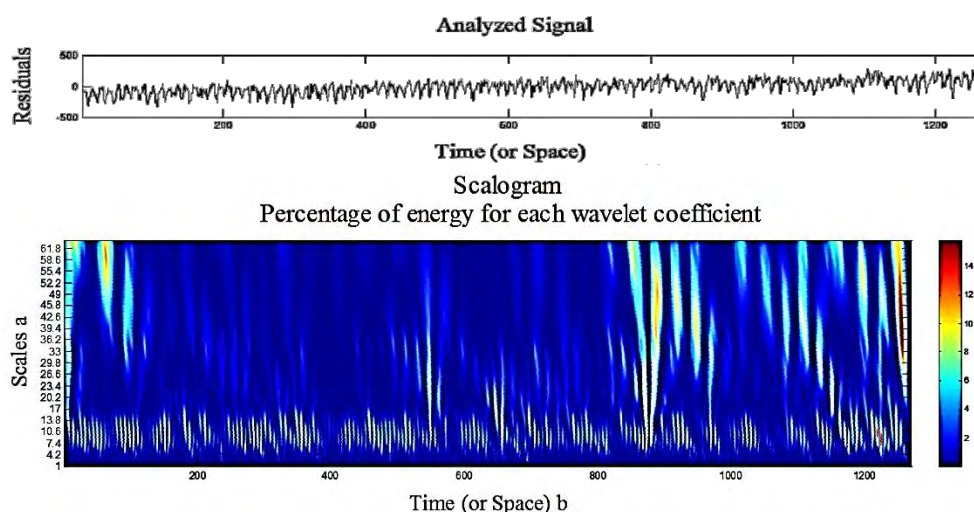
Table of Significant Changes for Column B

Confidence Level for Candidate Changes = 50%, Confidence Level for Inclusion in Table = 90%, Confidence Interval = 95%,
Bootstraps = 1000, With Replacement, CUSUM Estimates

Row	Confidence Interval	Conf. Level	From	To	Level
100	(72, 120)	100%	-172.45	-124.62	6
176	(133, 184)	98%	-124.62	-81.302	6
215	(182, 222)	97%	-81.302	-88.177	8
229	(219, 232)	95%	-88.177	-150.3	9
235	(235, 235)	95%	-150.3	2.6302	8
242	(242, 243)	96%	2.6302	-114.15	5
247	(246, 248)	95%	-114.15	-9.5228	8
254	(253, 254)	93%	-9.5228	-127.65	11
258	(258, 267)	93%	-127.65	-41.261	8
270	(263, 275)	93%	-41.261	14.981	6
288	(284, 288)	99%	14.981	-104.76	9
294	(294, 294)	98%	-104.76	9.3047	11
299	(299, 300)	97%	9.3047	-97.9	9
306	(306, 306)	99%	-97.9	10.022	7
314	(314, 320)	98%	10.022	-57.55	8
324	(322, 326)	99%	-57.55	-201.18	11
331	(331, 333)	100%	-201.18	33.532	9
349	(345, 354)	98%	33.532	-49.408	10
365	(354, 365)	98%	-49.408	3.4721	12
372	(372, 373)	98%	3.4721	-150.16	10
378	(378, 378)	99%	-150.16	21.628	11
385	(385, 397)	98%	21.628	-29.417	8
399	(395, 403)	97%	-29.417	70.128	1
420	(415, 451)	97%	70.128	24.384	8
468	(432, 476)	96%	24.384	-17.902	5
486	(477, 486)	98%	-17.902	92.191	8
492	(492, 492)	96%	92.191	-18.182	8
496	(496, 498)	100%	-18.182	87.519	6
505	(502, 505)	93%	87.519	4.8306	8
509	(509, 510)	97%	4.8306	106.12	9
515	(513, 515)	93%	106.12	31.346	7
518	(518, 520)	91%	31.346	134.7	6
525	(523, 530)	92%	134.7	79.78	5
535	(531, 537)	93%	79.78	-2.6845	9
541	(541, 545)	97%	-2.6845	110.89	9
554	(552, 566)	100%	110.89	187.16	10
581	(574, 584)	99%	187.16	87.898	8
598	(591, 600)	92%	87.898	166.55	7
613	(610, 614)	99%	166.55	50.658	10
621	(619, 621)	96%	50.658	180.84	8
626	(626, 627)	91%	180.84	32.783	10
631	(631, 631)	95%	32.783	202.15	11
638	(638, 638)	97%	202.15	70.31	10
645	(645, 647)	95%	70.31	181.12	11
655	(650, 655)	97%	181.12	259.56	8
662	(662, 662)	99%	259.56	100.85	11
668	(668, 668)	98%	100.85	250.28	6
675	(675, 675)	97%	250.28	-14.696	5
679	(679, 680)	97%	-14.696	201.82	6
686	(684, 687)	91%	201.82	117.7	12
691	(691, 691)	97%	117.7	255.24	8
698	(698, 700)	95%	255.24	122.4	7
705	(705, 709)	100%	122.4	276.81	8



شکل ۹- تصویر بالائی: محور افقی نمایشگر شماره باقی مانده مشاهدات مربوط به ایستگاه بریج پورت و محور قائم آن نیز نشان دهنده مقدار باقی مانده مشاهده می باشد. تصویر پایینی: نمودار درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک باقی مانده‌های مشاهدات سری زمانی بریج پورت و کشف تاثیرات لحظه ای آن توسط CWT می باشد که در آن محور افقی شماره باقی مانده مشاهدات مربوطه و محور قائم پارامتر مقیاس (a) می باشد.

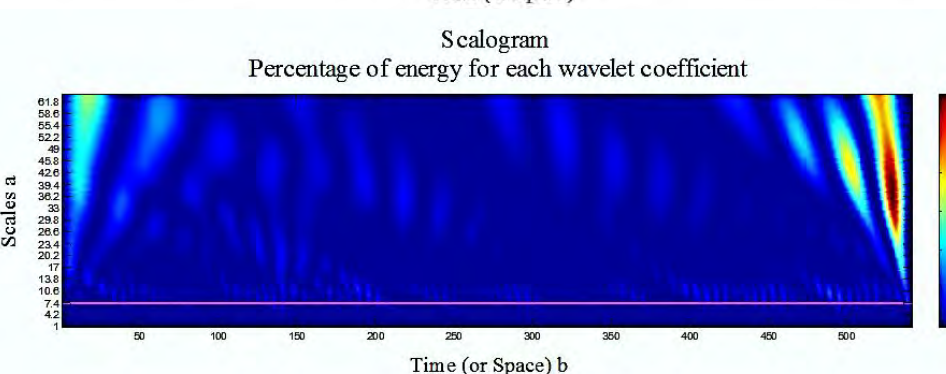
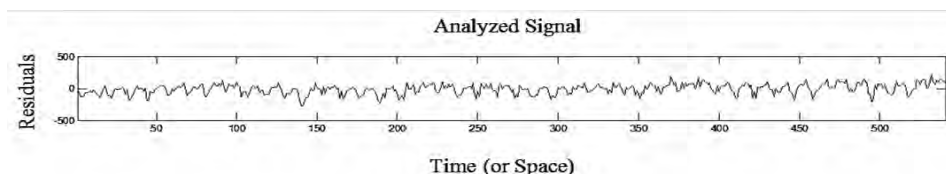


شکل ۱۰- تصویر بالائی: محور افقی نمایشگر شماره باقی مانده مشاهدات مربوط به ایستگاه نیویورک و محور قائم آن نیز نشان دهنده مقدار باقی مانده مشاهده می باشد. تصویر پایینی: نمودار درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک باقی مانده‌های مشاهدات سری زمانی بریج پورت و کشف تاثیرات لحظه ای آن توسط CWT می باشد که در آن محور افقی شماره باقی مانده مشاهدات مربوطه و محور قائم پارامتر مقیاس (a) می باشد.

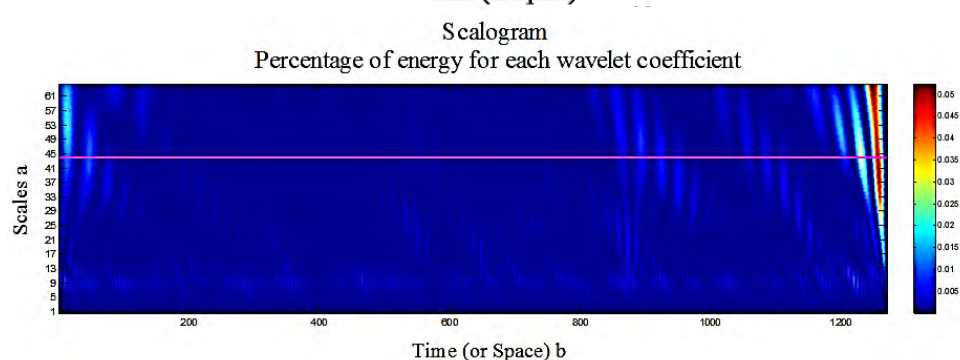
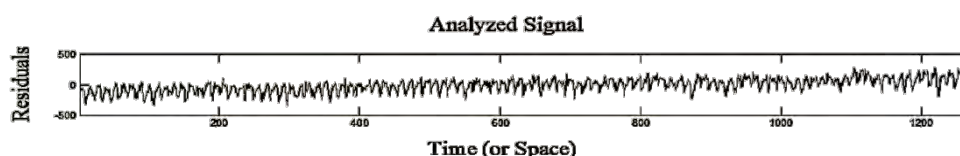
جدول ۳- تاثیرات لحظه ای کشف شده با استفاده از تبدیل موجک پیوسته برای ایستگاه‌های بریج پورت و نیویورک.

ایستگاه نیویورک				ایستگاه بریج پورت			
Row	Interval	From	To	Row	Interval	From	To
25	13-35	-152/59	22/-178	86	80-93	-93/13	-62/96
67	58-77	-206/93	34/-4	126	114-136	-70/31	-10/72
859	846-869	-25/42	87/61	160	151-169	-8/69	-43/84
893	883-904	121/83	27/95	193	185-198	-26/87	-48/71
923	917-933	49/30	87/-134	218	212-225	-46/61	-77/44
952	943-960	-35/62	11/201	283	271-288	-56/40	-19/49
972	969-972	-104/55	77/-15	319	312-327	38/96	12/99
1054	1042-1061	-45/96	62/80	353	346-359	39/77	25/93

ایستگاه نیویورک				ایستگاه بریج پورت			
1086	1079-1096	73/28	02/107	383	380-389	27/58	89/01
1113	1107-1123	207/20	01/220	430	426-439	32/63	20/79
1138	1128-1140	29/57	79/75	473	465-478	45/12	67/29
1159	1152-1171	114/86	149/45	504	497-510	49/07	101/23
1199	1185-1209	54/41	62/63	531	528-537	126/08	151/50
1233	1225-1243	-89/55	203/10				
1258	1251-1265	104/51	170/47				



شکل ۱۱- تصویر بالائی: محور افقی نمایشگر شماره باقی مانده مشاهدات مربوط به ایستگاه بریج پورت و محور قائم آن نیز نشان دهنده مقدار باقی مانده مشاهدات (بعد از حذف تاثیرات سیستماتیک لحظه ای) می باشد. تصویر پایینی: نمودار درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک باقی مانده های مشاهدات سری زمانی بریج پورت و کشف تاثیرات لحظه ای آن توسط CWT می باشد که در آن محور افقی شماره باقی مانده مشاهدات مربوطه و محور قائم پارامتر مقیاس (a) می باشد.



شکل ۱۲- تصویر بالائی: محور افقی نمایشگر شماره باقی مانده مشاهدات مربوط به ایستگاه نیویورک و محور قائم آن نیز نشان دهنده مقدار باقی مانده مشاهدات (بعد از حذف تاثیرات سیستماتیک لحظه ای) می باشد. تصویر پایینی: نمودار درصد انرژی ضرایب تبدیل موجک باقی مانده های مشاهدات سری زمانی بریج پورت و کشف تاثیرات لحظه ای آن توسط CWT می باشد که در آن محور افقی شماره باقی مانده مشاهدات مربوطه و محور قائم پارامتر مقیاس (a) می باشد.

جدول ۴- مقایسه تاثیرات لحظه ای کشف شده با استفاده از روش تجمعی و تبدیل موجک پیوسته برای ایستگاه‌های بریج پورت و نیویورک.

ایستگاه و طول سری زمانی		
ایستگاه بریج پورت	روش جمع تجمعی	آنالیز موجک پیوسته
روش	۷۸/۹۶	۷۳/۸۷
میانگین مجذور خطا (میلی متر)		
اندازه بردار باقی مانده‌ها (میلی متر مربع)	۱۸۱۸	۱۴۰۹/۴۷
ایستگاه نیویورک		
ایستگاه نیویورک	روش جمع تجمعی	آنالیز موجک پیوسته
روش	۱۰۵/۳۹	۹۰/۱۲
میانگین مجذور خطا (میلی متر)		
اندازه بردار باقی مانده‌ها (میلی متر مربع)	۳۷۴۶	۳۲۱۱/۷۴

مراجع

- [1] Birgé, L., Massart P. (1997). From model selection to adaptive estimation. Festschrift for L. Le Cam, Springer, 55-88.
- [2] Douglas, B. (1991). Global sea level rise. Journal of Geophysical Research, 96(C4), 6981-6992.
- [3] Efron, B. R. (1993). An Introduction To The Bootstrap. Chapman and Hall/CRC Publs.
- [4] Ewan, W. (1963). When And How To Use CUSUM Charts. Technometrics (5):1-32.
- [5] Gornitz, V., Lebedeff, S. (1987). Global sea-level changes during the past century. In Sea-Level Fluctuations and Coastal Evolution (pp. 3-16). SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- [6] Grigg, O.A., Farewell, V.T., Spiegelhalter, D.J. (2003). The Use of Risk-Adjusted CUSUM and RSPRT Charts for Monitoring in Medical Contexts. Statistical Methods in Medical Research, 12 (2), 147-170.
- [7] Iz, H. B. (2006). How do Unmodeled Systematic MSL Variations Affect Long Term Sea Level Trend Estimates from Tide Gauge Data? Journal of Geodesy, 40-46.
- [8] Iz, H.B., Ng, H.M. (2011). Empirical Modeling and Impact of Transient Effects on the Mean Sea Level Trend Estimates. Journal of Geodetic Science, 221-232.
- [9] Keller, W. (2004). Wavelets in geodesy and geodynamics (Vol. 1). Berlin, Germany: Die Deutsche Bibliothek.
- [10] Maravelakis, P. E. (2012). Measurement error effect on the CUSUM control chart. Journal of Applied Statistics, 39(2), 323-336.
- [11] Moghtased-Azar, K., A. Mirzaei, H. R. Nankali, and F. Tavakoli (2012). Investigation of correlation of the variations in land subsidence (detected by continuous GPS measurements) and methodological data in the surrounding areas of Lake Urmia. Nonlinear Process in Geophysics, 19, 675-683.
- [12] Nicholls, R.J., Cazenave, A. (2010). Sea-Level Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. Science Magazine, 328 (5985): 1517-1520.
- [13] Olteanu, D. A. (2010). Cumulative Sum Control Charts for Censored Reliability Data. PH.D Thesis, Blacksburg, Virginia.
- [14] Page, E.S. (1954). Cumulative sum charts. Technometrics(3):1-9.
- [15] Rioul, O., Duhamel, P. (1996). Fast algorithms for discrete and continuous wavelet transforms. IEEE Transactions on Information Theory, 38(2), 569-586.
- [16] Woodworth, P., Player, R. (2003). The permanent service for MSL: An update to the 21st century. Journal of Coastal Research, 19(2), 287-295.