

ارزیابی روش بازتعقیب اولین موجک شکل موج به منظور بهبود صحت مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای در مناطق ساحلی (مطالعه موردی: منطقه ساحلی خلیج فارس)

پریسا آگار^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲، شیرزاد روحی^۳، آرش امینی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۳- استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

چکیده

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای روشی سنجش‌ازدوری است که برای پایش ارتفاعی نواحی آبی استفاده می‌شود. در سواحل شکل موج‌های ارتفاع‌سنج راداری به سبب شرایط ژئوفیزیکی و سطوح غیرآبی در ردپای ارتفاع‌سنج، از مدل ایده‌آل اقیانوسی (مدل براون) فاصله می‌گیرند و اندازه‌گیری‌های تعقیب‌گر ماهواره که بر مبنای شکل موج‌های منطبق بر این مدل است از اعتبار کافی برخوردار نخواهند بود. لذا بازتعقیب شکل موج‌های بازگشتی در این نواحی ضروری است. در این پژوهش، پایش ارتفاعی سطح آب در فواصل ۲ و ۱۰ کیلومتری ساحل خلیج فارس در بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۱/۱۷ الی ۲۰۱۹/۰۹/۲۷، صورت پذیرفت. بدین منظور از ارتفاع‌سنج رادار دریچه مصنوعی مأموریت سنتینل-۳ با مزیت قدرت تفکیک مکانی بالا در امتداد برداشت (۳۰۰ متر)، در سه گذر ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ استفاده گردید. سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب منطقه مطالعاتی با رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار و کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه و همچنین پردازش داده‌های سطح دو حاصل شد. جهت ارزیابی سری‌های زمانی حاصل، از داده‌های نوسان نگار محلی ایستگاه‌های بندر بوشهر و کنگان و پارامتر جذر خطای مربعی متوسط ($RMSE$) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار سبب شده است، در فاصله ۲ کیلومتری از ساحل برای سه گذر ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ (با درصد شکل موج‌های چندپیکی به ترتیب ۷۱٪، ۲۷٪ و ۲۷٪) $RMSE$ نسبت به بازتعقیب کل شکل موج به ترتیب ۲۷٪، ۲۹٪ و ۲۷٪ و نسبت به داده‌های سطح دو به ترتیب ۵۱٪، ۳۲٪ و ۳۱٪ بهبود یابد. همچنین در فاصله ۱۰ کیلومتری از ساحل برای دو گذر ۲۵ و ۱۳۹ (با درصد شکل موج‌های چندپیکی به ترتیب ۶۴٪، ۱۵٪ و ۱۵٪) نسبت به بازتعقیب کل شکل موج به ترتیب ۳۱٪ و ۸٪ و نسبت به داده‌های سطح دو به ترتیب ۴۴٪ و ۸٪ بهبود صحت حاصل گردد. در گذر ۴۶۸ به دلیل پایین بودن درصد شکل موج‌های چندپیکی (۱۲٪) نتایج تقریباً معادل حاصل شده است. نتایج ضمن بیان ضرورت بازتعقیب شکل موج‌های ساحلی، عملکرد بهینه بازتعقیب اولین موجک معنادار را نیز معرفی می‌کنند.

کلید واژه‌ها: ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، مناطق ساحلی، سنتینل-۳، رادار با دریچه مصنوعی، بازتعقیب اولین موجک معنادار.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران- خیابان ولیعصر- تقاطع میر داماد غربی- دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲-۰۲۱

۱- مقدمه

تقریباً نیمی از ۷ میلیارد نفر در جهان به دلایل مختلف، در ۱۰۰ کیلومتری سواحل زندگی می‌کنند [۱]. در این مناطق، مردم در معرض خطرات جدی مانند خطر سیل‌زدگی، فرسایش زمین‌های کشاورزی و همچنین نفوذ آب‌شور به سفره‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها قرار دارند. این خطرات با افزایش ارتفاع سطح آب دریا (SSH) افزایش می‌یابند. از این‌رو نظارت بر ارتفاع سطح آب در مناطق ساحلی ضروری است [۲]. از دیرباز استفاده از ایستگاه‌های نوسان‌نگار محلی برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب رایج بوده است اما این روش با محدودیت‌هایی همچون: توزیع مکانی نابرابر در جهان، پوشش زمانی غیر یکسان، فقدان سطح مرجع مشترک اندازه‌گیری، هزینه‌بر بودن ابزار و نگهداری و وابسته به حرکات عمودی زمین، روبه‌رو است. با توسعه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای از سال ۱۹۹۳ به‌عنوان یک روش سنجش‌ازدوری^۲ تکرارپذیر و با دقت، تحولی بزرگ در پایش آب‌های کره زمین به وجود آمد. ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی یک پوشش مکانی و زمانی ایده‌آل را تحت هر شرایط آب‌وهوایی از ارتفاع سطح آب به‌صورت جهانی و رایگان ارائه می‌دهند [۳، ۴ و ۵].

در مناطق ساحلی به دلیل قرار گرفتن محیط‌های غیرآبی نظیر جزایر، زمین و مصنوعات ساحلی در ردپا^۳ ارتفاع‌سنج و همچنین شرایط حاکم بر این مناطق نظیر جریان‌های جزر و مدی شدید، موج‌های طوفانی و عمق کم نسبت به اقیانوس آزاد، شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع‌سنج که مشاهدات اساسی در ارتفاع‌سنجی هستند به‌شدت مغشوش می‌شوند و از مدل تئوری بروان^۴ [۶] که شکل موج‌های اقیانوسی را توصیف می‌کند، فاصله می‌گیرند لذا باید از الگوریتم‌های

بازتعقیب^۵ شکل موج برای تحلیل شکل موج‌های مغشوش استفاده کرد [۷].

در طی سال‌های اخیر با ظهور فن‌آوری‌های جدید مانند ارتفاع‌سنج‌های رادار با دریچه مصنوعی (SAR^6)، پیشرفت چشمگیری در بحث ارتفاع‌سنجی ساحلی حاصل شده است. این فن‌آوری برای اولین بار بر روی ارتفاع‌سنج کرایوست-۲^۷ در سال ۲۰۱۰ و پس‌از آن در سال ۲۰۱۶ بر روی ماهواره سنتینل-۳ ارائه شد. این ارتفاع‌سنج‌ها که به ارتفاع‌سنج‌های تأخیر داپلر (DDA^8) نیز شناخته می‌شوند بر اساس پردازش حالت SAR که برای اولین بار توسط رنی^۹ [۸] در سال ۱۹۹۸ ارائه شد، انبوهی از پالس‌ها را به‌صورت گروهی^{۱۰} به سمت زمین ارسال می‌کنند که هر کدام از این پالس‌ها بخشی از ردپا ارتفاع‌سنج را برداشت کرده و به ارتفاع‌سنج منعکس می‌شوند. با توجه به ثبت فرکانس‌های داپلر متفاوت برای هر کدام، با پردازش داپلر در امتداد برداشت^{۱۱}، ردپا ارتفاع‌سنج به نوارهای باریک در امتداد عرض برداشت^{۱۲} تقسیم می‌شوند که در این صورت قدرت تفکیک مکانی^{۱۳} در امتداد برداشت (۳۰۰ متر) افزایش می‌یابد. برخلاف ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی نسل قدیم با قدرت تفکیک مکانی پایین^{۱۴} (LRM) که در فاصله ۷-۱۰ کیلومتری ساحل در هر دو امتداد برداشت و عمود بر آن ردپای آن‌ها آلوده به خشکی می‌شود، ارتفاع‌سنج‌های SAR دو قدرت تفکیک مکانی متفاوت در امتداد و عرض برداشت ارائه می‌دهند. با توجه به این پیشرفت در قدرت تفکیک مکانی در امتداد برداشت،

^۵ Re-tracking^۶ Synthetic Aperture Radar^۷ CryoSat-۲^۸ Delay Doppler Altimeter^۹ Raney^{۱۰} Burst^{۱۱} Along track^{۱۲} Across track^{۱۳} Spatial resolution^{۱۴} Low resolution mode^۱ Sea Surface Height^۲ Remote sensing^۳ Footprint^۴ Brown

الگوریتم بازتعقیب حد آستانه^۴ توسط داویس و همکاران ارائه شد. این الگوریتم رویکردی کاملاً آماری دارد و بر مبنای ابعاد مستطیل تعریف شده توسط الگوریتم شیفت مرکز ثقل به بازتعقیب شکل موج می‌پردازد [۱۳]. داویس و همکاران در سال ۱۹۹۷ با استفاده از شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع سنج ژئوست^۵ و الگوریتم حد - آستانه به مطالعه تغییرات صفحات یخی پرداختند که نتایج آن‌ها نشان داد این الگوریتم با حد آستانه ۱۰٪ از دیگر الگوریتم‌های موجود در داده سطح دو در مطالعه صفحات یخی بهتر عمل می‌کند [۱۴].

محققین زیادی در طی سال‌های اخیر به توسعه رویکردهای بازتعقیب بر مبنای این الگوریتم‌ها پرداخته‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها می‌پردازیم. هوانگ و همکاران الگوریتم بازتعقیب حد آستانه بهبود یافته^۶ که بر مبنای بازتعقیب موجک‌های معنادار^۷ در شکل موج است را با استفاده از شکل موج‌های ارتفاع سنج ژئوست برای محاسبه آنالومی^۸ جاذبه در ۱۰ کیلومتری سواحل تایوان ارائه دادند. نتایج این روش برتری این رویکرد نسبت به الگوریتم بتا-۵ و اعمال الگوریتم حد آستانه بر کل شکل موج^۹ را نشان داد [۱۵]. لی و همکاران با استفاده از الگوریتم بازتعقیب حد آستانه اصلاح شده^{۱۰} که بر مبنای بازتعقیب بر اساس مقدار کمینه و بیشینه توان در لبه پیشین شکل موج است با استفاده از ۴ گذر ارتفاع سنج جیسون-۱۲ به مطالعه ارتفاع سطح آب در مناطق ساحلی کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد این الگوریتم نسبت به بازتعقیب گرهای موجود در داده سطح دو^{۱۲} و

وقتی مسیر زمینی ماهواره عمود بر خط ساحلی باشد، برخلاف ارتفاع سنج‌های نسل قدیم احتمال آلودگی ردپا ارتفاع سنج به خشکی کاهش می‌یابد. از دیگر ویژگی‌های این ارتفاع سنج‌ها نیز می‌توان به فرکانس تکرار پالس بالا^۱ و برداشت چندمنظری^۲ آن‌ها اشاره کرد که به تبع افزایش تعداد مشاهدات و دقت را به همراه خواهد داشت. با توجه به این که قدرت تفکیک مکانی در عرض برداشت کماکان مانند ارتفاع سنج‌های نسل قدیم است لذا زمانی که مسیر زمینی این ماهواره‌ها موازی با خط ساحلی باشد ردپای آن‌ها آلوده به خشکی شده و شکل موج‌ها مغشوش می‌شوند از این رو بازتعقیب شکل موج‌های بازگشتی همچنان ضروری به نظر می‌رسد [۹ و ۱۰].

بازتعقیب شکل موج بر اساس الگوریتم‌های فیزیکی و تجربی صورت می‌گیرد. الگوریتم‌های فیزیکی بر مبنای انطباق یک مدل خاص بر شکل موج و در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی سطح بازتاب دهنده به بازتعقیب شکل موج می‌پردازند. با این وجود روش‌های تجربی صرفاً شکل ظاهری شکل موج را در نظر گرفته و خصوصیات فیزیکی سطح بازتاب دهنده را در محاسبات خود دخیل نمی‌کنند. الگوریتم‌های تجربی نیز خود به دودسته تقسیم می‌شوند. دسته اول الگوریتم‌هایی هستند که رویکردی کاملاً آماری دارند و دسته دوم الگوریتم‌هایی که بر مبنای برازش یک تابع ریاضی به بازتعقیب شکل موج می‌پردازند [۱۱].

الگوریتم بازتعقیب شیفت مرکز ثقل ($OCOG$)^۳ بر مبنای تعریف یک مستطیل که مرکز ثقل آن منطبق بر مرکز ثقل شکل موج است توسط وینگهام و همکاران معرفی شد. از این الگوریتم که یک الگوریتم آماری است، بیشتر برای تعیین مقادیر اولیه سایر الگوریتم‌های بازتعقیب استفاده می‌شود [۱۲]. در سال ۱۹۹۵

^۴ Threshold Re-tracker^۵ GeoSat^۶ Improved Threshold Re-tracker^۷ Meaningful Sub-waveform^۸ Anomaly^۹ Full waveform^{۱۰} Modified Threshold Re-tracker^{۱۱} Jason-۲^{۱۲} On-board Re-tracker^۱ Pulse repetition frequency^۲ Multi looking^۳ Offset Center of Gravity Re-tracker

استفاده کردند. نتایج برتری رویکرد ارائه شده را به خصوص برای ۰ تا ۵ کیلومتری ساحل نسبت به دیگر الگوریتم‌های بازتعقیب نشان داد [۱۹]. روحی و همکاران چندین دریاچه با ابعاد و شرایط محیطی گوناگون را با استفاده از ارتفاع سنج کرایوست-۲ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش رویکرد میانگین بازتعقیب موجک‌های معنادار^۶ در یک شکل موج معرفی شد و از الگوریتم‌های مختلف تجربی و فیزیکی برای بازتعقیب موجک‌های معنادار و همچنین کل شکل موج استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که بازتعقیب اولین موجک معنادار^۷ و میانگین بازتعقیب موجک‌های معنادار در یک شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه و ساموسا-۳^۸ برای بازیابی سطح آب دریاچه‌های کوچک مناسب هستند. در حالی که در دریاچه‌های بزرگ بازتعقیب کل شکل موج منجر به نتایج بهتر می‌شود [۲۰].

مطالعاتی در خصوص پایش ارتفاعی سطح آب در مناطق ساحلی خلیج فارس انجام شده است [۲۱ و ۲۲] اما آن‌ها از مأموریت‌های ارتفاع سنجی نسل قدیم، که رد پای آن‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل مغشوش کننده شکل موج قرار می‌گیرند برای این منظور استفاده کرده‌اند. در پژوهش حاضر برای اولین بار از ارتفاع سنج رادار با دریچه مصنوعی مأموریت سنتینل-۳ با مزیت قدرت تفکیک مکانی بالا در امتداد برداشت (۳۰۰ متر) برای پایش ارتفاعی سطح آب منطقه ساحلی خلیج فارس استفاده شده است. همچنین کارایی روش‌ها و رویکردهای بازتعقیب مختلف تابعی از وضعیت شکل موج‌ها و آن نیز تابعی از منطقه مطالعاتی و شرایط ژئوفیزیکی حاکم بر آن است. از این رو یک روش بازتعقیب برای تمامی مناطق مطالعاتی نمی‌توان تجویز کرد. لذا در این پژوهش سعی شده است کارایی بازتعقیب اولین موجک معنادار که بر روی نواحی

همچنین بازتعقیب حد آستانه در مناطق کم عمق ساحلی بهتر عمل می‌کند [۱۶]. گو و همکاران برای بهبود کیفیت داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره ژئوست برای بازیابی آنامولی جاذبه در اطراف جزیره تایوان رویکرد بازتعقیب پارامتری چندموجکی ($MSPR^1$) را ارائه کردند که بر مبنای بازتعقیب موجک‌های معنادار با استفاده از الگوریتم بازتعقیب بتا-۵ است. نتایج نشان داد این رویکرد نسبت به بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم بتا-۵ و داده‌های سطح دو بهتر عمل می‌کند [۱۷]. یانگ و همکاران برای محاسبه ارتفاع سطح آب و ارتفاع موج در سواحل چین با استفاده از شکل موج‌های ارتفاع سنج جیسون-۱، رویکرد بازتعقیب اقیانوسی-سی-اس^۲ را ارائه دادند. این رویکرد که بر مبنای طبقه بندی شکل موج به شکل موج‌های اقیانوسی و ساحلی با استفاده از پارامترهای به دست آمده از بازتعقیب شیفت مرکز ثقل عمل کرده، موجک‌های معنادار را با استفاده از الگوریتم اقیانوسی بازتعقیب می‌کند. نتایج ارزیابی این رویکرد با استفاده از داده‌های نوسان نگار محلی و بویه^۳ برتری این رویکرد نسبت به الگوریتم‌های بازتعقیب شیفت مرکز ثقل، بتا-۵، حد آستانه و بازتعقیب گرهای اقیانوسی و آیس-۴^۴ موجود در داده سطح دو در هر دو اقیانوس عمیق و کم عمق را نشان داد [۱۸]. عرب صاحبی و همکاران در فاصله ۵-۰، ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ کیلومتری تنگه هرمز با استفاده از دو گذر ماهواره جیسون-۲ رویکردی بر مبنای یافتن نقطه عطف شکل موج برای بازتعقیب شکل موج بازگشتی ارائه دادند و همچنین از الگوریتم‌های تجربی متداول نظیر شیفت مرکز ثقل، حد آستانه، بتا پارامتر و بازتعقیب گر ALES^۵ موجود در داده سطح دو نیز برای محاسبه ارتفاع سطح آب

^۱ Multi Sub-waveform Parametric Re-tracker^۲ Ocean-Cs^۳ Buoy^۴ Ice-۲ Re-tracker^۵ A multi-mission adaptive sub-waveform re-tracker^۶ Mean-all Meaningful Sub-waveform^۷ First Meaningful Sub-waveform^۸ SAMOSA-۳

مایکروویو برای تصحیح تأخیر ناشی از تروپوسفر تر و مجموعه‌ای از ابزارهای تعیین مدار دقیق^۵ مانند گیرنده سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS^۶)، دوریس^۷ و رفلکتور لیزری (LRR^۸) پشتیبانی می‌شود. سرال یک ارتفاع‌سنج رادار با دریچه مصنوعی است که از مزیت‌های آن می‌توان به فرکانس تکرار پالس بالا، برداشت چندمنظری^۹ و کوچک بودن اندازه ردپا (۳۰۰ متر) در امتداد برداشت اشاره کرد. این ارتفاع‌سنج اولین ارتفاع‌سنج رادار با دریچه مصنوعی است که برخلاف ارتفاع‌سنج ماهواره کرایوست-۲ تقریباً کل کره زمین را در حالت رادار با دریچه مصنوعی پوشش می‌دهد. در این مطالعه از داده‌های این ارتفاع‌سنج در دو سطح داده یک (SR_۱_SRA) و دو (SR_۲_LAN) استفاده شده است [۹]. گذرهای ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ که از نزدیکی دو ایستگاه نوسان‌نگار محلی بوشهر و کنگان عبور می‌کنند، انتخاب شده است. جدول (۱) تعدادی از مشخصات این مأموریت را ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات مأموریت سنتینل-۳ [۹]

عنوان پارامتر	مقدار
دوره تکرار مداری (روز)	۲۷
میل مداری (درجه)	۹۸٫۶۵
فرکانس تکرار پالس (کیلوهرتز)	۱۷٫۸
طول پالس (نانوثانیه)	۱۳٫۱۲۵
تعداد گیت	۱۲۸
گیت اسمی	۴۳

ساحلی تاکنون ارزیابی نشده است، با بهره‌گیری از الگوریتم بازتعقیب حد آستانه در برآورد ارتفاع سطح آب در فواصل بسیار نزدیک به سواحل (۲ و ۱۰ کیلومتری) کم‌عمق خلیج فارس مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

در این پژوهش ارتفاع سطح آب مناطق ساحلی بندر بوشهر و کنگان با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنج سرال (SRAL) مأموریت سنتینل-۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل انتخاب این مأموریت در این پژوهش، مزیت بالا بودن قدرت تفکیک مکانی در امتداد برداشت (۳۰۰ متر) است که در این حالت ارتفاع‌سنج در امتداد برداشت کم‌تر تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرار می‌گیرد؛ لذا ارتفاع سطح آب صحیح‌تری در فاصله نزدیک به ساحل نسبت به ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم ارائه می‌دهد. برای ارزیابی ارتفاع سطح آب به‌دست‌آمده، از داده‌های نوسان‌نگار موجود در این دو منطقه استفاده شده است.

۲-۱- داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

مأموریت سنتینل-۳ از سری مأموریت‌های سنتینل است که به‌طور مشترک توسط ایسا (ESA^۲) و اویمتست (EUMETSAT^۳) به‌عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک کمیسیون اروپا اداره می‌شود. ماهواره سنتینل-۳ در ۱۶ فوریه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شد. این ماهواره که در ارتفاع مداری ۸۱۴٫۵ کیلومتر و در یک مدار خورشید آهنگ-شبه قطبی پرواز می‌کند، سنجنده سرال (SRAL^۴) را برای پایش آب‌های کره زمین با خود حمل می‌کند. سرال یک ارتفاع‌سنج راداری دو فرکانسه است که در دو باند Ku (۱۳٫۶ گیگاهرتز) و C (۵٫۴ گیگاهرتز) کار می‌کند. از باند C برای تصحیح تأخیر یونسفری استفاده می‌شود و همچنین توسط رادیومتر

^۵ Precise orbit determination

^۶ Global Navigation Satellite System

^۷ DORIS

^۸ Laser Retro-Reflector

^۹ Multi-look tracking

^۱ SAR Radar Altimeter

^۲ European Space Agency

^۳ European Org. for the Exploitation of Meteorological Satellites

^۴ SAR Radar Altimeter

۲-۲- داده‌های نوسان‌نگار محلی

جهت ارزیابی صحت ارتفاع سطح آب حاصل از مأموریت ارتفاع‌سنجی از داده‌های نوسان‌نگار محلی ایستگاه بندر بوشهر و کنگان استفاده شده است. از آنجایی که نرخ برداشت این نوسان‌نگارها هر ۱۵ دقیقه و نرخ برداشت ارتفاع‌سنج ماهواره سنتینل-۳ هر ۲۷ روزه است؛ لذا برای مقایسه این دودسته داده، داده‌های نوسان‌نگار محلی در زمان برداشت ارتفاع‌سنج درون‌یابی

خطی شدند [۱۹]. دلیل استفاده از درون‌یابی خطی این است که نوسان‌نگارها چندین بار در روز به برداشت داده می‌پردازند. از این‌رو اختلاف‌زمانی بین دودسته داده بسیار کم و لذا انتظار می‌رود در این فاصله زمانی کم، سطح آب تغییرات زیادی نداشته باشد.

جدول (۲) اطلاعات مربوط به این نوسان‌نگارها را بیان می‌کند.

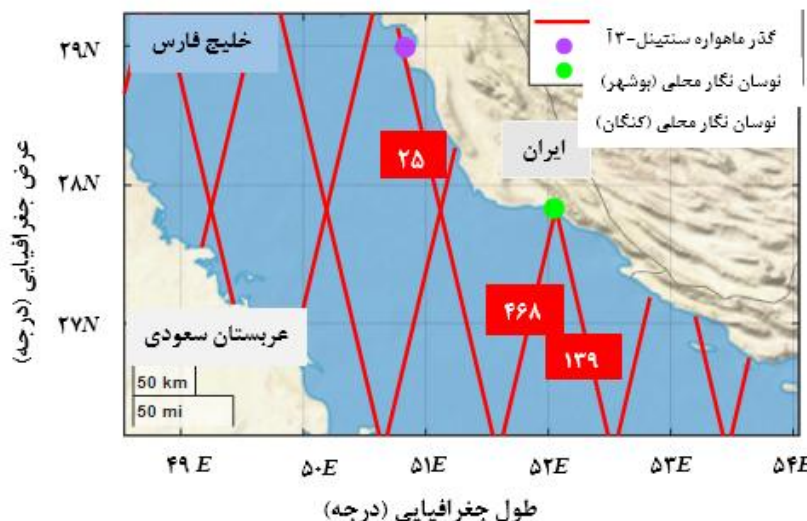
جدول ۲: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های نوسان‌نگار محلی مستقر در خلیج فارس

گذر	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ داده	فاصله مستقیم تا گذر (ماهواره (کیلومتر)	دوره‌های نظیر سنتینل-۳ آ
۲۵	بوشهر	۵۰° ۵۰'	۲۸° ۵۹'	۲۰۱۸/۰۱/۱۷ ۲۰۱۹/۰۵/۱۸	۴	۲۷-۴۵
۱۳۹	کنگان	۵۲° ۰۳'	۲۷° ۵۰'	۲۰۱۸/۰۹/۲۱ ۲۰۱۹/۰۹/۲۷	۲	۳۶-۴۹
۴۶۸				۲۰۱۸/۱۰/۰۳ ۲۰۱۹/۰۸/۲۳	۰/۴	۳۶-۴۸

۲-۳- منطقه مطالعاتی

خلیج فارس یک محیط آبی نیمه بسته است که از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به دریای عرب متصل می‌شود. خلیج فارس با مساحت ۲۵۱۰۰۰ کیلومترمربع و متوسط عمق ۳۰ متر، محیطی پهناور و کم‌عمق محسوب می‌شود. این منطقه در معرض آب‌وهوای خشک و نیمه گرمسیری قرار دارد به‌طوری که دمای هوا در زمستان تا صفر درجه سانتی‌گراد پایین می‌آید و در تابستان ممکن است به ۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد که این امر سبب ایجاد نوسانات در سطح آب می‌شود [۲۳]. خلیج فارس به دلیل داشتن ذخایر نفت و گاز از نظر سیاسی، نظامی و اقتصادی بسیار موردتوجه است

و یکی از شلوغ‌ترین آبراه‌های اقیانوس جهانی است. این محیط آبی شهرهای بزرگ ساحلی پرجمعیت را در خود جای داده است که در معرض طغیان ناشی از افزایش ارتفاع سطح آب قرار دارند [۲۴]. در این پژوهش آب‌های سواحل شمالی خلیج فارس، جایی که ایران قرار دارد در فواصل ۲ و ۱۰ کیلومتری از ساحل برای مطالعه انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است از تمامی مشاهدات (شکل موج‌های ارتفاع‌سنج) گذرهای مربوطه در فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری ساحل استفاده شده است. شکل (۱) موقعیت گذرهای انتخاب شده و ایستگاه‌های نوسان‌نگار محلی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت گذرهای انتخابی مأموریت سنتینل-۱۳ و نوسان‌نگارهای محلی در منطقه ساحلی خلیج فارس

۳- روش تحقیق

در این بخش ابتدا به مبانی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و سپس به رویکردهای مورد استفاده برای بازتعقیب شکل موج‌های بازگشتی در این پژوهش پرداخته می‌شود. در پایان نیز مراحل ایجاد سری زمانی ارتفاع سطح آب شرح داده می‌شود.

۳-۱- مبانی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای پالس‌های منظم با توان معین در محدوده الکترومغناطیس را به صورت پیوسته به سمت زمین می‌فرستند و توان‌های منعکس شده از سطح را توسط آنتن دریافت می‌کنند. توان دریافت شده که ناشی از تعامل پالس با سطح بازتاب‌دهنده است در فواصل معین (تحت عنوان گیت^۱) در یک پنجره زمانی با طول ثابت نمونه‌برداری می‌شود که به این توالی نمونه‌های جمع‌آوری شده شکل موج گویند [۲۵]. این شکل موج در اقیانوس آزاد از یک شکل استاندارد پیروی می‌کند که شامل یک لبه پیشین^۲ با شیب تند در حال افزایش و به دنبال آن یک لبه

پسین^۳ که توان آن به دلیل الگوی حصول آنتن سنجنده و خروج از نادیر به تدریج کاهش می‌یابد. این فرم استاندارد با مدل تئوری براون که شکل موج‌های اقیانوسی را توصیف می‌کند منطبق است [۲۶]. هدف اصلی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای اندازه‌گیری فاصله از ماهواره تا سطح آب است. نقطه میانی در لبه پیشین شکل موج بازگشتی زمان بازگشت پالس از سطح آب را نشان می‌دهد. از این رو فاصله بین ارتفاع‌سنج و سطح آب از مدت زمان رفت و برگشت پالس ارسالی و مقیاس با سرعت نور طبق رابطه (۱) برآورد می‌شود.

$$R = \frac{1}{2} \times C \times \Delta t \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، R فاصله بین ماهواره تا سطح آب، C سرعت نور و Δt زمان رفت و برگشت پالس ارسالی است [۲۷].

۳-۲- بازتعقیب شکل موج

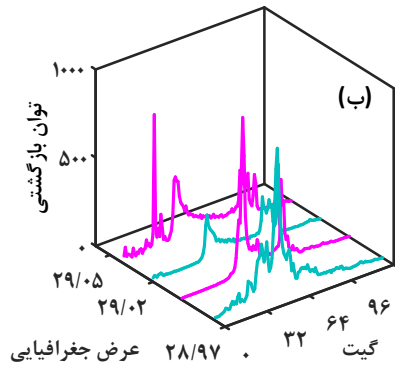
همان‌طور که در مقدمه اشاره شد در اقیانوس آزاد شکل موج‌های بازگشتی از یک شکل استاندارد تحت عنوان مدل براون پیروی می‌کنند.

^۱ Gate

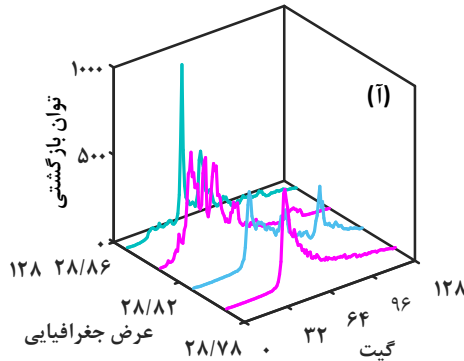
^۲ Leading edge

^۳ Trailing edge

خلیج فارس را نشان می‌دهند.



شکل (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب نمونه شکل موج‌های گذر ۱۳۹ و ۲۵ در فاصله ۲ کیلومتری سواحل



شکل ۲: نمونه شکل موج‌های منطقه مطالعاتی (آ) گذر ۱۳۹، دوره ۴۰ و (ب) گذر ۲۵، دوره ۳۰

رابطه (۲)

$$C_{ret} = (G_r - G_0) \times \frac{C}{2} \times \tau$$

در نهایت ارتفاع سطح دریا تصحیح شده SSH_{Corr} از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$SSH_{Corr} = H - (R + C_{ret}) - \Delta C \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، H ارتفاع مداری ماهواره نسبت به یک بیضوی مرجع، R فاصله حاصل از تعقیب گر ماهواره بر مبنای گیت اسمی ارتفاع سنج و ΔC مجموعه‌ای از تصحیحات شامل: تروپوسفر تر و خشک، یونسفر، بایاس وضعیت دریا^۶، جزر و مد (شامل اقیانوسی، بارگذاری^۷، زمین صلب^۸ و قطبی^۹) و دینامیک اتمسفر است [۲۹].

۳-۳- بازتعقیب گرهای موجود در داده‌های سطح

دو ارتفاع سنج سرال

در داده‌های سطح دو ارتفاع سنج سرال ۴ فاصله (فاصله بین ارتفاع سنج و سطح آب) حاصل از الگوریتم‌های بازتعقیب اقیانوسی^{۱۰}، شیفت مرکز ثقل، آیس-شیت^{۱۱} و

در این شکل استاندارد (مدل براون)، به گیت متناظر با نقطه میانی^۱ لبه پیشین که لحظه صحیح بازگشت پالس از سطح را نشان می‌دهد، گیت اسمی^۲ ارتفاع سنج گویند. در مناطق ساحلی به دلیل آلوده شدن ردپا ارتفاع سنج به خشکی و همچنین شرایط خاص این مناطق، شکل موج‌ها از مدل براون فاصله می‌گیرند؛ لذا گیت اسمی ارتفاع سنج دیگر معرف نقطه میانی لبه پیشین شکل موج نمی‌باشد. در نتیجه گیت اسمی منجر به فاصله نادرستی از سطح می‌شود. از این رو بازتعقیب شکل موج به منظور تعیین نقطه میانی لبه پیشین و اعمال تصحیح بازتعقیب^۳ به فاصله تعقیب گر^۴ ماهواره که بر مبنای گیت اسمی به دست آمده است، ضروری است [۷ و ۲۸].

تصحیح بازتعقیب C_{ret} از اختلاف بین گیت بازتعقیب شده^۵ و گیت اسمی ارتفاع سنج، با ضرب در عرض گیت نمونه برداری طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

در رابطه (۲)، C سرعت نور، τ طول پالس ارسالی، G_r گیت بازتعقیب شده و G_0 گیت اسمی است [۱۹].

^۶ Sea State Bias

^۷ Load tide

^۸ Solid earth tide

^۹ Pole

^{۱۰} Ocean

^{۱۱} Ice-sheet

^۱ Mid point

^۲ Nominal Gate

^۳ Re-tracking correction

^۴ Tracker

^۵ Re-tracked Gate

معیارهای آن‌ها طبق رابطه‌های (۴) الی (۷) محاسبه می‌شود.

$$d_1^i = P_{i+1} - P_i \quad i = 1, 2, \dots, N-2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$d_2^i = P_{i+2} - P_i \quad i = 1, 2, \dots, N-2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{(N-1) \sum_{i=1}^{N-1} (d_1^i)^2 - (\sum_{i=1}^{N-1} d_1^i)^2}{(N-1)(N-2)}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{(N-2) \sum_{i=1}^{N-2} (d_2^i)^2 - (\sum_{i=1}^{N-2} d_2^i)^2}{(N-2)(N-3)}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$E_1 = BS_1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$E_2 = CS_2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

در روابط (۴) الی (۹): P_i توان گیت i ام، d_1^i ، d_2^i به ترتیب تفاضلی‌های یگانه و دوگانه، S_1 و S_2 به ترتیب انحراف معیارهای تفاضلی یگانه و دوگانه و E_1 و E_2 به عنوان ضرایبی از انحراف معیارهای تفاضلی یگانه و دوگانه تعریف می‌شود. ضرایب B و C می‌توانند مقادیر بین صفر تا یک را اختیار کنند. رویه از گیت شماره یک شروع می‌شود. اگر نصف توان تفاضلی دوگانه این گیت بزرگ‌تر از E_2 باشد، گیت موردنظر به عنوان گیت ابتدایی احتمالی موجک معنادار شناسایی می‌شود؛ حال اگر توان‌های تفاضلی یگانه بیشتر از سه گیت متوالی پس‌ازاین گیت، بزرگ‌تر از E_1 باشند؛ موجک شناسایی شده موجک معنادار خواهد بود [۱۵]. شکل (۳) موجک‌های معنادار در گذر ۲۵ به همراه شروع و پایان لبه پیشین آن‌ها که به وسیله الگوریتم تشخیص موجک شناسایی شده است را نشان می‌دهد.

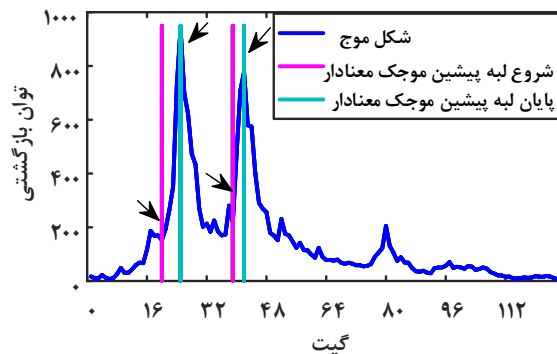
و سی-آیس^۱ ارائه شده است. بازتعقیب گر اقیانوسی موجود در داده‌های سطح دو سرال که مدل تغییر یافته الگوریتم بازتعقیب ساموسا است مدل ریاضی شکل موج‌های حاصل از برداشت چندمنظری ارتفاع سنج‌های رادار با دریچه مصنوعی را توصیف می‌کند. مدل مذکور با در نظر گرفتن خصوصیات سطح بازتاب‌دهنده و مشخصات خود ارتفاع سنج تعریف می‌شود و در نهایت با انطباق این مدل به شکل موج‌های بازگشتی، پارامترهای شکل موج استخراج می‌شود. الگوریتم‌های بازتعقیب آیس-شیت و سی-آیس که به ترتیب برای شکل موج‌های منعکس از صفحات یخی و مناطق یخی-آبی طراحی شده‌اند بر اساس برآزش کمترین مربعات یک مدل نیمه تحلیلی با فرم گوسی اصلاح شده^۲ بر شکل موج، به بازتعقیب شکل موج می‌پردازند. شکل موج در الگوریتم آیس-شیت با استفاده از پنج تابع پیوسته تکه‌ای مدل می‌شود و در الگوریتم سی-آیس با یک تابع سه ضابطه‌ای، به این صورت که لبه پیشین شکل موج با یک تابع گوسی، لبه پسین با یک تابع نمایی نزولی و بخش میانی شکل موج که مرتبط کننده لبه پیشین با لبه پسین است با یک تابع واسطه مدل می‌شود [۳۰].

۳-۴- الگوریتم شناسایی موجک‌های معنادار

شکل موج‌های ساحلی معمولاً چندپیکی هستند که هرکدام از این پیک‌ها خود می‌توانند یک شکل موج کوچک باشند که به آن‌ها موجک معنادار گفته می‌شود. این موجک‌های معنادار را می‌توان با الگوریتم‌های مختلف بازتعقیب کرد و بهترین تصحیح بازتعقیب را تعیین کرد [۳۱]. در این پژوهش برای شناسایی موجک‌های معنادار از الگوریتم ارائه شده توسط هوانگ در سال ۲۰۰۶ استفاده شده است [۱۵]. برای تعیین موجک‌های معنادار در یک شکل موج، ابتدا توان‌های تفاضلی یگانه و دوگانه و همچنین انحراف

^۱ Sea-ice

^۲ Modified gaussian



شکل ۳: موجک‌های شناسایی شده در شکل موجی از گذر ۲۵، دوره ۲۷

$$P_N = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 P_i \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$Th = P_N + q(A - P_N) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$G_R = (K - 1) + \frac{Th - P_{K-1}}{P_K - P_{K-1}} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در روابط (۱۰) الی (۱۳): A دامنه کل شکل موج (بدست آمده از الگوریتم شیفت مرکز ثقل)، $n_1 = n_2 = 4$ تعداد گیت‌های متأثر از پدیده الایزینگ^۱ در ابتدا و انتهای شکل موج، N تعداد گیت‌ها، P_i توان شکل موج در گیت i ام، P_N نویز حرارتی، Th توان حد آستانه، q مقدار حد آستانه، K اولین گیتی که توان آن از توان حد آستانه فراتر می‌رود و G_R نیز گیت بازتعقیب است. [۱۳]

شکل (۴-الف) نمونه‌ای از شکل موج اقیانوسی را نشان می‌دهد که در این حالت گیت بازتعقیب شده با الگوریتم حد آستانه با گیت بازتعقیب اسمی برابر است. ارتفاع سنج در این شکل موج تحت تأثیر عوامل مغشوش کننده شکل موج قرار نگرفته است. شکل (۴-ب) نمونه‌ای از شکل موج مغشوش را نشان می‌دهد که گیت اسمی ارتفاع سنج منطبق بر نقطه میانی لبه پیشین شکل موج نیست.

۳-۵- رویکردهای بازتعقیب شکل موج در این پژوهش

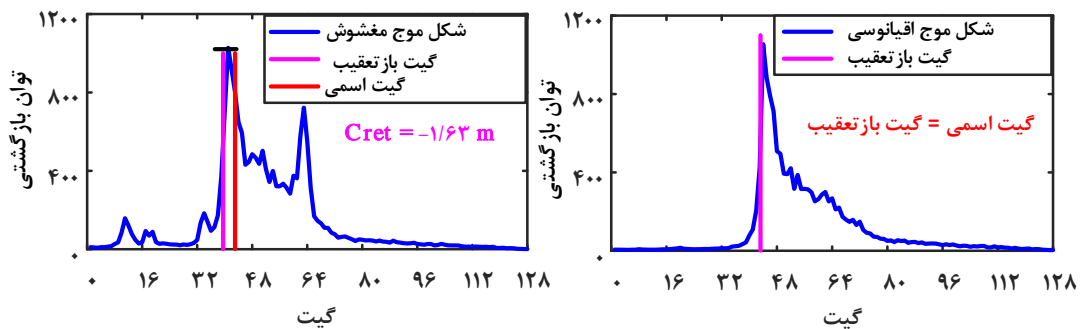
با توجه به پیشینه پژوهش، یک الگوریتم بازتعقیب واحد را نمی‌توان برای بازتعقیب همه شکل موج‌ها در نظر گرفت. زیرا با توجه به موقعیت منطقه مطالعاتی و شرایط حاکم، شکل موج‌ها اشکال متفاوتی خواهند داشت. بر اساس پیشینه پژوهش، بازتعقیب موجک‌های معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه عملکرد خوبی داشته است. لذا در پژوهش حاضر نیز از این الگوریتم و با به کارگیری حد آستانه‌های ۱۰ الی ۹۰ درصد با گام ده واحدی استفاده شد.

۳-۵-۱- بازتعقیب کل شکل موج

به عنوان اولین رویکرد مورد استفاده در این پژوهش، کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه بازتعقیب شد. الگوریتم بازتعقیب حد آستانه رویکردی کاملاً آماری دارد که از ابعاد مستطیل تعریف شده در الگوریتم بازتعقیب شیفت مرکز ثقل برای یافتن گیت بازتعقیب استفاده می‌کند. اجرای این الگوریتم آسان بوده اما به توپوگرافی سطح حساس است. معمولاً از این الگوریتم برای بازتعقیب شکل موج در مناطق ساحلی و دریاچه‌ها استفاده می‌شود [۱۳ و ۳۱]. جزئیات الگوریتم بازتعقیب حد آستانه در روابط (۱۰) الی (۱۳) تشریح شده است.

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

^۱ Aliasing



شکل ۴: بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه با آستانه ۸۰ درصد در گذر ۱۳۹ (آ) دوره ۴۰ و (ب) دوره ۴۶

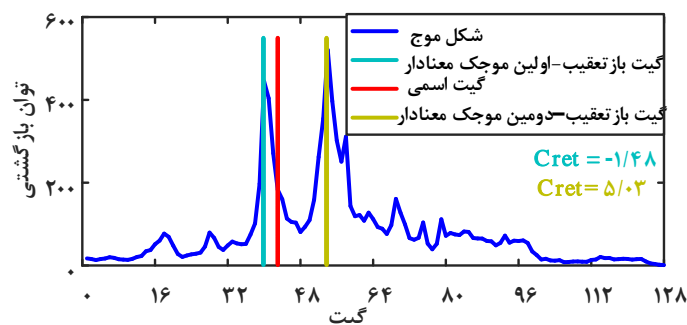
در رابطه (۱۴)، $MS(i)$ موجک معنادار i ام و n تعداد موجک‌های معنادار شناسایی شده در یک شکل موج است [۳۳]. شکل (۵) نمونه‌ای از شکل موج چندپیکی به همراه گیت‌های حاصل از بازتعقیب هر موجک را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) گیت‌های بازتعقیب حاصل از دو رویکرد کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حدآستانه برای دو شکل موج از گذرهای ۴۶۸ و ۲۵ را نمایش می‌دهند.

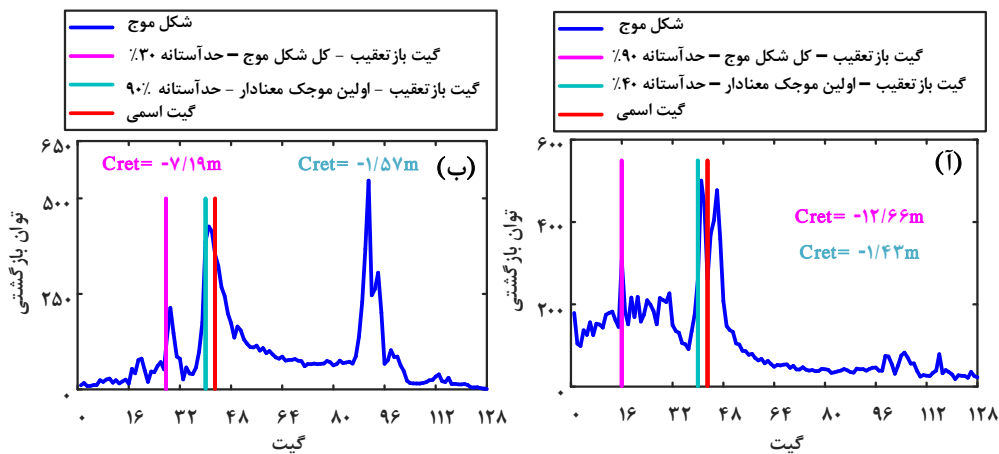
۳-۵-۲- بازتعقیب اولین موجک معنادار

برای هر کدام از موجک‌های معنادار شناسایی شده در شکل موج یک تصحیح حاصل از بازتعقیب به دست می‌آید. طبق نتایج حاصل از مطالعات پیشین که اولین موجک معنادار معمولاً ارتفاع سطح آب صحیح‌تری در آب‌های درون سرزمینی تولید می‌کند [۴ و ۳۲] در این پژوهش نیز از رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار طبق رابطه (۱۴) با استفاده از الگوریتم حد آستانه، استفاده شده است.

رابطه (۱۴) $MS(i) = \{1, 2, \dots, n\}$ First sub-waveform : Selected sub-waveform = $MS(1)$



شکل ۵: بازتعقیب موجک‌های معنادار شناسایی شده در گذر ۲۵ دوره ۴۳ با الگوریتم حدآستانه با آستانه ۹۰٪



شکل ۶: رویکردهای باز تعقیب اولین موجک معنادار و رویکرد باز تعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه (آ) گذر ۴۶۸ دوره ۳۸ (ب) گذر ۲۵ دوره ۳۱

سطح دو با بهره‌گیری از رابطه (۳) تشکیل شد. با این تفاوت که برای ایجاد سری زمانی از باز تعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو در رابطه (۳) تصحیح حاصل از باز تعقیب وجود ندارد.

۲- حذف مشاهدات پرت در سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای

با استفاده از مقدار میانگین سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای در هر دوره (شکل ۷-الف)) و با سطح اطمینان ۹۵ درصد، داده‌های پرت از سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای خارج شدند (شکل ۷-ب)).

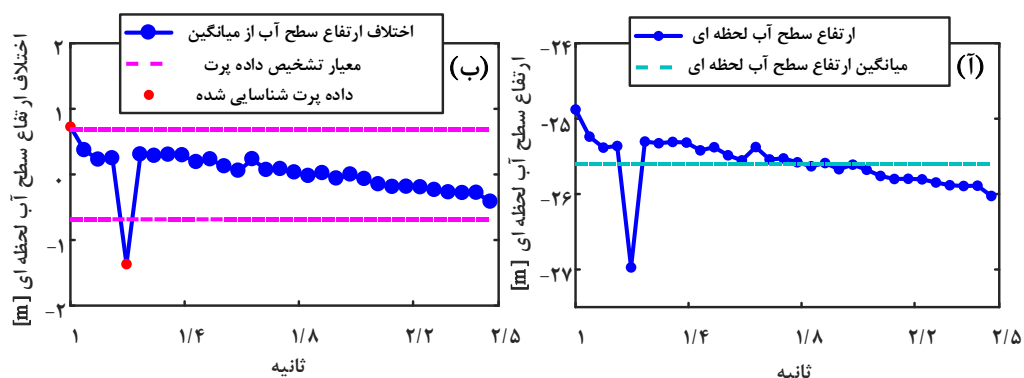
۳-۶- محاسبه سری زمانی ارتفاع سطح آب و

ارزیابی آن با نوسان‌نگار محلی

برای ایجاد یک سری زمانی از ارتفاع سطح آب و ارزیابی آن با سری زمانی ارتفاع سطح آب به دست آمده از مشاهدات نوسان‌نگار محلی مراحل ۱ تا ۵ در این پژوهش انجام شده است [۲۰ و ۳۱].

۱- تشکیل سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای

سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای برای هر گذر در هر دوره با استفاده از رویکردهای باز تعقیب شکل موج شرح داده شده در روش تحقیق و پردازش داده‌های



شکل ۷: (آ) سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای به دست آمده از گذر ۴۶۸ دوره ۳۹ به همراه میانگین ارتفاع سطح آب لحظه‌ای (ب) اختلاف ارتفاع سطح آب لحظه‌ای از میانگین و داده‌های پرت شناسایی شده

(IMP^3) (رابطه (۱۶)) استفاده شده است.

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$IMP = \frac{R_{base} - R_{comp}}{R_{base}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در روابط (۱۵) و (۱۶)، x_i نتایج حاصل و y_i داده‌های مرجع (نوسان‌نگار محلی)، n تعداد داده‌ها، R_{base} $RMSE$ سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از به‌کارگیری روش مبنا (پردازش داده‌های سطح دو و بازتعقیب کل شکل موج) و R_{comp} $RMSE$ سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از رویکرد پیاده شده در این پژوهش (بازتعقیب اولین موجک معنادار) است.

۴- نتایج عددی و بحث

در این بخش نتایج عددی و نموداری سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه ارائه شده است. از آنجایی که رسالت رویکرد بازتعقیب موجک‌های معنادار برخورد با شکل موج‌های چندپیکی است، لذا برای بررسی کارایی این رویکرد، تحلیلی بر تعداد و درصد شکل موج‌های چندپیکی با استفاده از الگوریتم تشخیص موجک‌های معنادار در هر دو فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری از ساحل صورت پذیرفت که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

۳- سری زمانی ارتفاع سطح آب هر گذر

با کنار هم قرار دادن مقدار میانه سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای متناظر با هر دوره^۱، سری زمانی ارتفاع سطح آب هر گذر تشکیل شد. دلیل استفاده از میانه به جای میانگین این است که پارامتر میانه متأثر از مقادیر بسیار بزرگ یا بسیار کوچک در میان داده‌های موردبررسی نیست و چون در رویه بکار گرفته شده در این پژوهش و بسیاری از پژوهش‌های مرتبط، داده‌های ارتفاعی بخش نسبتاً بزرگی از گذر ماهواره به‌منظور افزایش تعداد مشاهدات (اعتمادپذیری بالاتر) در نظر گرفته شده است و با توجه به آنکه نوسان‌نگار ارتفاع سطح آب لحظه‌ای را ارائه می‌کند بدیهی است میانگین تطابق خوبی با آن نخواهد داشت و این در حالی است که میانه یک نماینده ارتفاع سطح آب لحظه‌ای را معرفی می‌کند. در [۳۱] و [۳۴] نیز نشان داده شده است که استفاده از میانه در هر دوره منجر به نتایج بهتری نسبت به میانگین سری زمانی ارتفاع سطح آب می‌شود.

۴- جبران بایاس ناشی از اختلاف سطح‌مبنای ارتفاعی ارتفاع‌سنج و نوسان‌نگار محلی

با توجه به اینکه سطح‌مبنای ارتفاعی داده‌های ارتفاع سنجی مأموریت مورد مطالعه بیضوی WGS۸۴ بوده [۳۰] و سطح‌مبنای داده‌های نوسان‌نگار مورد استفاده محلی است، با استفاده از میانگین دو سری زمانی، اختلاف این دو سطح‌مبنا جبران شد.

۵- ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب هر گذر حاصل از روش‌های ذکر شده نسبت به سری زمانی حاصل از مشاهدات نوسان‌نگار محلی با استفاده از پارامتر جزر خطای مربعی متوسط ($RMSE^2$) (رابطه (۱۵)) به عنوان شاخص معرفی کننده صحت نتایج صورت پذیرفت. برای بررسی میزان بهبود رویکردهای مورد استفاده نسبت به داده‌های سطح دو از پارامتر درصد بهبود

^۱ Cycle

^۲ Root Mean Square Error

^۳ Improvement percentage

جدول ۳: آنالیز شکل موج‌های چند پیکی

۱۰ کیلومتر			۲ کیلومتر			فاصله تا ساحل
۴۶۸	۱۳۹	۲۵	۴۶۸	۱۳۹	۲۵	پارامتر/گذر
۴۱۶	۳۹۱	۹۸۲	۷۴	۱۲۳	۲۹۵	کل شکل موج‌ها
۵۰	۵۸	۶۲۹	۲۰	۳۳	۲۰۹	شکل موج‌های چند پیکی
۱۲	۱۵	۶۴	۲۷	۲۷	۷۱	درصد (%)

گذر درصد شکل موج‌های چندپیکی نسبت به گذر ۲۵ بسیار کم‌تر است.

در جدول (۴) نتایج عددی ارزیابی سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو در مقایسه با نوسان‌نگار محلی با پارامتر $RMSE$ ارائه شده است.

طبق جدول (۳) گذر ۲۵ در هر دو فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری ساحل درصد شکل موج‌های چندپیکی قابل توجهی دارد که نشان می‌دهد ارتفاع‌سنج در هر دو فاصله در این گذر تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرار گرفته است ولی در دو گذر دیگر در فاصله ۱۰ کیلومتری تعداد شکل موج‌های چندپیکی کم است. همچنین در فاصله ۲ کیلومتری نیز در این دو

جدول ۴: مقدار $RMSE(cm)$ سری زمانی ارتفاع سطح آب به‌دست‌آمده از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو در گذرهای انتخابی

۱۰ کیلومتر			۲ کیلومتر			فاصله تا ساحل
۴۶۸	۱۳۹	۲۵	۴۶۸	۱۳۹	۲۵	بازتعقیب‌گر/گذر
۱۳	۱۲	۳۲	۱۶	۲۷	۵۲	شیفت مرکز ثقل
۱۶	۱۴	۳۹	۱۶	۲۲	۱۶۵	اقیانوسی
۲۶	۲۸	۵۷	۲۵	۲۶۹	-	سی-آیس
۱۴	۱۲	۳۷	-	-	۵۱	آیس-شیت
۴۸	۷۵	۴۰	۴۸	۲۲۲	۳۹	تعقیب‌گر

پیش‌فرض‌های این بازتعقیب‌گر همخوانی بیشتری دارد. همچنین در این فاصله نتایج نشان می‌دهد بازتعقیب‌گرهای آیس-شیت در دو گذر ۱۳۹ و ۴۶۸، سی-آیس در گذر ۲۵ فاقد اطلاعات ارتفاعی هستند لذا در این فاصله نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در فاصله ۱۰ کیلومتری ساحل بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل بهترین عملکرد را در سه گذر ۴۶۸، ۱۳۹، ۲۵ با مقادیر $RMSE$ به ترتیب ۳۲، ۱۲ و ۱۳ سانتی‌متر در میان بازتعقیب‌گرهای دیگر داشته است که نشان می‌دهد شکل موج‌های این سه گذر در این فاصله همخوانی بیشتری با پیش‌فرض‌های این الگوریتم دارند.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد، بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو در فاصله ۲ کیلومتری ساحل در گذر ۲۵ عملکرد خوبی ندارند. به‌طوری‌که تعقیب‌گر ماهواره که بر مبنای گیت اسمی شکل موج به محاسبه فاصله تا سطح می‌پردازد با مقدار $RMSE$ ۳۹ سانتی‌متر عملکرد بهتری دارد. در گذر ۱۳۹ بازتعقیب اقیانوسی با مقدار $RMSE$ ۲۲ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ بازتعقیب شیفت مرکز ثقل و اقیانوسی با مقدار $RMSE$ ۱۶ سانتی‌متر نتایج بهتری حاصل کرده‌اند دلیل بهتر عمل کردن بازتعقیب‌گر اقیانوسی در این دو گذر تعداد پایین شکل موج‌های چندپیکی است که در این صورت با

معنادار با مقادیر آستانه ۱۰ تا ۹۰ درصد را ارائه می‌دهد.

جدول (۵) مقادیر $RMSE$ سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب به‌دست‌آمده از الگوریتم حد آستانه با رویکردهای اعمال این الگوریتم بر کل شکل موج و اولین موجک

جدول ۵: مقدار $RMSE(cm)$ سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب به‌دست‌آمده از اعمال الگوریتم بازتعقیب حد آستانه بر کل شکل موج و اولین موجک معنادار با مقادیر آستانه مختلف در گذرهای انتخابی ($RMSE: First\ sub-waveform/Full\ waveform$)

۱۰ کیلومتر			۲ کیلومتر			فاصله تا ساحل
۴۶۸	۱۳۹	۲۵	۴۶۸	۱۳۹	۲۵	حد آستانه (%/گذر)
۱۴/۱۴	۱۵/۲۸۸	۲۱/۵۴	۳۱/۵۷۱	۱۸/۳۵۳	۲۰/۴۹	۱۰
۱۵/۱۵	۱۴/۵۶	۲۱/۳۱	۱۳/۴۳۷	۱۶/۳۲۱	۱۹/۵۰	۲۰
۱۴/۱۴	۱۳/۳۸	۲۰/۲۶	۱۳/۲۹۳	۱۶/۲۲۹	۲۱/۵۱	۳۰
۱۴/۱۴	۱۴/۱۴	۲۰/۲۸	۱۱/۱۳۲	۱۵/۸۶	۲۸/۲۶	۴۰
۱۵/۱۳	۱۳/۱۳	۲۰/۲۹	۱۲/۱۱۵	۱۵/۲۱	۳۰/۲۶	۵۰
۱۴/۱۴	۱۳/۱۲	۲۰/۳۱	۱۲/۳۳	۱۵/۲۱	۳۰/۳۸	۶۰
۱۵/۱۴	۱۲/۱۲	۱۹/۳۲	۱۲/۱۶	۱۵/۲۸	۳۰/۴۶	۷۰
۱۶/۱۳	۱۲/۱۲	۱۹/۳۲	۱۲/۱۵	۱۶/۲۶	۲۹/۵۲	۸۰
۱۵/۱۳	۱۱/۱۲	۱۸/۳۲	۱۱/۱۵	۱۷/۲۶	۲۹/۵۲	۹۰

۹۰٪ با مقدار $RMSE$ ۱۲ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ به ازای ۵۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ با $RMSE$ ۱۳ سانتی‌متر حاصل شده است؛ همچنین نتیجه بهینه با رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه در گذر ۲۵ به ازای آستانه ۹۰٪ با $RMSE$ ۱۸ سانتی‌متر، در گذر ۱۳۹ به ازای آستانه ۹۰٪ با مقدار $RMSE$ ۱۱ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ به ازای آستانه‌های ۱۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ با $RMSE$ ۱۴ سانتی‌متر حاصل شده است.

جدول (۶) مقادیر $RMSE$ سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب بهینه به‌دست‌آمده از رویکردهای پردازش داده سطح دو، بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه به همراه درصد بهبودهای حاصل شده از رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار نسبت به رویکرد کل شکل موج و پردازش داده سطح دو را ارائه می‌دهد.

نتایج جدول (۵) در فاصله ۲ کیلومتری نشان می‌دهد: نتیجه بهینه با رویکرد بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه در گذر ۲۵ به ازای آستانه‌های ۴۰٪ و ۵۰٪ با $RMSE$ ۲۶ سانتی‌متر، در گذر ۱۳۹ به ازای ۵۰٪ و ۶۰٪ با مقدار $RMSE$ ۲۱ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ به ازای ۸۰٪ و ۹۰٪ با $RMSE$ ۱۵ سانتی‌متر حاصل شده است؛ همچنین نتیجه بهینه با رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه در گذر ۲۵ به ازای آستانه ۲۰٪ با $RMSE$ ۱۹ سانتی‌متر، در گذر ۱۳۹ به ازای آستانه‌های ۴۰٪ تا ۷۰٪ با مقدار $RMSE$ ۱۵ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ به ازای آستانه‌های ۴۰٪ و ۹۰٪ با $RMSE$ ۱۱ سانتی‌متر حاصل شده است.

در فاصله ۱۰ کیلومتری: نتیجه بهینه با رویکرد بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه در گذر ۲۵ به ازای آستانه ۳۰٪ با $RMSE$ ۲۶ سانتی‌متر، در گذر ۱۳۹ به ازای آستانه‌های ۶۰٪ تا

جدول ۶: مقدار $RMSE$ (cm) سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب بهینه حاصل از پردازش داده سطح دو و رویکردهای بازتعقیب کل

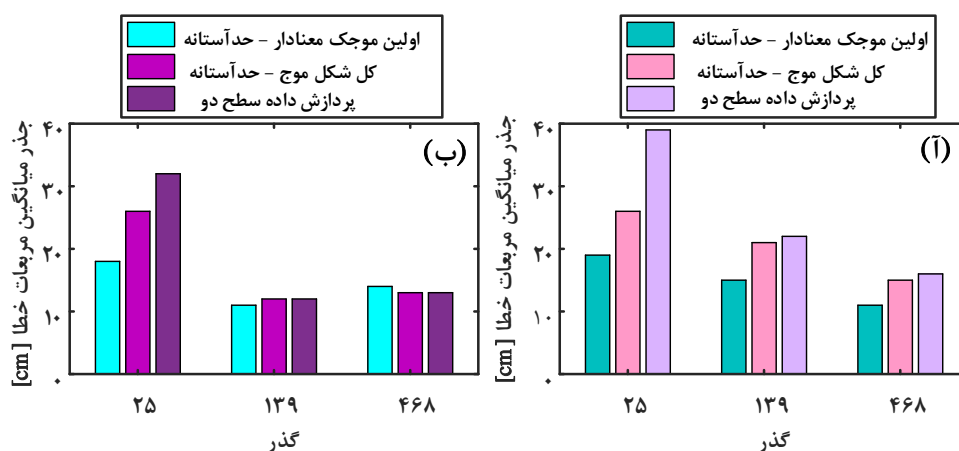
شکل موج و اولین موجک معنادار با الگوریتم حد آستانه

فاصله تا ساحل			۲ کیلومتر			۱۰ کیلومتر		
بازتعقیب گر/گذر	۲۵	۱۳۹	۴۶۸	۲۵	۱۳۹	۴۶۸	۲۵	۱۳۹
سطح دو	۳۹	۲۲	۱۶	۳۲	۱۲	۱۳	۳۲	۱۲
کل شکل موج	۲۶	۲۱	۱۵	۲۶	۱۲	۱۳	۲۶	۱۲
اولین موجک معنادار	۱۹	۱۵	۱۱	۱۸	۱۱	۱۴	۱۸	۱۱
درصد بهبود (٪) (کل شکل موج)	۲۷	۲۹	۲۷	۳۱	۸	-۸	۳۱	۸
درصد بهبود (٪) (سطح دو)	۵۱	۳۲	۳۱	۴۴	۸	-۸	۴۴	۸

است. همچنین نتایج نشان می‌دهد رویکرد بازتعقیب کل شکل موج نیز با استفاده از الگوریتم حد آستانه در فاصله ۲ کیلومتری ساحل، در گذرهای ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ صحت سری زمانی سطح آب را به ترتیب ۱، ۱۳ و ۱ سانتی‌متر نسبت به پردازش داده‌های سطح دو بهبود داده است. و در فاصله ۱۰ کیلومتری در گذر ۲۵ سبب بهبود ۶ سانتی‌متر و در دو گذر دیگر نتایجی یکسان با پردازش داده سطح دو حاصل کرده است.

نمودارهای میله‌ای نمایش داده‌شده در شکل (۸) به صورت بصری مقادیر $RMSE$ سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از سه رویکرد پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه، در سه گذر و در دو فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری از ساحل را نمایش می‌دهند.

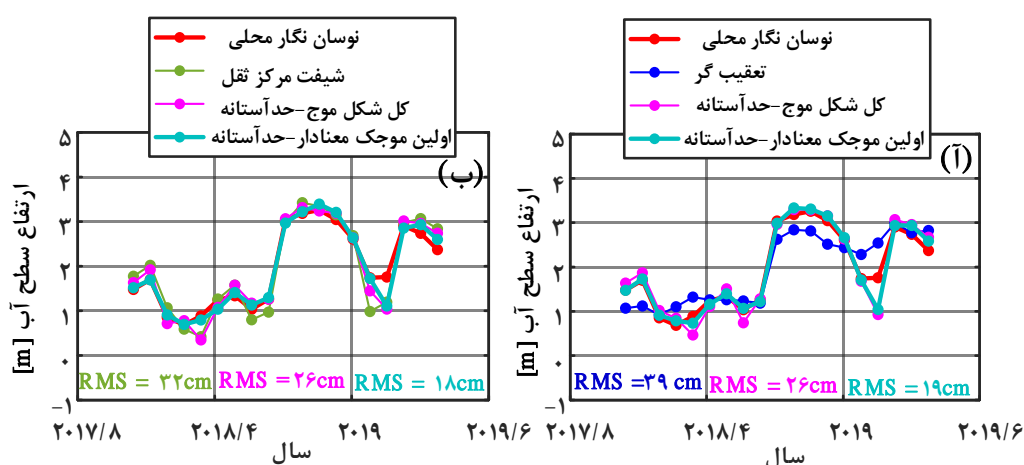
طبق جدول (۶)، نتایج نشان می‌دهد رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه در فاصله ۲ کیلومتری ساحل در هر سه گذر ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ مقدار $RMSE$ را نسبت به بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه به ترتیب ۲۷٪، ۲۹٪ و ۳۱٪ و نسبت به داده سطح دو به ترتیب ۵۱٪، ۳۲٪ و ۳۱٪ بهبود داده است. در فاصله ۱۰ کیلومتری ساحل نیز این رویکرد در دو گذر ۲۵ و ۱۳۹ مقدار $RMSE$ را نسبت به بازتعقیب کل شکل موج با استفاده از بازتعقیب حد آستانه به ترتیب ۳۱٪ و ۸٪ و نسبت به داده سطح دو به ترتیب ۴۴٪ و ۸٪ بهبود داده است. لازم به ذکر است در دو گذر ۱۳۹ و ۴۶۸ در فاصله ۱۰ کیلومتری ساحل به دلیل درصد پایین شکل موج‌های چندپیکی نتایج مشابهی در هر سه رویکرد حاصل شده



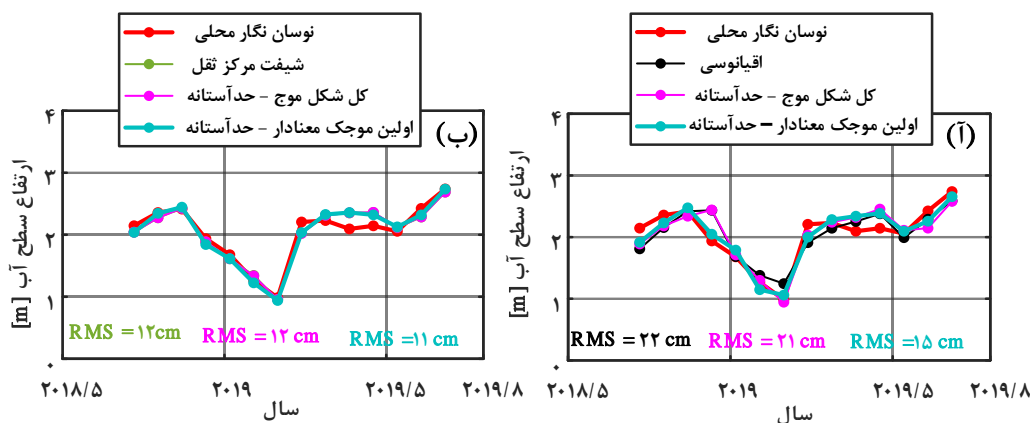
شکل ۸: مقدار $RMSE$ (cm) سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب در سه گذر انتخابی (الف) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل

از ساحل کاملاً مشهود است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) سازگاری در فاصله ۲ کیلومتری از ساحل به خوبی نمایان است به این دلیل که در فاصله ۱۰ کیلومتری از ساحل به سبب درصد شکل موج‌های چندپیکی پایین رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار با دو رویکرد دیگر یعنی پردازش داده‌های سطح دو و بازتعقیب کل شکل موج نتایج مشابه حاصل کرده است.

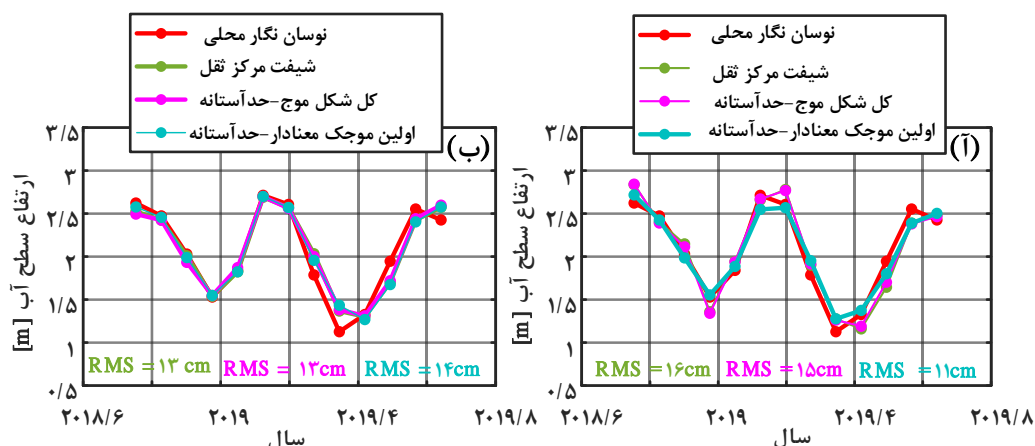
شکل‌های (۹) الی (۱۱) سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب بهینه به ازای سه رویکرد انجام‌شده در این پژوهش در فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری ساحل را نشان می‌دهند. همان‌طور که در اشکال گویا است، سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب که از رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار حاصل شده‌اند، سازگاری بیشتری با سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از نوسان نگار محلی دارند. در شکل (۹-الف) و (۹-ب) این سازگاری در هر دو فاصله



شکل ۹: سری‌های زمانی بهینه ارتفاع سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب اولین موجک معنادار و بازتعقیب کل شکل موج در گذر ۲، ۵ (آ) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل



شکل ۱۰: سری‌های زمانی بهینه ارتفاع سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب اولین موجک معنادار و بازتعقیب کل شکل موج در گذر ۱، ۳۹ (آ) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل



شکل ۱۱: سری‌های زمانی بهینه ارتفاع سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب اولین موجک معنادار و بازتعقیب کل شکل موج در گذر ۴۶۸، (آ) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل

۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

خلیج فارس از نظر اقتصادی، سیاسی و نظامی یک آبراه مهم در جهان بشمار می‌آید، همچنین جمعیت زیادی را در سواحل خود جای داده است، لذا پایش ارتفاعی سطح آب در این ناحیه ضروری است. از این‌رو در این پژوهش پایش ارتفاعی سطح آب در مناطق ساحلی خلیج فارس در بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۱/۱۷ الی ۲۰۱۹/۰۹/۲۷، صورت پذیرفت. برای این منظور از دو سطح داده یک و دو ارتفاع سنج ماهواره سنتینل-۳ که کل کره زمین را در حالت رادار با دریچه مصنوعی پوشش می‌دهد، استفاده شد. ۳ گذر ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ با توجه به نزدیک بودن گذر زمینی ارتفاع سنج به ایستگاه‌های نوسان نگار محلی بندر بوشهر و کنگان در این منطقه برای پردازش انتخاب شدند.

جهت محاسبه ارتفاع سطح آب، داده‌های ارتفاع سنجی سطح دو و یک با رویکردهای بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با الگوریتم حد آستانه پردازش شدند. از آنجایی که رسالت رویکرد بازتعقیب موجک‌های معنادار در شکل موج برخورد با شکل موج‌های چند-پیکی است لذا در این پژوهش توانایی این رویکرد در مناطقی بسیار نزدیک به ساحل (۲ و ۱۰ کیلومتر) جایی که عوامل مغشوش‌کننده شکل موج وجود دارد بررسی شده است. سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل

از این رویکردها با داده‌های نوسان نگار محلی و پارامتر $RMSE$ ارزیابی شد. خلاصه نتایج را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- نتایج پردازش داده‌های سطح دو در فاصله دو کیلومتری برای گذر ۲۵ نشان داد که این بازتعقیب‌گرها توانایی بازیابی ارتفاع سطح آب در این گذر با درصد شکل موج‌های چند-پیکی زیاد (۷۱٪) را ندارند. چه‌بسا در این فاصله ارتفاع سطح آب حاصل از تعقیب‌گر ماهواره از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو بهتر عمل کرده است؛ لذا می‌توان استنتاج کرد که لزوماً هر بازتعقیب‌گری سبب بهبود صحت سری زمانی ارتفاع سطح آب نمی‌شود.
- در فاصله ۱۰ کیلومتری ساحل بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل موجود در داده سطح دو در هر سه گذر نتایج بهینه نسبت به سایر بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو حاصل کرده است که می‌توان استدلال کرد شکل موج‌ها در این فاصله همخوانی بیشتری با پیش‌فرض‌های این الگوریتم دارند.
- رویکرد اولین موجک معنادار در فاصله ۲ کیلومتری از ساحل در هر سه گذر ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ با درصد شکل موج‌های چندپیکی قابل توجه (به ترتیب ۷۱٪، ۲۷٪ و ۲۷٪) از دو رویکرد دیگر بهتر عمل

در فاصله ۱۰ کیلومتری رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادر در دو گذر ۱۳۹ و ۴۶۸ با دو رویکرد دیگر نتایج مشابهی حاصل کرده است که این امر به دلیل درصد پایین شکل موج‌های چندپیکی در دو گذر (به ترتیب ۱۵٪ و ۱۲٪) است. البته استفاده از الگوریتم‌های بازتعقیب دیگر نظیر ساموسا [۱۰] در این دو گذر ممکن است نتایج را بهبود دهد.

کرده و مقدار $RMSE$ را به‌طور قابل‌توجهی نسبت به داده سطح دو به ترتیب ۵۱٪، ۳۲٪ و ۳۱٪ بهبود داده است در فاصله ۱۰ کیلومتری نیز در گذر ۲۵ با توجه به درصد شکل موج‌های قابل‌توجه (۶۴٪) نسبت به دو رویکرد دیگر بهتر عمل کرده است که این توانایی این رویکرد را در برخورد با شکل موج‌های چندپیکی نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] L. D. Wright, J. Syvitski, and C. R. Nichols, "Coastal systems in the Anthropocene", in *Tomorrow's Coasts: Complex and Impermanent*, ed: Springer, 2019, pp. 85-99.
- [2] J. Benveniste, A. Cazenave, S. Vignudelli, L. Fenoglio-Marc, R. Shah, R. Almar, et al., "Requirements for a Coastal Hazards Observing System", *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, p.348, 2019-July-17 2019.
- [3] P. Cipollini, F. M. Calafat, S. Jevrejeva, A. Melet, and P. Prandi, "Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges", *Surveys in Geophysics*, vol. 38, pp. 33-57, 2017/01/01 2017.
- [4] S. Roohi, A. Amini, B. Voosoghi, and D. Battles, "Lake Monitoring from a Combination of Multi Copernicus Missions: Sentinel-1 A and B and Sentinel-3A", *J Hydrogeol Hydrol Eng* 8:3, 2019.
- [5] G. Feng and S. Jin, "Sea level changes along global coasts from satellite altimetry, GPS and tide gauges", *Satellite positioning: methods, models and applications*. Rijeka, Croatia: InTech-Publisher, 2015, pp. 97-113.
- [6] G. Brown, "The average impulse response of a rough surface and its applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 25, pp. 67-74, 1977.
- [7] S. Vignudelli, F. Birol, J. Benveniste, L.-L. Fu, N. Picot, M. Raynal, et al., "Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone" *Surveys in Geophysics*, vol. 40, pp. 1319-1349, 2019/11/01 2019.
- [8] R. K. Raney, "The delay/Doppler radar altimeter" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, pp. 1578-1588, 1998.
- [9] Sentinel-3 and Team, *Sentinel-3 User Handbook*, EUMETSAT, 2013.
- [10] N. H. Idris, S. Vignudelli, and X. Deng, "Assessment of retracked sea levels from Sentinel-3A Synthetic Aperture Radar (SAR) mode altimetry over the marginal seas at Southeast Asia" *International Journal of Remote Sensing*, vol. 42, pp. 1535-1555, 2021/02/16 2021.
- [11] C. Gommenginger, P. Thibaut, L. Fenoglio-Marc, G. Quartly, X. Deng, J. Gómez-Enri, et al., "Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts" in *Coastal Altimetry*, S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 61-101.
- [12] Wingham, D. J., C. G. Rapley, and H. Griffiths. "New techniques in satellite altimeter tracking systems", In *Proceedings of IGARSS*, vol. 86, pp. 1339-1344. 1986.
- [13] C. H. Davis, "Growth of the Greenland ice sheet: a performance assessment of altimeter retracking algorithms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 1108-1116, 1995.

- [14] C. H. Davis, "A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeters", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 974-979, 1997.
- [15] C. Hwang, J. Guo, X. Deng, H.-Y. Hsu, and Y. Liu, "Coastal Gravity Anomalies from Retracked Geosat/GM Altimetry: Improvement, Limitation and the Role of Airborne Gravity Data", *Journal of Geodesy*, vol. 80, pp. 204-216, 2006/07/01 2006.
- [16] H. Lee, C. K. Shum, W. Emery, S. Calmant, X. Deng, C.-Y. Kuo, et al., "Validation of Jason-2 Altimeter Data by Waveform Retracking over California Coastal Ocean", *Marine Geodesy*, vol. 33, pp. 304-316, 2010/08/16 2010.
- [17] J. Guo, Y. Gao, C. Hwang, and J. Sun, "A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans", *Science China Earth Sciences*, vol. 53, pp. 610-616, 2010/04/01 2010.
- [18] L. Yang, M. Lin, Q. Liu, and D. Pan, "A coastal altimetry retracking strategy based on waveform classification and sub-waveform extraction", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 33, pp. 7806-7819, 2012/12/20 2012.
- [19] R. Arabsahebi, B. Voosoghi, and M. J. Tourian, "The Inflection-Point Retracking Algorithm: Improved Jason-2 Sea Surface Heights in the Strait of Hormuz", *Marine Geodesy*, vol. 41, pp. 331-352, 2018/07/04 2018.
- [20] S. Roohi, N. Sneeuw, J. Benveniste, S. Dinardo, E. A. Issawy, and G. Zhang, "Evaluation of CryoSat-2 water level derived from different retracking scenarios over selected inland water bodies", *Advances in Space Research*, vol. 68, pp. 947-962, 2019/07/02/ 2019.
- [21] M. Khaki, E. Forootan, M. A. Sharifi, and A. Safari, "Using new approach 'ExtR method' to retrack satellite radar altimetry; case study: Persian Gulf", *Journal of the Earth and Space Physics*, vol. 41, pp. 257-271, 2015.
- [22] K. Lari and M. Abrehdary, "Combination T/P and Jason-1 satellite altimetry data for determination of sea surface topography in Persian Gulf and Oman Sea", *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 11, pp. 31-41, 2012.
- [23] E. Forootan, R. Rietbroek, J. Kusche, M. A. Sharifi, J. L. Awange, M. Schmidt, et al., "Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, pp. 580-595, 2014/01/01/ 2014.
- [24] Christopher G. Piecuch, Ichiro Fukumori, and R. M. Ponte, "Intraseasonal Sea-Level Variability in the Persian Gulf", *Earth and Space Science Open Archive*, 2020.
- [25] S. Vignudelli, A. Scozzari, R. Abileah, J. Gómez-Enri, J. Benveniste, and P. Cipollini, "Chapter Four - Water surface elevation in coastal and inland waters using satellite radar altimetry", in *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment*, V. Maggioni and C. Massari, Eds., ed: Elsevier, 2019, pp. 87-127.
- [26] R. Arabsahebi, B. voosoghi, and M.-J. Tourian, "Sensitivity Analysis of Brown Model Waveform in Radar Altimetry", *Journal of Geospatial Information Technology*, vol. 8, pp. 21-38, 2020.
- [27] D. Chelton, J. Ries, B. Haines, L. Fu, and P. Callahan, "Satellite Altimetry", In *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A*

Handbook for Techniques and Applications. Edited by L.-L. Fu and A. Cazenave, ed: Academic Press, San Diego, 2001, pp. 1-122.

[28]N. H. Idris, "Regional validation of the Coastal Altimetry Waveform Retracking Expert System (CAWRES) over the largest archipelago in Southeast Asian seas", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 41, pp. 5680-5694, 2020/08/02 2020.

[29]J. Yuan, J. Guo, Y. Niu, C. Zhu, Z. Li, and X. Liu, "Denoising Effect of Jason-1 Altimeter Waveforms with Singular Spectrum Analysis: A Case Study of Modelling Mean Sea Surface Height over South China Sea", *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, p. 426, 2020.

[30]Satellites CL. *Surface Topography Mission (STM) Sral/Mwr L2 Algorithms Definition, Accuracy and Specification. S3PAD-RS-CLS-SD03-00017; 2011.*

[31]Roohi, S., "Capability of pulse-limited satellite radar altimetry to monitor inland water bodies" *Master Thesis, University of Stuttgart, 2015.*

[32]D. Ganguly, S. Chander, S. Desai, and P. Chauhan, "A Subwaveform-Based Retracker for Multipeak Waveforms: A Case Study over Ukai Dam/Reservoir", *Marine Geodesy*, vol. 38, pp. 581-596, 2015/09/10 2015.

[33]A. Amini, P. Agar, M. Mostafavi, A. Sabilian, and S. Roohi, "A New Approach of Waveform Re-Tracking for Monitoring Sea Surface Topography in the Strait of Hormuz", presented at the Modern

Geomatics Technologies and Applications Conference ,Tabriz,Iran,2021

[34]A. Amini, "Monitoring lakes water variations using satellite altimetry observations and radar SAR images", *Master Thesis, Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology, 2019.*



Evaluation of the First Sub-waveform Re-tracking method to improve the accuracy of satellite altimetry observations in coastal areas (Case Study: Coastal Area of the Persian Gulf)

Parisa Agar^{1*}, Behzad Voosoghi², Shirzad Roohi³, Arash Amini⁴

1- M.sc Student of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor in Department of Geomatics Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Graduated in Master Degree, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

Radar satellite is a kind of remote sensing techniques for monitoring water bodies. In coastal areas due to the presence of non-water objects inside the footprint, the radar waveforms are deviated from the so-called ocean model, i.e. Brown shape. This makes the ranges and consequently water level measurements erroneous. Therefore, re-tracking the waveforms in this area is necessary to provide reliable products. In this study, water level variations at 2 and 10 km distance from the coast from 2018/01/17 to 2019/09/27 have been investigated. To this end, L2 and L1b data of SRAL altimeter sensor of Sentinel-3 along the tracks of 25,139 and 468 have been used. We estimated the water level variation from re-tracking the first meaningful sub-waveform, from re-tracking the whole waveform with the threshold re-tracker and from L2 products. These water levels have been validated against in-situ gauge data from Boshahr and Kangan tide gauge stations. We found that at 2 km distance from the coast, the re-tracking of the first meaningful sub-waveform with an improvement of RMSE of 27%, 29% and 27% with respect to the re-tracking the whole waveform shows a better performance for the three mentioned tracks (with 71%, 27% and 27% multi-peak waveforms) respectively. The RMSEs improvement of this scenario are about 51%, 32% and 31% with respect to the L2 products for the three tracks. At 10 km from the coast, over tracks of 25 and 139 with 64% and 15% multi-peak waveforms, the first sub-waveform scenario has an improvement of 31% and 8% with respect to the whole waveform scenario. It outperforms the L2 products with an improvement of 44% and 8% for these two tracks respectively at this distance from the cost. In the case of track 468 due to the lower number of multi-peak waveforms (about 12%) we came up with the same result for L1b and L2 products. While the results express the necessity of re-tracking coastal waveforms, they introduce the optimal performance of the first meaningful sub-waveform re-tracking.

Key words: Radar Altimeter, Sentinel-3, Coastal area, SAR, First meaningful Sub-waveform Re-tracking.