نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱

Vol.10, No.4, Winter 2023

۱۷ -۳۷

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]

[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

ارزیابی روش بازتعقیب اولین موجک شکل موج به‌منظور بهبود صحت مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق ساحلی (مطالعه موردی: منطقه ساحلی خلیج‌فارس)

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 خلیج‌فارس 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 چند پیکی به ترتیب ۶۴٪، 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 حاصل‌شده 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: ۰۲۱-۸۸۷۸۶۲۱۲

Email: parisaagar1995@email.kntu.ac.ir

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*[۱]) افزایش می‌یابند. ازاین‌رو 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*[۶])، پیشرفت چشمگیری در بحث ارتفاع‌سنجی ساحلی حاصل‌شده است. این فن‌آوری برای اولین بار بر روی ارتفاع‌سنج کرایوست-۲[۷] در سال ۲۰۱۰ و پس‌ازآن در سال ۲۰۱۶ بر روی ماهواره سنتینل-۳ ارائه شد. این ارتفاع‌سنج‌ها که به ارتفاع‌سنج‌های تأخیر داپلر (*DDA*[۸]) 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 هرکدام از این پالس‌ها بخشی از ردپا ارتفاع‌سنج را برداشت کرده و به ارتفاع‌سنج منعکس می‌شوند. با توجه به ثبت فرکانس‌های داپلر متفاوت برای هرکدام، 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 (*LRM*[۱۴]) که در فاصله ۱۰-۷ 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،

---

۱ *Sea Surface Height*
۲ *Remote sensing*
۳ *Footprint*
۴ *Brown*
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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

وقتی مسیر زمینی ماهواره عمود بر خط ساحلی باشد، برخلاف ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم احتمال آلودگی ردپا ارتفاع‌سنج به خشکی کاهش می‌یابد. از دیگر ویژگی‌های این ارتفاع‌سنج‌ها نیز می‌توان به فرکانس تکرار پالس بالا[۱] و برداشت چندمنظری[۲] آن‌ها اشاره کرد که به‌تبع افزایش تعداد مشاهدات و دقت را به همراه خواهد داشت. با توجه به این‌که قدرت تفکیک مکانی در عرض برداشت کماکان مانند ارتفاع‌سنج‌های 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 ازاین‌رو 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 بازتاب‌دهنده به بازتعقیب شکل موج می‌پردازند. بااین‌وجود روش‌های تجربی صرفا شکل ظاهری شکل موج را در نظر گرفته و خصوصیات فیزیکی سطح بازتاب‌دهنده را در محاسبات خود دخیل نمی‌کنند. الگوریتم‌های تجربی نیز خود به دودسته تقسیم می‌شوند. دسته اول الگوریتم‌هایی هستند که رویکردی کاملا 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 الگوریتم بازتعقیب حدآستانه[۴] توسط داویس و همکاران ارائه شد. این الگوریتم رویکردی کاملاً آماری دارد و بر مبنای ابعاد مستطیل تعریف‌شده توسط الگوریتم شیفت مرکز ثقل به بازتعقیب شکل موج می‌پردازد [۱۳]. داویس و همکاران در سال ۱۹۹۷ با استفاده از شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع‌سنج 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 بهبودیافته[۶] که بر مبنای بازتعقیب موجک‌های معنادار[۷] در شکل موج است را با استفاده از شکل موج‌های ارتفاع‌سنج ژئوست برای محاسبه آنامولی[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 اصلاح‌شده[۱۰] که بر مبنای بازتعقیب بر اساس مقدار کمینه و بیشینه توان در لبه پیشین شکل موج است با استفاده از ۴ گذر ارتفاع‌سنج جیسون-۲[۱۱] به مطالعه ارتفاع سطح آب در مناطق ساحلی کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد این الگوریتم نسبت به بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو[۱۲] و

---

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

همچنین بازتعقیب حد آستانه در مناطق کم‌عمق ساحلی بهتر عمل می‌کند [۱۶]. گو و همکاران برای بهبود کیفیت داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره ژئوست برای بازیابی آنامولی جاذبه در اطراف جزیره تایوان رویکرد بازتعقیب پارامتری چندموجکی (*MSPR*[۱]) 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 ارتفاع‌سنج جیسون-۱، رویکرد بازتعقیب اقیانوسی-سی-اس[۲] را ارائه دادند. این رویکرد که بر مبنای طبقه‌بندی شکل موج به شکل موج‌های اقیانوسی و ساحلی با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده 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 نوسان‌نگار محلی و بویه[۳] برتری این رویکرد نسبت به الگوریتم‌های بازتعقیب شیفت مرکز ثقل، بتا-۵، حد آستانه و بازتعقیب‌گرهای اقیانوسی و آیس-۲[۴] موجود در داده سطح دو در هر دو اقیانوس عمیق و کم‌عمق 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 بازتعقیب‌گر *ALES*[۵] موجود در داده سطح دو نیز برای محاسبه ارتفاع سطح آب استفاده کردند. نتایج برتری رویکرد ارائه‌شده را به‌خصوص 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 ارتفاع‌سنج کرایوست-۲ موردمطالعه قراردادند. در این پژوهش رویکرد میانگین بازتعقیب موجک‌های معنادار[۶] در یک شکل موج معرفی شد و از الگوریتم‌های مختلف تجربی و فیزیکی برای باز تعقیب موجک‌های معنادار و همچنین کل شکل موج استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده 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. درحالی‌که در دریاچه‌های بزرگ بازتعقیب کل شکل موج منجر به نتایج بهتر می‌شود [۲۰].

مطالعاتی در خصوص پایش ارتفاعی سطح آب در مناطق ساحلی خلیج‌فارس انجام‌شده است [۲۱ و ۲۲] اما آن‌ها از مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی نسل قدیم، که ردپای آن‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرار می‌گیرند برای این منظور استفاده کرده‌اند. در پژوهش حاضر برای اولین بار از ارتفاع‌سنج رادار با دریچه مصنوعی مأموریت سنتینل-۳ با مزیت قدرت تفکیک مکانی بالا در امتداد برداشت (۳۰۰متر) برای پایش ارتفاعی سطح آب منطقه ساحلی خلیج-فارس استفاده‌شده 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. ازاین‌رو 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

[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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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 خلیج‌فارس 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*[۱]) مأموریت سنتینل-۳آ موردمطالعه قرارگرفته 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 استفاده‌شده است.

۲-۱- داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

مأموریت سنتینل-۳آ 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-۳آ 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 مایکروویو برای تصحیح تأخیر ناشی از تروپسفر 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*) استفاده‌شده 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

[۱] *SAR Radar Altimeter*
[۲] *European Space Agency*
[۳] *European Org. for the Exploitation of Meteorological Satellites*
[۴] *SAR Radar Altimeter*
[۵] *Precise orbit determination*
[۶] *Global Navigation Satellite System*
[۷] *DORIS*
[۸] *Laser Retro-Reflector*
[۹] *Multi-look tracking*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

۲-۲- داده‌های نوسان‌نگار محلی

جهت ارزیابی صحت ارتفاع سطح آب حاصل از مأموریت ارتفاع‌سنجی از داده‌های نوسان‌نگار محلی ایستگاه بندر بوشهر و کنگان استفاده‌شده است. ازآنجایی‌که نرخ برداشت این نوسان‌نگارها هر ۱۵ دقیقه و نرخ برداشت ارتفاع‌سنج ماهواره سنتینل-۳آ 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 نوسان‌نگار ها چندین بار در روز به برداشت داده می‌پردازند. ازاین‌رو 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.

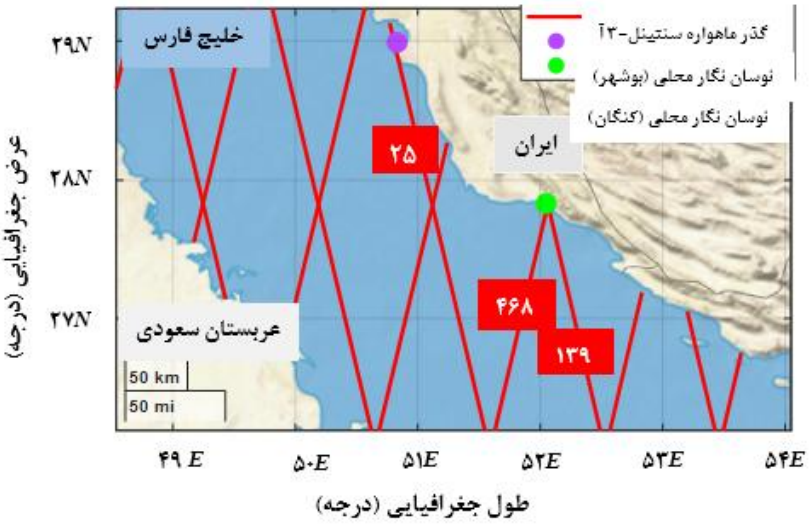
جدول ۲: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های نوسان‌نگار محلی مستقر در خلیج‌فارس

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

خلیج‌فارس یک محیط آبی نیمه بسته است که از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به دریای عرب متصل می‌شود. خلیج‌فارس 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 به‌طوری‌که 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]. خلیج‌فارس به دلیل داشتن ذخایر نفت و گاز ازنظر 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 جای‌داده است که در معرض طغیان ناشی از افزایش ارتفاع سطح آب قرار دارند [۲۴]. در این پژوهش آب‌های سواحل شمالی خلیج‌فارس، جایی که ایران قرار دارد در فواصل ۲ و ۱۰ کیلومتری از ساحل برای مطالعه انتخاب‌شده‌اند. 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 مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]



شکل ۱: موقعیت گذرهای انتخابی مأموریت سنتینل-۳آ و نوسان‌نگار های محلی در منطقه ساحلی خلیج‌فارس

۳-روش تحقیق

در این بخش ابتدا به مبانی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و سپس به رویکردهای مورداستفاده 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 به‌صورت پیوسته به سمت زمین می‌فرستند و توان‌های منعکس‌شده 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 جمع‌آوری‌شده 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 به‌تدریج 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. ازاین‌رو فاصله بین ارتفاع‌سنج و سطح آب از مدت‌زمان رفت‌وبرگشت پالس ارسالی و مقیاس با سرعت نور طبق رابطه (۱) برآورد می‌شود.

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

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

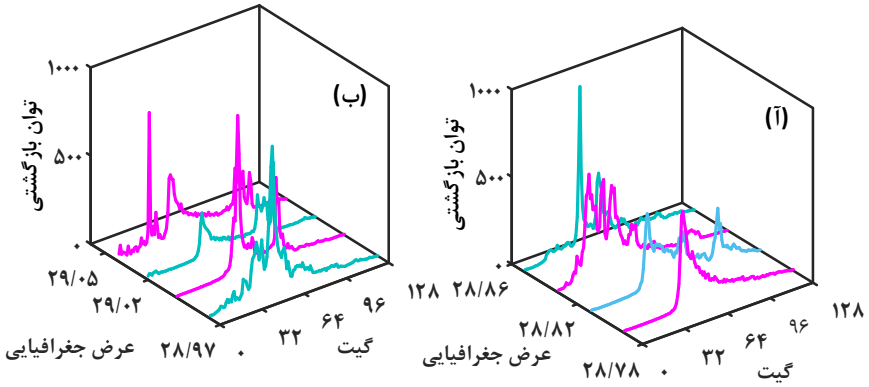
۳-۲- بازتعقیب شکل موج

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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

شکل (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب نمونه شکل موج‌های گذر ۱۳۹ و ۲۵ در فاصله ۲ کیلومتری سواحل خلیج‌فارس را نشان می‌دهند.



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

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] ارتفاع‌سنج گویند. در مناطق ساحلی به دلیل آلوده شدن ردپا ارتفاع‌سنج به خشکی و همچنین شرایط خاص این مناطق، شکل موج‌ها از مدل براون فاصله می‌گیرند؛ لذا گیت اسمی ارتفاع‌سنج دیگر معرف نقطه میانی لبه پیشین شکل موج نمی‌باشد. درنتیجه گیت اسمی منجر به فاصله نادرستی از سطح می‌شود. ازاین‌رو بازتعقیب شکل موج به‌منظور تعیین نقطه میانی لبه پیشین و اعمال تصحیح بازتعقیب[۳] به فاصله تعقیب‌گر[۴] ماهواره که بر مبنای گیت اسمی به‌دست‌آمده است، ضروری است [۷ و ۲۸].

تصحیح بازتعقیب C_{ret} از اختلاف بین گیت بازتعقیب شده[۵] و گیت اسمی ارتفاع‌سنج، با ضرب‌در عرض گیت نمونه‌برداری 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].

رابطه(۲)

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

درنهایت ارتفاع سطح دریا تصحیح‌شده SSH_{Corr} از رابطه (۳) به دست می‌آید.

رابطه(۳)

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

در رابطه (۳)، H ارتفاع مداری ماهواره نسبت به یک بیضوی مرجع، R فاصله حاصل از تعقیب‌گر ماهواره بر مبنای گیت اسمی ارتفاع‌سنج و ΔC مجموعه‌ای از تصحیحات شامل: تروپسفر 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- بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنج سرال

در داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنج سرال ۴ فاصله (فاصله بین ارتفاع‌سنج و سطح آب) حاصل از الگوریتم‌های بازتعقیب اقیانوسی[۱۰]، شیفت مرکز ثقل، آیس-شیت[۱۱] و

---

۱ *Mid point*
۲ *Nominal Gate*
۳ *Re-tracking correction*
۴ *Tracker*
۵ *Re-tracked Gate*
۶ *Sea State Bias*
۷ *Load tide*
۸ *Solid earth tide*
۹ *Pole*
۱۰ *Ocean*
۱۱ *Ice-sheet*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

و سی-آیس[1] ارائه‌شده است. بازتعقیب‌گر اقیانوسی موجود در داده‌های سطح دو سرال که مدل تغییریافته الگوریتم بازتعقیب ساموسا است مدل ریاضی شکل موج‌های حاصل از برداشت چندمنظری ارتفاع‌سنج‌های رادار با دریچه مصنوعی را توصیف می‌کند. مدل مذکور با در نظر گرفتن خصوصیات سطح بازتاب‌دهنده و مشخصات خود ارتفاع‌سنج تعریف می‌شود و درنهایت 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 طراحی‌شده‌اند بر اساس برازش کمترین مربعات یک مدل نیمه‌تحلیلی بافرم گوسی اصلاح‌شده[2] 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 تابع‌نمایی 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 ارائه‌شده توسط هوانگ در سال ۲۰۰۶ استفاده‌شده است [۱۵]. برای تعیین موجک‌های معنادار در یک شکل موج، ابتدا توان‌های تفاضلی یگانه و دوگانه و همچنین انحراف معیارهای آن‌ها طبق رابطه‌های (۴) الی (۷) محاسبه می‌شود.

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

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

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

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

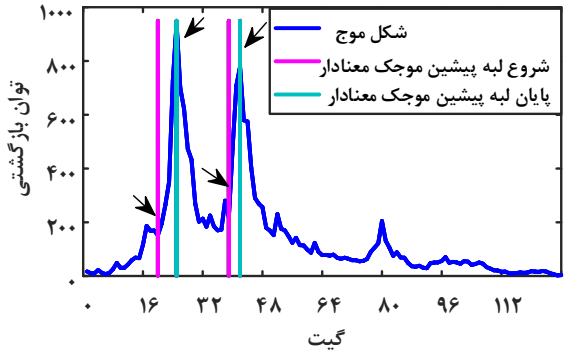
رابطه(۸)
$$E_1 = BS_1$$

رابطه(۹)
$$E_2 = CS_2$$

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 به‌عنوان 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 به‌عنوان 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 شناسایی‌شده موجک معنادار خواهد بود [۱۵]. شکل(۳) موجک‌های معنادار در گذر ۲۵ به همراه شروع و پایان لبه پیشین آن‌ها که به‌وسیله الگوریتم تشخیص موجک شناسایی‌شده است را نشان می‌دهد.

[1] *Sea-ice*
[2] *Modified gaussian*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]



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

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 به‌کارگیری حد آستانه‌های ۱۰ الی ۹۰ درصد با گام ده واحدی استفاده شد.

۳-۵-۱-بازتعقیب کل شکل موج

به‌عنوان اولین رویکرد مورداستفاده 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 تعریف‌شده 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.

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

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

$$Th = P_N + q(A - P_N)$$ رابطه(۱۲)

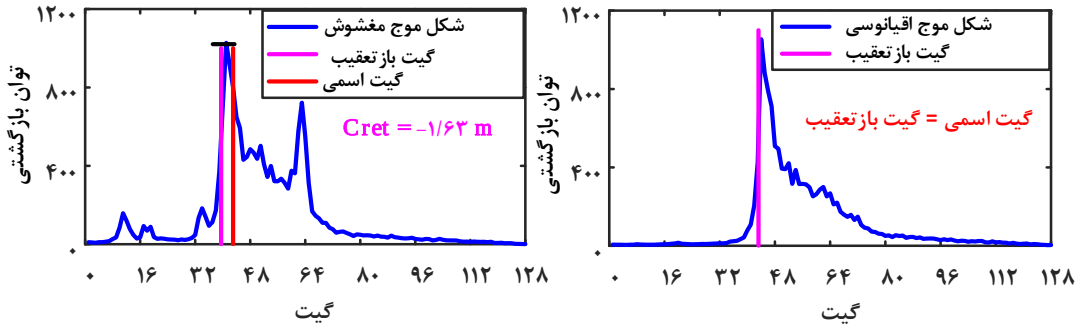
$$G_R = (K-1) + \frac{Th - P_{K-1}}{P_K - P_{K-1}}$$ رابطه(۱۳)

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[1] 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 بازتعقیب‌شده با الگوریتم حد آستانه با گیت بازتعقیب اسمی برابر است. ارتفاع‌سنج در این شکل موج تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرار نگرفته است. شکل (۴-ب) نمونه‌ای از شکل موج مغشوش را نشان می‌دهد که گیت اسمی ارتفاع‌سنج منطبق بر نقطه میانی لبه پیشین شکل موج نیست.

[1] *Aliasing*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]



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

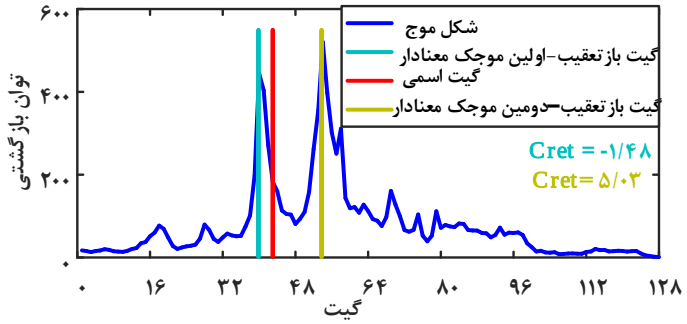
۳-۵-۲-بازتعقیب اولین موجک معنادار

برای هرکدام از موجک‌های معنادار شناسایی‌شده 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 آب های 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.

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

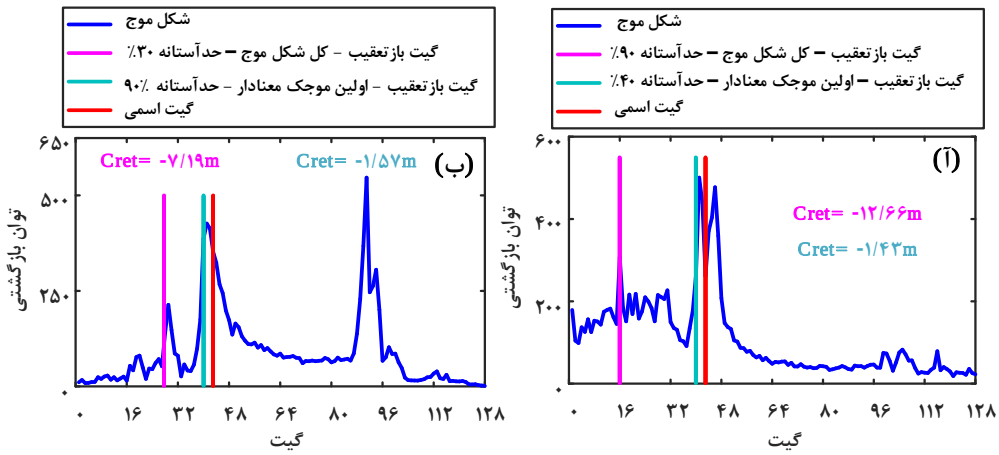
شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) گیت‌های بازتعقیب حاصل از دو رویکرد کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حدآستانه برای دو شکل موج از گذر های ۴۶۸ و ۲۵ را نمایش می‌دهند.

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



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]



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

۳-۶-محاسبه سری زمانی ارتفاع سطح آب و ارزیابی آن با نوسان‌نگار محلی

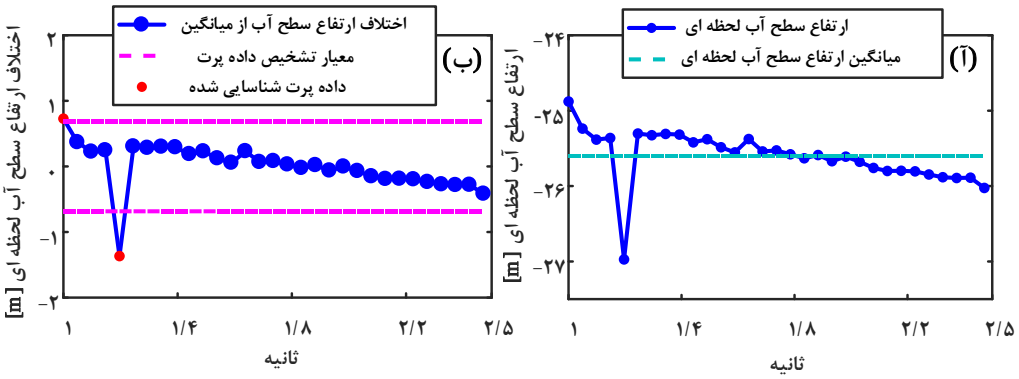
برای ایجاد یک سری زمانی از ارتفاع سطح آب و ارزیابی آن با سری زمانی ارتفاع سطح آب به‌دست‌آمده از مشاهدات نوسان‌نگار محلی مراحل ۱ تا ۵ در این پژوهش انجام‌شده است [۲۰ و ۳۱].

۱-تشکیل سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای

سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای برای هر گذر در هر دوره با استفاده از رویکردهای بازتعقیب شکل موج شرح داده شده در روش تحقیق و پردازش داده‌های سطح دو با بهره‌گیری از رابطه (۳) تشکیل شد. با این تفاوت که برای ایجاد سری زمانی از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو در رابطه (۳) تصحیح حاصل از بازتعقیب 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)).



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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 به‌جای میانگین این است که پارامتر میانه متأثر از مقادیر بسیار بزرگ یا بسیار کوچک در میان داده‌های موردبررسی نیست و چون در رویه بکار گرفته‌شده در این پژوهش و بسیاری از پژوهش‌های مرتبط، داده‌های ارتفاعی بخش نسبتاً بزرگی از گذر ماهواره به‌منظور افزایش تعداد مشاهدات (اعتمادپذیری بالاتر) در نظر گرفته‌شده 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 داده‌شده 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 موردمطالعه بیضوی *WGS۸۴* بوده [۳۰] و سطح‌مبنای داده‌های نوسان‌نگار مورداستفاده 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 ذکرشده نسبت به سری زمانی حاصل از مشاهدات نوسان‌نگار محلی با استفاده از پارامتر جزر خطای مربعی متوسط (*RMSE*[۲]) (رابطه (۱۵)) به‌عنوان شاخص معرفی کننده صحت نتایج صورت پذیرفت. برای بررسی میزان بهبود رویکردهای مورداستفاده نسبت به داده‌های سطح دو از پارامتر درصد بهبود (*IMP*[۳]) (رابطه (۱۶)) استفاده‌شده است.

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

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

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 ارائه‌شده است. ازآنجایی‌که رسالت رویکرد بازتعقیب موجک‌های معنادار برخورد با شکل موج‌های چندپیکی است، لذا برای بررسی کارایی این رویکرد، تحلیلی بر تعداد و درصد شکل موج های 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.

[۱] *Cycle*

[۲] *Root Mean Square Error*

[۳] *Improvement percentage*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

جدول ۳: آنالیز شکل موج‌های چند پیکی

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

طبق جدول (۳) گذر ۲۵ در هر دو فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری ساحل درصد شکل موج‌های چندپیکی قابل‌توجه ای دارد که نشان می‌دهد ارتفاع‌سنج در هر دو فاصله در این گذر تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرارگرفته 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 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.

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

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

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 پیش‌فرض‌های این بازتعقیب‌گر همخوانی بیشتری دارد. همچنین در این فاصله نتایج نشان می‌دهد بازتعقیب گرهای 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 ۲۵،۱۳۹،۴۶۸ با مقادیر *RMSE* به ترتیب ۳۲، ۱۲ و ۱۳ سانتی‌متر در میان بازتعقیب-گرهای دیگر داشته است که نشان می‌دهد شکل موج-های این سه گذر در این فاصله همخوانی بیشتری با پیش‌فرض‌های این الگوریتم دارند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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

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

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

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 حاصل‌شده 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 حاصل‌شده 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 ۹۰٪ با مقدار *RMSE* ۱۲ سانتی‌متر و در گذر ۴۶۸ به ازای ۵۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ با *RMSE* ۱۳ سانتی‌متر حاصل‌شده 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 حاصل‌شده 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 حاصل‌شده از رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار نسبت به رویکرد کل شکل موج و پردازش داده سطح دو را ارائه می‌دهد.

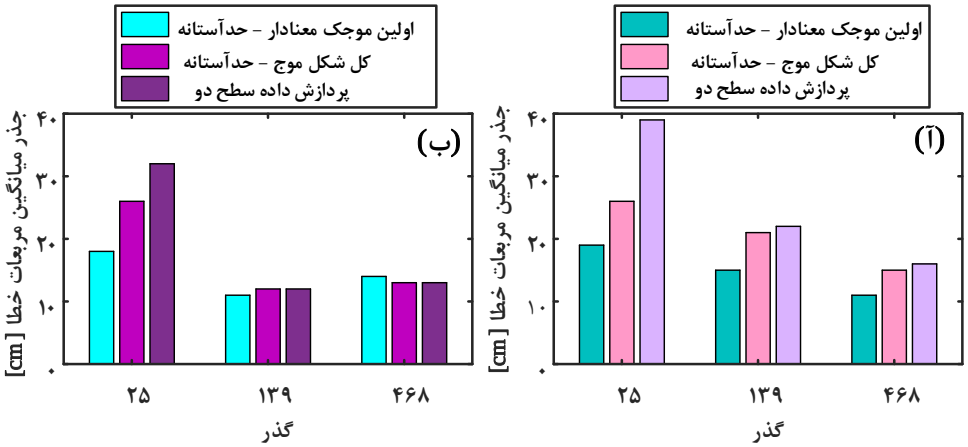
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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 حدآستانه

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

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 ۲۷٪ 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 حاصل‌شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد رویکرد بازتعقیب کل شکل موج نیز با استفاده از الگوریتم حد آستانه در فاصله ۲ کیلومتری ساحل، درگذر های ۲۵، ۱۳۹ و ۴۶۸ صحت سری زمانی سطح آب را به ترتیب ۱۳، ۱ 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.

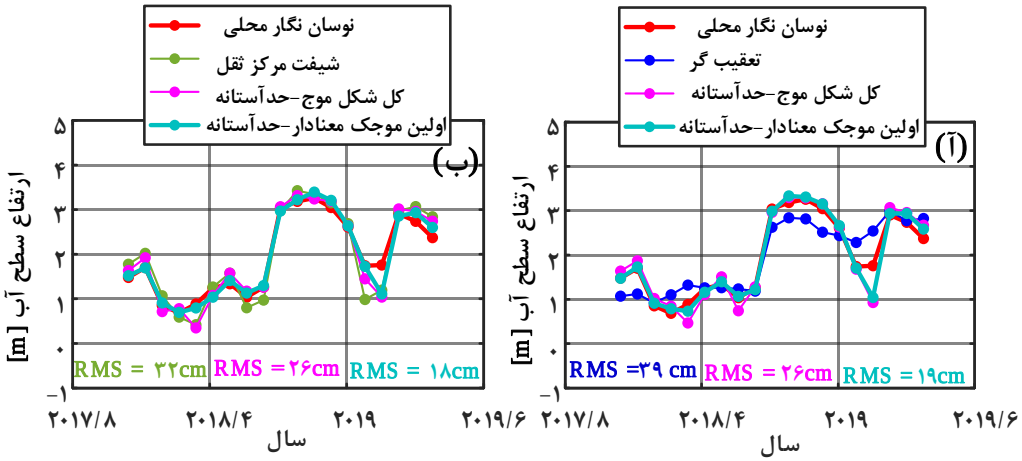
نمودارهای میله‌ای نمایش داده‌شده در شکل (۸) به‌صورت بصری مقادیر *RMSE* سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از سه رویکرد پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه، در سه گذر و در دو فاصله ۲ و ۱۰ کیلومتری از ساحل را نمایش می‌دهند.



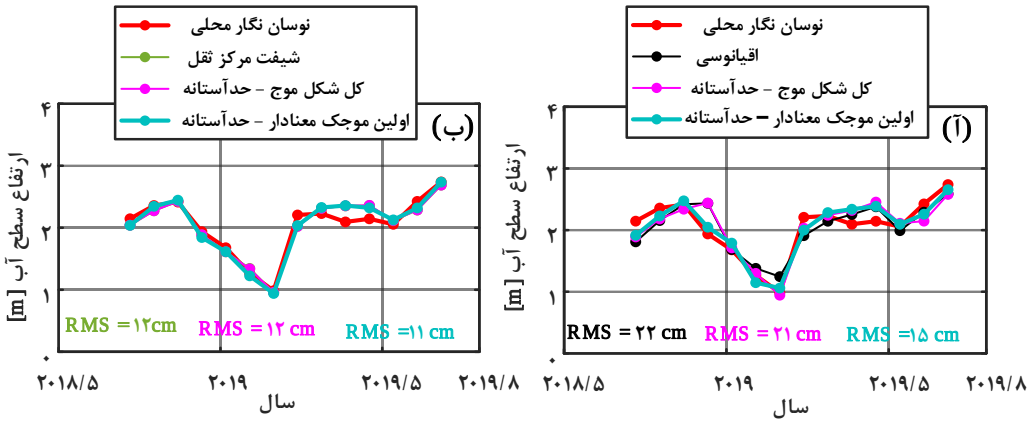
شکل ۸: مقدار *RMSE (cm)* سری‌های زمانی ارتفاع سطح آب در سه گذر انتخابی (الف) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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 حاصل‌شده‌اند، 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 از ساحل کاملاً مشهود است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) سازگاری در فاصله ۲ کیلومتری از ساحل به‌خوبی نمایان است به این دلیل که در فاصله ۱۰ کیلومتری در این گذرها 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 نتایجی مشابه حاصل کرده است.

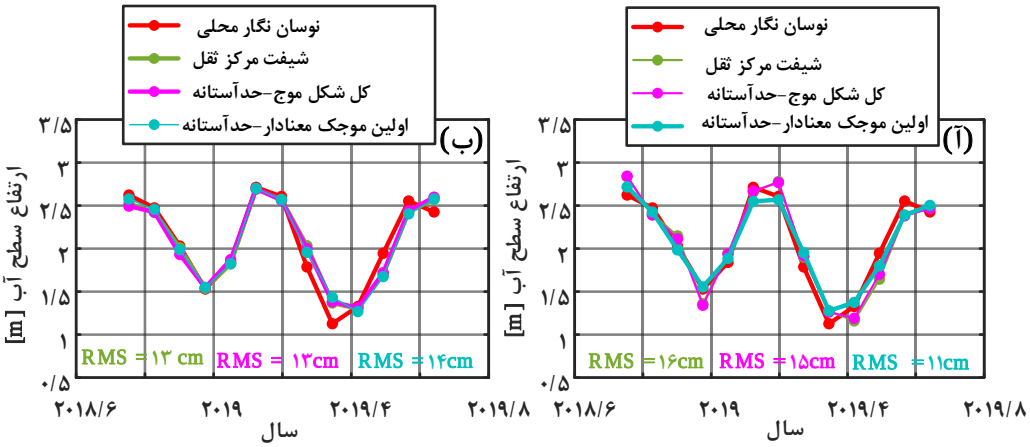


شکل ۹: سری‌های زمانی بهینه ارتفاع سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو، بازتعقیب اولین موجک معنادار و بازتعقیب کل شکل موج در گذر ۲۵، (آ) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل



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 ۱۳۹، (آ) ۲ کیلومتری (ب) ۱۰ کیلومتری ساحل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]



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

خلیج‌فارس ازنظر اقتصادی، سیاسی و نظامی یک آبراه مهم در جهان بشمار می‌آید، همچنین جمعیت زیادی را در سواحل خود جای‌داده است، لذا پایش ارتفاعی سطح آب در این ناحیه ضروری است. ازاین‌رو در این پژوهش پایش ارتفاعی سطح آب در مناطق ساحلی خلیج‌فارس در بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۱/۱۷ الی ۲۰۱۹/۰۹/۲۷، صورت پذیرفت. برای این منظور از دو سطح داده یک و دو ارتفاع‌سنج ماهواره سنتینل-۳آ 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 ارتفاع‌سنج به ایستگاه‌های نوسان نگار محلی بندر بوشهر و کنگان در این منطقه برای پردازش انتخاب شدند.

جهت محاسبه ارتفاع سطح آب، داده‌های ارتفاع‌سنجی سطح دو و یک با رویکردهای بازتعقیب کل شکل موج و اولین موجک معنادار با الگوریتم حد آستانه پردازش شدند. ازآنجایی‌که 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 بررسی‌شده است. سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از این رویکردها با داده‌های نوسان‌نگار 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 قابل‌توجه (به ترتیب ۷۱٪، ۲۷٪ و ۲۷٪) از دو رویکرد دیگر بهتر عمل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

کرده و مقدار *RMSE* را به‌طور قابل‌توجه‌ای 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 موج-های چندپیکی نشان می‌دهد.

در فاصله ۱۰ کیلومتری رویکرد بازتعقیب اولین موجک معنادار 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.

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.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

[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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.4, Winter 2023

Research Paper

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 Voosoghi [2], Shirzad Roohi [3], Arash Amini [4]

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-۳, Coastal area, SAR, First meaningful Sub-waveform Re-tracking.*

Correspondence Address: *No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : 021-88786212
Email : *parisaagar1995@email.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.2.2]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.17]