نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳

Vol.12, No.3, Autumn 2024

۱ -۲٤

مقاله پژوهشی

بازتعقیب شکل موج‌های مغشوش مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره سنتینل- ۳ آ در مناطق ساحلی با الگوریتمی بر پایه تابع لجستیک (مطالعه موردی: شمال شرقی سواحل استونی)

آرش امینی[1*]، بهزاد وثوقی[2]، سید مسعود فاطمی[3]، پریسا آگار[4]، محمود پیروزنیا [5]

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

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

۳- دانشیار گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

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

۵- دانش‌آموخته دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

چکیده

به‌کارگیری تکنیک ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای به‌منظور پایش ارتفاعی آب‌های ساحلی مستلزم بهره‌گیری از روش‌های باز تعقیب شکل موج است. این الزام به دلیل تفاوت شکل موج اقیانوسی ایده آل و شکل موج‌های ساحلی مغشوش ناشی از عواملی چون عمق کم، وجود عوارض غیرآبی و ردپای بزرگ ارتفاع‌سنج ایجاد می‌شود. در این راستا، در پژوهش حاضر روش باز تعقیبی مبتنی بر تابع لجستیک به دلیل توافق هندسی و پارامتری این تابع با شکل موج‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای معرفی‌شده است. این تابع با دو رویکرد تحلیلی (معادل با یک باز تعقیب‌گر ریاضیاتی) بر اساس برازش تابع به اولین موجک معنادار شکل موج و رویکرد عددی (معادل با یک باز تعقیب‌گر تجربی) بر اساس انتخاب گیت باز تعقیب بهینه که به ازای آن تابع بیشترین همبستگی را با اولین موجک معنادار داشته باشد، مورد ارزیابی قرارگرفته است. علاوه بر روش پیشنهادی، رویکردهای باز تعقیب کل شکل موج اصلی، شکل موج میانگین، شکل موج با بیشترین همبستگی با استفاده از الگوریتم حد آستانه، تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو نیز پیاده‌سازی شده‌اند. به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، پایش ارتفاعی شمال شرقی سواحل استونی درگذر عبوری شماره ۷۲ مأموریت سنتینل۳آ با برداشت در حالت رادار دهانه‌مصنوعی از دوره ۴ الی ۴۵ معادل با بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۵/۰۸ الی ۲۰۱۹/۰۵/۲۰، صورت گرفت. سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب مورد بررسی با استفاده از داده‌های ارتفاع آب ایستگاه نوسان نگار محلی و پارامتر جذر خطای مربعی متوسط (*RMSE*) ارزیابی شدند. نتایج مقدار *rmse* را برای رویکرد کل شکل موج اصلی ۱۳ سانتی‌متر، شکل موج میانگین ۳۰ سانتی‌متر، شکل موج با بیشترین همبستگی ۲۱ سانتی‌متر به ازای حد آستانه بهینه و باز تعقیب‌گر بهینه سطح دو ۱۸ سانتی‌متر، رویکرد تحلیلی تابع لجستیک ۱۱ سانتی‌متر و رویکرد عددی تابع لجستیک ۸ سانتی‌متر را معرفی کردند. نتایج ضمن بیان کارایی بهینه رویکرد عددی نسبت به رویکرد تحلیلی تابع لجستیک، برتری این روش پیشنهادی را نسبت به سایر رویکردهای باز تعقیب شکل موج مورد بررسی در این پژوهش نشان می‌دهد. ازاین‌رو تابع لجستیک را می‌توان به‌عنوان یک باز تعقیب‌گر کارا در دو جنبه ریاضیاتی و تجربی شناخته و در پایش ارتفاعی ناحیه ساحلی مطالعاتی در این پژوهش مورد استفاده قرار داد.

کلیدواژه‌ها : ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، مناطق ساحلی، رادار با دهانه مصنوعی، باز تعقیب شکل موج، تابع لجستیک.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران- خیابان ولیعصر- تقاطع میرداماد غربی- دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲-۰۲۱

Email: A_Amini@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

۱- مقدمه

با گرم شدن کره زمین در طی سال‌های اخیر و به دنبال آن ذوب شدن یخ‌های قطبی، افزایش ارتفاع آب دریاها شتاب گرفته و به یک فاجعه دریایی تبدیل‌شده است. این افزایش به‌طور جدی مناطق ساحلی، به‌عنوان یکی از مناطق اصلی فعالیت‌های انسانی را تهدید می‌کند. بالا آمدن سطح دریا خسارت اقتصادی جبران‌ناپذیری به کشاورزی ساحلی و سایر منابع اقتصادی وارد می‌کند و امنیت جانی و مالی ساکنان محلی را به خطر می‌اندازد [۱]. لذا امروزه بیش از هر زمان دیگری نیاز است که ارتفاع آب دریا به‌صورت منطقه‌ای تا جهانی مورد پایش قرار گیرد. ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای بیش از ۳۰ سال است که یکی از ابزارهای اساسی در پایش ارتفاعی آب‌های اقیانوسی هستند که انگیزه اصلی آن‌ها پوشش مکانی و زمانی مطلوب است. آن‌ها پوشش مکانی جهانی داشته به‌طوری‌که حتی دورترین نقاط اقیانوسی نظیر اقیانوس‌های قطبی را پوشش می‌دهند و در هر شرایط آب و هوایی به‌صورت رایگان داده‌هایی تکرارپذیر، طولانی‌مدت و با دقت از ارتفاع آب ارائه می‌دهند. [۲، ۳، ۴ و ۵].

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای نخست به‌منظور پایش ارتفاعی اقیانوس آزاد طراحی شد، اما در طی دهه گذشته با توجه به بهبود پردازش داده‌ها و همچنین پیشرفت فناوری‌ها تا مناطق ساحلی نیز گسترش‌یافته است [۶ و۷]. ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای پالس‌های منظم با توان معین را به صورت پیوسته به سمت زمین ارسال و انعکاس آن را تحت عنوان شکل موج ثبت می‌کنند. از‌این‌رو بر مبنای اندازه‌گیری زمان سیر امواج الکترومغناطیس تا سطح و مقیاس با سرعت نور به محاسبه فاصله تا سطح می‌پردازند [۴]. این تکنیک در مناطق ساحلی با چالش جدی اغتشاش شکل موج و درنتیجه فاصله گرفتن آن از مدل براون[1](شکل موج اقیانوسی) به دلیل آلوده شدن ردپا ارتفاع‌سنج به محیط غیرآبی و شرایط خاص منطقه مانند عمق کم، تغییرات زیاد عمق، خطوط ساحلی پیچیده و جریان‌های جزر و مدی شدید، مواجه هستند. لذا از اندازه‌گیری صحیح فاصله ماهواره تا سطح آب که برای تخمین ارتفاع آب دریا مورداستفاده قرار می‌گیرد، جلوگیری می‌شود. ازاین‌رو به‌منظور برآورد ارتفاع آب صحیح در مناطق ساحلی بایستی از الگوریتم‌های باز تعقیب[2]شکل موج بهره گرفت [۶ و ۸].

باز تعقیب شکل موج با استفاده از روش‌های ریاضی (مبتنی بر برازش فرم‌های تابعی)، روش‌های فیزیکی (بر مبنای انطباق یک مدل خاص به شکل موج با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی سطح بازتاب‌دهنده و پارامترهای ماهواره) و روش‌های تجربی (مبتنی بر ویژگی‌های آماری شکل موج) صورت می‌گیرد [۹]. الگوریتم بازتعقیب بتا پارامتر[3]اولین الگوریتم باز تعقیب بر مبنای فرم تابعی است که توسط مارتین[4]و همکاران (۱۹۸۳) برای محاسبه فاصله میان ارتفاع‌سنج رادار سی- ست[5]و صفحات یخی معرفی شد [۱۰]. پس از آن وینگهام و همکاران (۱۹۸۶) الگوریتم باز تعقیب تجربی شیفت مرکز ثقل[6]را مطرح کردند که رویکردی کاملاً آماری دارد. هدف الگوریتم شیفت مرکز ثقل تعیین مرکز ثقل هر شکل موج بر مبنای تعریف یک مستطیل حول مرکز ثقل شکل موج است [۱۱]. داویس و همکاران (۱۹۹۵) برای بهبود تخمین فاصله روش باز تعقیب حد آستانه[7]را معرفی کردند که روشی آماری، با

[1] *Brown*
[2] *Retracking*
[3] *Beta-Parameter Re-tracker*
[4] *Martin*
[5] *Sea-Sat*
[6] *OCOG: Offset Center of Gravity*
[7] *Threshold*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

اجرای ساده بوده و برای تعیین گیت[1]باز تعقیب از ابعاد مستطیل تعریف‌شده توسط الگوریتم شیفت مرکز ثقل استفاده می‌کند [۱۲]. طی سال‌های اخیر محققین زیادی روش‌های مختلف باز تعقیب شکل موج را در مناطق مختلف ارائه داده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

با هدف تعیین باز تعقیب‌گر بهینه در میان باز تعقیب-گرهای (اقیانوسی[2]و آیس[3]) موجود در داده‌های ژئوفیزیکی (*GDRs*[4]) ماهواره جیسون-۲ و همچنین الگوریتم‌های باز تعقیب حد آستانه و حد آستانه اصلاح‌شده، آب‌های ساحلی کالیفرنیا مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که الگوریتم باز تعقیب حد آستانه اصلاح‌شده در قسمت کم‌عمق و الگوریتم آیس در قسمت عمیق اقیانوس بهترین عملکرد را دارند [۱۳]. شکل موج‌های ماهواره‌های اِن وی سَت و جیسون-۲ در ۴ منطقه ساحلی در آمریکای شمالی با استفاده از رویکرد اصلاح شکل موج[5]و با الگوریتم حد آستانه باز تعقیب شدند. در این پژوهش برای بررسی کارایی روش پیشنهادی از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو، باز تعقیب‌گر حد آستانه و حد آستانه اصلاح‌شده بر روی شکل موج‌های اصلی نیز استفاده شد. نتایج برتری روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های دیگر را نشان داد [۱۴]. رویکرد میانگین باز تعقیب موجک‌های معنادار[6]در یک شکل موج برای مطالعه آب‌های درون سرزمینی معرفی شد. از الگوریتم‌های حد آستانه و ساموسا-۳[7] نیز برای باز تعقیب موجک‌های معنادار استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که باز تعقیب اولین موجک معنادار[8]و میانگین باز تعقیب موجک‌ها برای بازیابی ارتفاع آب دریاچه‌های کوچک مناسب هستند درحالی‌که در دریاچه‌های بزرگ باز تعقیب کل شکل موج منجر به نتایج بهتر می‌شود [۱۵]. دریاچه ونرن با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنج مأموریت سنتینل- ۳ مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش رویکرد باز تعقیب موجک بهینه با ویژگی ارتفاع آب نزدیک‌تر به مقدار نوسان نگار محلی با استفاده از الگوریتم حد آستانه معرفی شد. نتایج برتری این رویکرد را نسبت به باز تعقیب میانگین موجک‌های معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه و پردازش داده‌های سطح دو نشان داد. همچنین آنالیز توزیع موجک بهینه نشان داد که در بیش از ۹۰٪ از شکل موج‌ها، اولین موجک معنادار ارتفاع آب نزدیک‌تر به مقدار نوسان نگار محلی حاصل می‌کند [۴]. رویکردی نوین در بازتعقیب شکل موج، تحت عنوان بازتعقیب شکل موجی با بیشترین همبستگی نسبت به شکل موج میانگین در هر دوره بر روی داده‌های مأموریت سنتینل-۳ در تنگه هرمز ارائه شد. این رویکرد با رویکردهای بازتعقیب کل شکل موج اصلی، اولین موجک معنادار و شکل موج میانگین با استفاده از الگوریتم حد آستانه مقایسه شد. نتایج، برتری روش پیشنهادی را نسبت به سه رویکرد دیگر نشان داد [۱۶].

تابع لجستیک در پی مطالعه رشد جمعیت در قرن ۱۹ توسط ورهولست[9]معرفی گردید. ورهولست ابتدا در مقاله‌ای باعنوان "یادداشتی بر قانون رشد جمعیت" در سال ۱۸۳۸ معادله دیفرانسیلی که رشد جمعیت را توصیف و حل آن تابع جمعیت را به دست می‌داد، معرفی نمود. وی در سال ۱۸۴۴ در مقاله‌ای تحت عنوان"تحقیقی ریاضی بر قانون رشد جمعیت" حل معادله معرفی‌شده در مقاله سال ۱۸۳۸ را تحت عنوان

[1] *Gate*
[2] *Ocean*
[3] *Ice*
[4] *Geophysical Data Records*
[5] *Waveform modification*
[6] *Mean-all Meaningful Sub-waveform*
[7] *SAMOSA-3*
[8] *First Meaningful Sub-waveform*
[9] *Verhulst*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

منحنی لجستیک معرفی کرد [۱۷]. تابع لجستیک به دلیل سادگی در بسیاری از حوزه‌های مطالعاتی علمی مورد استفاده قرارگرفته است. به‌عنوان مثال تابع لجستیک به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی در حوزه‌های مختلف اقتصادی و کسب‌وکار (پخش محصولات، نرخ تورم کالاها، اشتغال و بیکاری، بازار تقاضا) [۱۸]، مطالعه رفتار آشوب در یک سیستم [۱۹] و فیلتر تصاویر [۲۰] عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.

در پژوهش حاضر سعی شده است به‌عنوان نوآوری از تابع لجستیک[1] در حوزه بازتعقب شکل موج‌های ارتفاع-سنجی ماهواره‌ای در قالب دو رویکرد تحلیلی و عددی استفاده گردد. انگیزه این پژوهش، شباهت هندسی و پارامتری شکل موج‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای با شکل و پارامترهای این تابع بوده است. جهت بررسی کارایی تابع لجستیک به‌عنوان یک باز تعقیب‌گر، مقایسه‌ای میان نتایج این روش و رویکردهای باز تعقیب کل شکل موج اصلی، شکل موج میانگین و باز تعقیب شکل موجی با بیشترین همبستگی نسبت به شکل موج میانگین با استفاده از الگوریتم حد آستانه، تعقیب‌گر و باز تعقیب گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳آ انجام شده است. نتایج بهبود قابل‌توجه صحت سری زمانی ارتفاع آب (مقایسه با نوسان نگار محلی) حاصل از روش پیشنهادی را نسبت به پردازش داده‌های سطح دو و سایر روش‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند.

۲- مبانی نظری

در این بخش سعی می‌شود، مختصری از مبانی ارتفاع-سنجی ماهواره‌ای شامل فرایند ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، باز تعقیب شکل موج، الگوریتم شناسایی موجک‌های معنادار، همچنین الگوریتم بازتعقیب حد آستانه و تابع لجستیک به‌عنوان مفاهیم پایه‌ای پژوهش حاضر تشریح گردند.

۲-۱- مبانی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

ارتفاع‌سنج یک پالس کوتاه از امواج الکترومغناطیس با توان معین به سمت سطح ارسال می‌کند. انعکاس از سطح، با دو تأخیر زمانی در رادار دریافت می‌شود. اولی ناشی از تعامل پالس با سطح و دومی به دلیل مسیر سیر سیگنال تا آستانه برخورد با سطح است. با در نظر گرفتن این دو تأخیر زمانی، ارتفاع‌سنج زمان رفت‌وبرگشت سیگنال را اندازه‌گیری کرده و با ضرب نصف این مقدار در سرعت نور طبق رابطه (۱)، فاصله ماهواره از سطح را برآورد می‌کند [۴ و ۲۱].

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

در رابطه (۱)، R فاصله ارتفاع‌سنج تا سطح انعکاسی، C سرعت نور و Δt زمان رفت‌وبرگشت پالس ارسالی است. جهت محاسبه ارتفاع سطح انعکاسی (H) نسبت به یک سطح‌مبنا، ارتفاع ماهواره از سطح‌مبنا (A) لازم است. ازاین‌رو ارتفاع سطح انعکاسی از رابطه (۲) به دست می-آید [۲۱]:

$$H = A - R \qquad \text{رابطه(۲)}$$

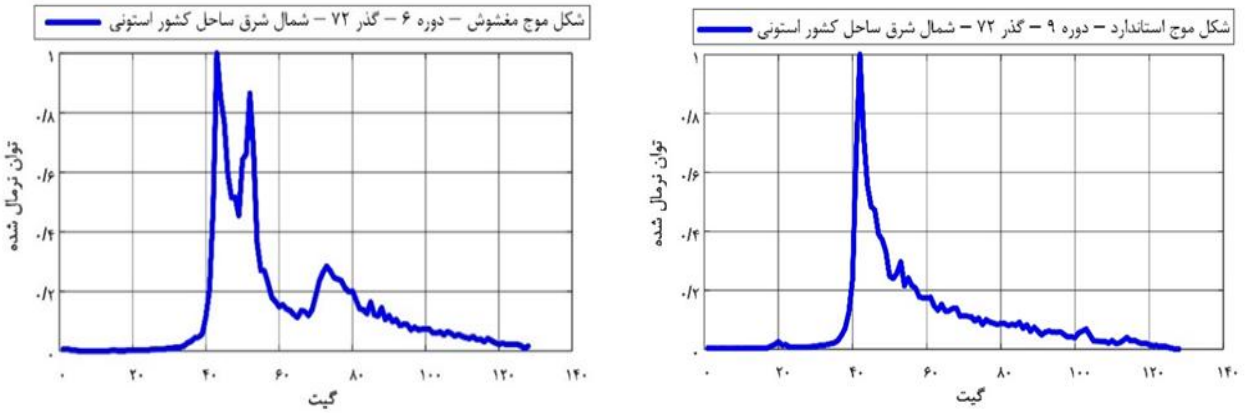
زمان تعامل پالس با سطح به فواصل زمانی معین تحت عنوان گیت تقسیم می‌شود. ازاین‌رو شکل موج را می‌توان توان پالس بازگشتی به ارتفاع‌سنج بر مبنای گیت تعریف نمود. در محیط اقیانوسی، شکل موج بازگشتی در ارتفاع‌سنج‌ها از مدل تئوری براون (مدل استاندارد) تبعیت می‌کنند. طبق این مدل، شکل موج از یک نویز حرارتی[2] لبه پیشین[3] که توان آن با شیب تند به‌سرعت در حال افزایش است و به دنبال آن لبه پسین[4] که توان آن به‌تدریج کاهش می‌یابد، تشکیل‌شده است. گیت متناظر با نقطه میانی[5] در لبه پیشین شکل موج که گیت اسمی[6] ارتفاع‌سنج است لحظه بازگشت پالس از

[1] *Logistic function*

[2] *Thermal noise*
[3] *Leading edge*
[4] *Trailing edge*
[5] *Mid point*
[6] *Nominal gate*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

سطح را نشان می‌دهد [۵، ۶ و ۲۲].
در نواحی ساحلی به سبب اندازه بزرگ ردپای ماهواره و وجود ناهمواری سطح، پوشش گیاهی یا جزیره‌های کوچک، انعکاس از سطح به رادار صرفاً از سطح آب نخواهد بود. لذا شکل موج ثبت‌شده توسط رادار از حالت استاندارد (مدل براون)، خارج‌شده و مغشوش می‌شود. پرواضح است که در این حالت گیت اسمی ارتفاع‌سنج دیگر معرف نقطه میانی لبه پیشین شکل موج نیست، لذا لحظه صحیح بازگشت پالس از سطح را معرفی نخواهد کرد [۸]. شکل (۱- الف) نمونه‌ای از شکل موج استاندارد و شکل (۱- ب) یک شکل موج مغشوش در منطقه موردمطالعه می‌باشد.



(الف) (ب)

شکل ۱: (الف) شکل موجی استاندارد، (ب) شکل موجی مغشوش از دوره ۶ و گذر ۷۲ مأموریت سنتینل-۳آ در شمال شرقی سواحل استونی

طی فرآیندی تحت عنوان باز تعقیب شکل موج، بایستی لحظه صحیح بازگشت پالس از سطح آب را در شکل موج‌های مغشوش بازیابی کرد و تصحیح باز تعقیب (C_{ret}) را به فاصله حاصل از تعقیب‌گر[1] ماهواره که بر مبنای گیت اسمی (G_0) ارتفاع‌سنج است، اعمال کرد. با مقایسه گیت متناظر با این لحظه (گیت باز تعقیب‌شده[2] (G_r)) در شکل موج و گیت اسمی ارتفاع‌سنج، تصحیح باز تعقیب[3] طبق رابطه (۳) حاصل می‌گردد. در این رابطه τ طول پالس ارسالی است [۲۳ و۲۴].

رابطه(۳)
$$C_{ret} = (G_r - G_0) \times \frac{C}{2} \times \tau$$

سیگنال راداری به دلیل تعامل با اتمسفر، دچار تأخیر زمانی می‌شود. همچنین نیروهای جاذبی سبب حرکت عمودی سطح می‌شوند. ازاین‌رو برای تکمیل معادله بنیادی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (رابطه (۲)) لازم است تصحیحات محیطی ($\sum C_{media}$) (ناشی از تعامل پالس با جو) و تصحیحات ژئوفیزیکی ($\sum C_{geophysical}$) (ناشی از عوامل فیزیکی زمین) به همراه تصحیح باز تعقیب (ناشی از تعامل پالس با سطح غیر آبی) اضافه گردد [۲۵ و ۲۶].

رابطه(۴)
$$H = A - (R + C_{ret} + \sum C_{media} + \sum C_{geophysical})$$

رابطه(۵)
$$\sum C_{media} = C_{iono} + C_{dry\ tropospheric} + C_{wet\ tropospheric} + C_{SSB}$$

[1] *Tracker*
[2] *Re-tracked Gate*
[3] *Re-tracking correction*

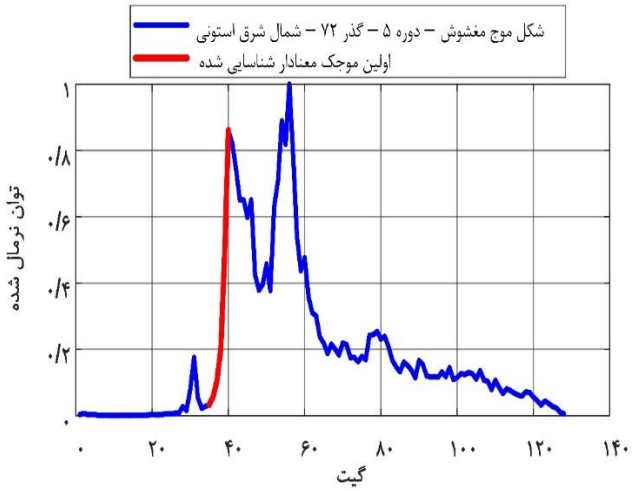
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

رابطه(۶)

$$\sum C_{geophysical} = C_{tides} + C_{Geoid}$$

رابطه (۴) معادله بنیادی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای است. در رابطه (۵)، C_{iono}، $C_{dry\ tropospheric}$، $C_{wet\ tropospheric}$ و C_{SSB} تصحیحات ناشی از تعامل پالس با محیط انتشار پالس هستند که به ترتیب مربوط به تصحیح یونسفر، تروپسفر خشک، تروپسفر تر و بایاس وضعیت دریا[1] می‌باشند. در رابطه (۶)، C_{tides} و C_{Geoid} تصحیحات ژئوفیزیکی هستند که به ترتیب معرف تصحیحات جزر و مدی (بارگذاری[2]، زمین صلب[3] و قطبی[4]) و تصحیح ژئوئید هستند.

در مطالعه ارتفاعی آب‌های ساحلی، شکل موج‌ها معمولاً چند پیکی[5] هستند که به هرکدام از این پیک‌ها موجک[6] یا بخش صعودی گفته می‌شود. ازاین‌رو بایستی در میان این موجک‌ها، موجک‌های معنادار با ویژگی حداقل سه گیت شناسایی و الگوریتمی خاص برای باز تعقیب آن‌ها اتخاذ گردد [۲۷]. برای شناسایی موجک‌های معنادار در یک شکل موج از رویه بکار گرفته شده در مراجع [۲۷ و ۲۸] استفاده شده‌است. شکل(۲) شناسایی اولین موجک معنادار را با استفاده از این رویه نشان می‌دهد.



شکل۲: شناسایی اولین بخش صعودی معنادار در شکل موج

۲-۲- الگوریتم بازتعقیب حد آستانه

داویس و همکاران (۱۹۹۵) برای بهبود فاصله اندازه‌گیری شده توسط تعقیب‌گر ارتفاع‌سنج، الگوریتم بازتعقیب حد آستانه را ارائه دادند. این الگوریتم رویکردی آماری داشته و به توپوگرافی سطح حساس است [۱۲]. طبق پیشینه پژوهش، این الگوریتم در باز تعقیب شکل موج‌های ساحلی به‌خوبی عمل می‌کند. جزئیات این الگوریتم در روابط (۷) الی (۱۰) آورده شده است.

رابطه(۷)

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

رابطه(۸)

$$p_N = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} P_i$$

رابطه(۹)

$$Th = P_N + q\,(A - P_N)$$

رابطه(۱۰)

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

[1] *SSB: Sea State Bias*
[2] *Load tide*
[3] *Solid earth tide*
[4] *Pole tide*
[5] *Multi peak*
[6] *Sub waveform*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

در رابطه (۷) الی (۱۰)، A دامنه شکل موج، $n_1 = n_2 = 4$ تعداد گیت‌های متأثر از پدیده الایزینگ (*Aliasing*) در ابتدا و انتهای شکل موج، N تعداد گیت‌های شکل موج، 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 تجاوز می‌کند و G_R نیز گیت باز تعقیب شده است [۲۷]. لازم به ذکر است در بازتعقیب اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه، دامنه موجک، بیشینه توان آن در نظر گرفته می‌شود.

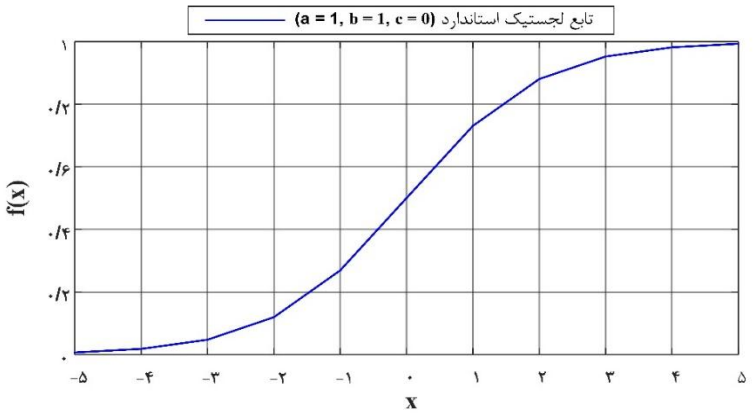
۲-۳- تابع لجستیک

تابع لجستیک برای اولین بار در راستای مطالعات مربوط به رشد جمعیت توسط ورهولست معرفی گردید. رابطه ریاضی تابع لجستیک تعمیم یافته را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) بیان کرد [۱۷ و ۲۹]:

$$u(t) = u_{min} + \frac{u_{max} - u_{min}}{1 + \exp(-b(t - c))} \qquad \text{رابطه(۱۱)}$$

در رابطه(۱۱)، t زمان، u_{max} و u_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع u، c نقطه عطف و b شیب تابع است. تابع لجستیک به ازای مقدار صفر برای کمترین مقدار تابع u ($u_{min}=۰$) حاصل می گردد. بنابراین تابع لجستیک به صورت رابطه (۱۲) قابل بیان است. این تابع برای دامنه و شیب یک و نقطه عطف صفر در شکل (۳) نمایش داده‌شده است.

$$u(t) = \frac{u_{max}}{1 + \exp(-b(t - c))} \qquad \text{رابطه(۱۲)}$$



شکل۳: تابع لجستیک استاندارد (دامنه و شیب یک و نقطه میانی صفر)

۳- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

در این پژوهش پایش ارتفاع آب شمال شرقی سواحل کشور استونی با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۳آ مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی ارتفاع آب به‌دست‌آمده، از داده‌های نزدیک‌ترین نوسان نگار محلی به گذر[1] ماهواره استفاده شده است. در این بخش به شرح داده‌ها و منطقه مطالعاتی پژوهش پرداخته می‌شود.

۱-۳- داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

مأموریت سنتینل-۳آ سومین مأموریت از سری مأموریت‌های نسل سنتینل به‌عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک[2] در فوریه ۲۰۱۶ به‌وسیله آژانس فضایی اروپا به فضا ارسال گردید. این ماهواره مجموعه‌ای از سنجنده‌ها را برای دستیابی به تصاویر اپتیکی مانند

[1] *Pass*

[2] *Copernicus*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

سنجنده دمای سطح دریا و خشکی (*SLSTR*)، رنگ اقیانوس و خشکی (*OLCI*[2]) و همچنین ارتفاع‌سنج سرال[3] برای پایش ارتفاعی آب‌های کره زمین را با خود حمل می‌کند. سیستم ارتفاع‌سنجی این مأموریت شامل سنجنده‌های سرال، رادیومتر میکروویو و مجموعه ابزار تعیین مدار دقیق ماهواره[4] می‌باشد. ارتفاع‌سنج سرال ابزاری دوفرکانسه (*Ku* و *C*) بوده که در حالت رادار با دهانه‌مصنوعی[5] برداشت می‌کند و زمان رفت‌وبرگشت پالس ارسالی از رادار و منعکس‌شده از سطح را با دقت بهتر از نانوثانیه اندازه‌گیری می‌کند. سرال ازنظر فنی نزدیک‌ترین ارتفاع‌سنج به ارتفاع‌سنج ماهواره کرایوست-۲ است که پیشگام ارتفاع‌سنجی حالت رادار با دهانه‌مصنوعی است. ارتفاع‌سنج کرایوست-۲ فقط مناطق یخی و بعضی از مناطق انتخاب‌شده اقیانوسی را در این حالت پوشش می‌دهد اما سرال اولین ارتفاع-سنجی است که کل کره زمین را در حالت رادار با دهانه‌مصنوعی پوشش می‌دهد. ارتفاع‌سنج‌های رادار با دهانه‌مصنوعی به دلیل پردازش داپلر در امتداد برداشت، فرکانس تکرار پالس[6] بالا (۱۷٫۸ کیلوهرتز) و برداشت چند منظری[7] دارای نسبت سیگنال به نویز بالاتر، اندازه رد پای پایین‌تر در امتداد برداشت[8] (حدود ۳۰۰ متر) و همچنین دقت و صحت بالاتری نسبت به ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم هستند. این ارتفاع‌سنج‌ها به سبب اندازه رد پای کوچک در امتداد برداشت در نزدیکی سواحل کم‌تر تحت تأثیر عوامل مغشوش‌کننده شکل موج قرار می-گیرند لذا انتظار می‌رود ارتفاع آب صحیح‌تری نسبت به ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم ارائه کنند [۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳]. در این پژوهش از داده‌های گذر ۷۲ ارتفاع‌سنج سنتینل-۳آ در دو سطح داده یک (*SR_1_SRA*) و دو (*SR_2_LAN*) استفاده شده است. جدول (۱) برخی از مشخصات این مأموریت را ارائه می‌دهد.

۳-۲- داده‌های نوسان نگار محلی

جهت ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب مورد بررسی در این پژوهش با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی سنتینل ۳آ از داده‌های نوسان نگار محلی ایستگاه *Lehtma* که موقعیت آن در شکل (۱) نشان داده شده است، استفاده گردید *(http://www.marineinsitu.eu)*. اطلاعات مربوط به نوسان نگار محلی مذکور در جدول (۲) ارائه شده است.

۳-۳- منطقه مطالعاتی

دریای بالتیک یک مجموعه آبی شور نیمه بسته است که در شمال اروپا قرار دارد. این منطقه دریایی توسط ۹ کشور احاطه شده است، لذا تراکم بالایی از ترافیک دریایی و فعالیت‌های ساحلی در این دریا وجود دارد. جزایر متعدد منطقه می‌توانند اندازه‌گیری ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی را در طول گذر چالش‌برانگیز کنند [۳۴ و ۳۵]. در این پژوهش پایش ارتفاعی شمال شرقی سواحل آبی کشور استونی واقع در دریای بالتیک با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳آ در بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۵/۰۸ الی ۲۰۱۹/۰۵/۲۰ متناظر با دوره[9] ۴ تا ۴۵ (۴۲ دوره) درگذر عبوری شماره ۷۲ انجام شده‌است. با انتخاب نزدیک‌ترین نقطه به نوسان نگار محلی بر روی گذر و تعیین دایره‌ای به شعاع دو کیلومتر، داده‌های ارتفاع‌سنجی محصور در این محدوده مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۴) منطقه مطالعاتی، گذر ۷۲ مأموریت سنتینل-۳آ و محدوده استخراج داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را نشان می‌دهد.

[1] *Sea and Land Surface Temperarature*
[2] *Ocean and Land Colour Instrument*
[3] *SRAL*
[4] *Precise orbit determination*
[5] *SAR: Synthetic Aperture Radar*
[6] *PRF: Pulse repetition frequency*
[7] *Multi looking*
[8] *Along track*
[9] *Cycle*

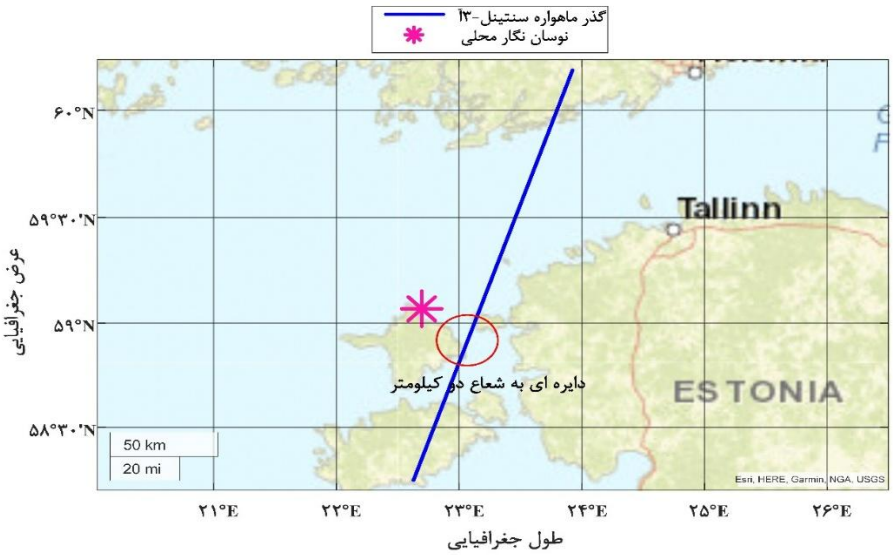
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

جدول ۱: مشخصات مأموریت سنتینل-۳آ [۳۰]

ارتفاع مداری (کیلومتر)	نوع مدار	میل مداری (درجه)	دوره تکرار مداری (روز)	تعداد گذر	باندهای فرکانسی (گیگاهرتز)	طول پالس (نانوثانیه)	تعداد گیت	گیت اسمی
۸۱۴٫۵	خورشید آهنگ شبه قطبی	۹۸٫۶۵	۲۷	۷۷۰	Ku(۱۳٫۶) C (۴٫۵)	۱۳٫۱۲۵	۱۲۸	۴۳

جدول ۲: اطلاعات مربوط به ایستگاه نوسان نگار محلی

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ داده	فاصله مستقیم تا گذر ماهواره (کیلومتر)	نرخ برداشت (ساعت)
Lehtma	۲۲٫۶۹۶	۵۹٫۰۶۸	۲۰۱۶/۰۵/۰۸ ۲۰۱۹/۰۵/۲۰	۲۵	۱

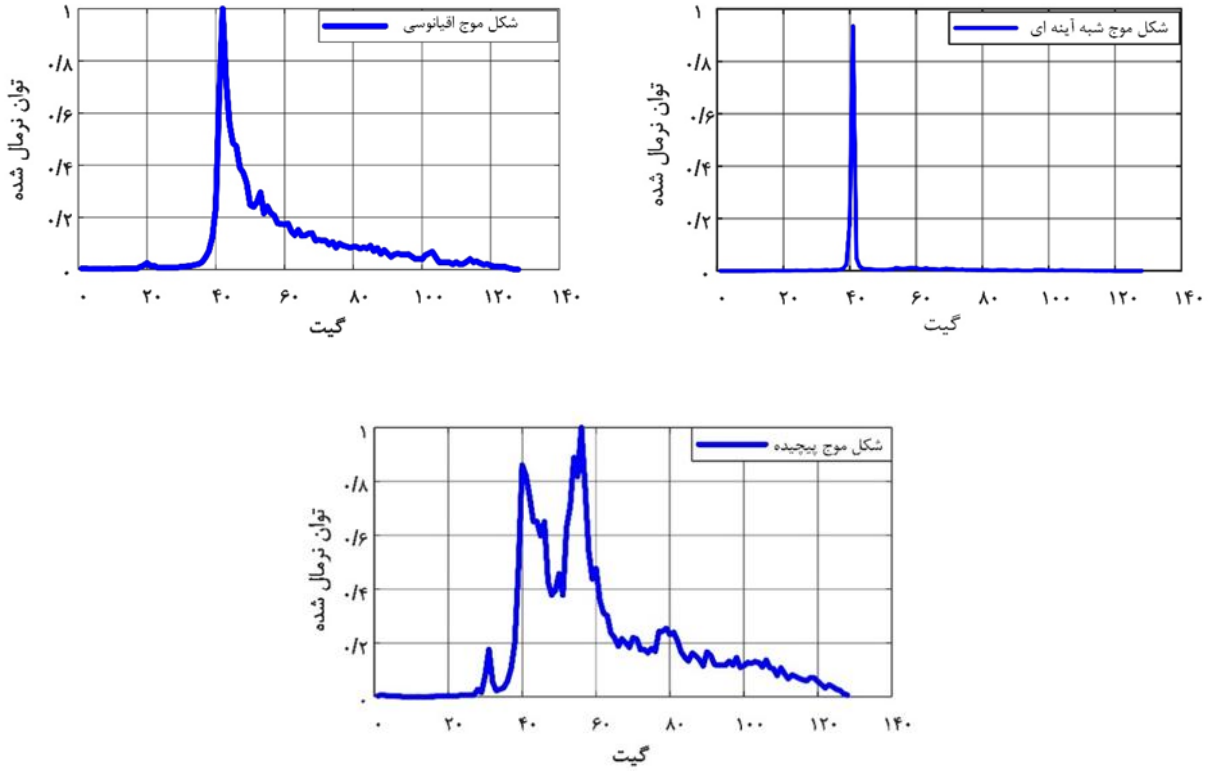


شکل ۴: شمال شرقی سواحل استونی به همراه گذر ۷۲ مأموریت ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳آ، موقعیت نوسان نگار محلی و محدوده استخراج داده در دایره‌ای به شعاع دو کیلومتر

با توجه به‌اینکه در پژوهش حاضر هدف بازتعقیب شکل موج‌های ارتفاع‌سنجی ماموریت سنتینل ۳آ در منطقه مورد مطالعه است، گونه‌های مختلف شکل موج موجود در محدوده مطالعاتی معرفی می‌گردد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود شکل موج‌های منطقه مطالعاتی را می‌توان در گروه‌های شکل موج شبه اقیانوسی[1] شبه آینه‌ای[2] و پیچیده[3] (چند موجکی) معرفی نمود.

[1] *Quasi Brown*
[2] *Quasi Specular*
[3] *Complex*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]



شکل ۵: گونه‌های مختلف شکل موج در منطقه مطالعاتی

۴- روش‌شناسی

در این پژوهش به‌عنوان نوآوری و هدف اصلی، کارایی تابع لجستیک در باز تعقیب شکل موج‌های ارتفاع-سنجی ماهواره‌ای در نواحی ساحلی در قالب دو رویکرد تحلیلی و عددی ارزیابی‌شده است. لازم به ذکر است تاکنون این تابع ریاضی در حوزه ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و باز تعقیب شکل موج، مورد مطالعه قرار نگرفته است. جهت بررسی کارایی این روش، مقایسه‌ای نیز میان نتایج این روش و رویکردهای باز تعقیب کل شکل موج اصلی، بیشترین همبستگی، میانگین شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه، تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو انجام شده است. در پایان نیز فرآیند تولید سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای فوق بیان شده که در ادامه تشریح می‌گردد.

۴-۱- تابع لجستیک به عنوان یک بازتعقیب گر

تابع لجستیک توافق هندسی و پارامتری خوبی با شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای دارد، لذا می‌توان پارامترهای تابع لجستیک را بر اساس پارامتر-های شکل موج تعبیر کرد و فرم این تابع را بازنویسی نمود. با تعریف پارامترهای: a بیشترین مقدار منحنی لجستیک متناظر با دامنه شکل موج، b شیب منحنی لجستیک متناظر با شیب بخش صعودی شکل موج، c نقطه عطف منحنی لجستیک متناظر با نقطه میانی بخش صعودی شکل موج و pn به‌عنوان میانگین گیت‌های ابتدایی تحت عنوان نویز حرارتی در شکل موج، می‌توان تابع لجستیک را به‌صورت رابطه (۱۳) بازنویسی کرد:

$$u(t) = pn + \frac{a}{1+\exp(-b\,(t-c))} \qquad \text{رابطه(۱۳)}$$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

پر واضح است که تمامی پارامترهای این تابع، پارامتر-های اساسی هستند که در حوزه باز تعقیب شکل موج مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به تئوری بیان‌شده در مورد تعامل پالس با سطح و باز تعقیب شکل موج، هدف یافتن پارامتر c به‌عنوان تصحیح باز تعقیب در ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای است. در راستای یافتن این پارامتر تابع لجستیک در قالب دو رویکرد تحلیلی (به عنوان یک بازتعقیب‌گر ریاضیاتی) و عددی (به عنوان یک بازتعقیب‌گر تجربی) که در ادامه به آن پرداخته شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۱-۱- رویکرد تحلیلی

منظور از رویکرد تحلیلی، برازش ریاضیاتی تابع به شکل موج و استخراج پارامترهای مجهول تابع است که در این حالت تابع لجستیک نقش یک باز تعقیب گر ریاضیاتی را بازی می‌کند. به بیانی دیگر تابع به اولین موجک معنادار شکل موج برازش یافته و پارامترهای مجهول شیب (b) و میانه بخش صعودی (c) استخراج می‌گردد. پارامتر دامنه بیشترین دامنه بخش صعودی در نظر گرفته شده است. درصورتی‌که برازش تابع به فرم ارائه‌شده در رابطه (۱۳) انجام شود، بایستی یک مسئله کمترین مربعات غیرخطی حل گردد که نیاز به مقادیر اولیه برای پارامترهای مجهول خواهد بود. به‌منظور ساده‌سازی مسئله با استفاده از تابع لگاریتم و یک تغییر متغیر، مسئله را به یک مسئله خطی تبدیل کرده و سپس حل می‌کنیم. ازاین‌رو ابتدا با جابه‌جایی متغیرها در رابطه (۱۳)، معادله به‌صورت رابطه (۱۴) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{a}{u(t) - pn} - 1 = \exp\left(-b\,(t - c)\right) \qquad \text{رابطه(۱۴)}$$

حال از طرفین رابطه (۱۴)، لگاریتم در پایه نپر (e) طبق رابطه (۱۵) گرفته می‌شود:

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{a}{u(t) - pn} - 1\right) = -bt + bc \qquad \text{رابطه(۱۵)}$$

با تساوی‌های زیر:

$$D = -b \qquad \text{رابطه(۱۶)}$$

$$E = bc \qquad \text{رابطه(۱۷)}$$

$$W = \mathrm{Ln}\left(\frac{a}{u(t) - pn} - 1\right) \qquad \text{رابطه(۱۸)}$$

با درنظرگرفتن تساوی‌های ارائه شده در رابطه (۱۶)، (۱۷) و (۱۸)، و قرار دادن $X=t$ فرم خطی معادله مطابق با رابطه (۱۹) خواهد بود:

$$W = DX + E \qquad \text{رابطه(۱۹)}$$

حال با حل یک مسئله کمترین مربعات خطی با ماتریس ساختار A، برای مشاهدات W، مجهولات X (D و E) از رابطه (۲۰) قابل برآورد خواهند بود [۳۶]:

$$X = (A^{'}A)^{-1}A^{'}W \qquad \text{رابطه(۲۰)}$$

در پایان مجهولات مسئله اولیه از روابط (۲۱) و (۲۲) قابل محاسبه هستند.

$$b = -D \qquad \text{رابطه(۲۱)}$$

$$c = -\frac{E}{D} \qquad \text{رابطه(۲۲)}$$

۴-۱-۲- رویکرد عددی

در این روش برای عدم مواجه شدن با مشکلات برازش تحلیلی تابع به یک سیگنال (واگرایی تابع به دلیل ارائه مقادیر اولیه غیر صحیح، سیگنال با نوسانات بالا و عدم توافق مناسب تابع با سیگنال که سبب می‌شود پارامتر ریاضی مدنظر، معرف نقطه موردنظر روی سیگنال نباشد)، اولین بخش صعودی معنادار شکل موج با فواصل المانی یک‌دهمی به‌عنوان جواب مسئله (مقدار c) در تابع لجستیک قرارگرفته و با تشکیل تابع ریاضی، همبستگی آن با اولین بخش صعودی معنادار ارزیابی می‌شود. مقداری از اولین بخش صعودی معنادار (c) به‌عنوان جواب بهینه در نظر گرفته‌شده است که به ازای آن تابع لجستیک بیشترین همبستگی را با شکل موج در بخش صعودی معنادار داشته باشد. همچنین مقدار بهینه برای پارامتر شیب تابع لجستیک به‌صورت تجربی در این پژوهش عدد ۳ در نظر گرفته‌شده است. درواقع در این حالت تابع لجستیک نقش یک باز تعقیب‌گر تجربی را ایفا می‌کند. روابط مورداستفاده در رویکرد عددی تابع لجستیک در رابطه (۲۳) آورده‌شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

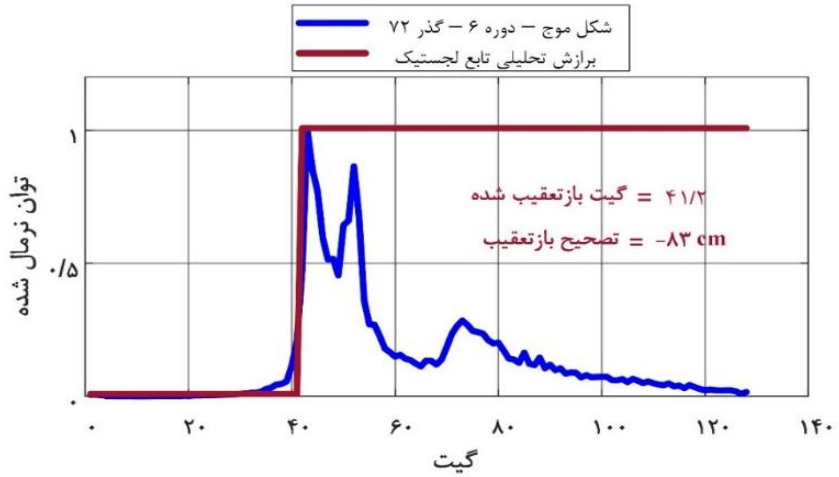
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

$$u_1^1(t) = pn + \frac{a}{1+\exp(-b(t-c_1))}, \qquad u_2^1(t) = pn + \frac{a}{1+\exp(-b(t-c_2))} \quad \ldots$$

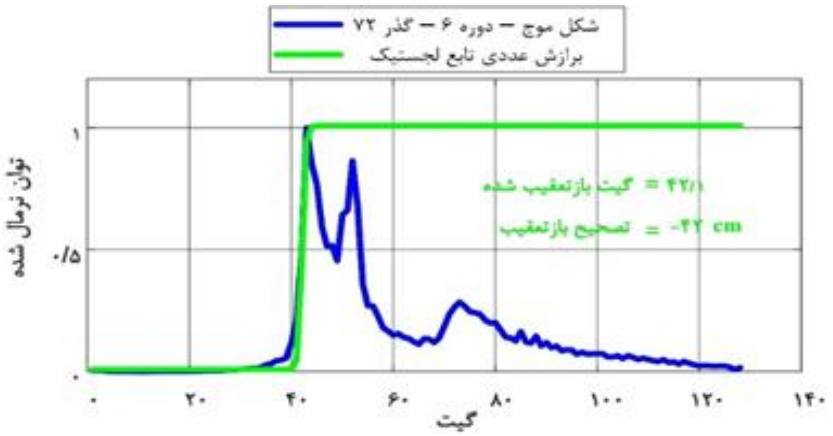
$$u_q^m(t) = pn + \frac{a}{1+\exp(-b(t-c_q))}, \quad q = 1,\ldots.i \quad , m = 1,\ldots j \qquad \text{رابطه(۲۳)}$$

$$\text{Optimum } (c^j) = \left\{ c_i^j \mid \max corr\left(u_i^j(t), \text{first sub waveform (j)}\right)\right\}$$

در روابط موجود در رابطه(۲۳)، q تعداد المان یک‌دهمی در بخش صعودی، i شماره المان، m تعداد شکل موج و j شماره شکل موج است. شکل‌های (۶) و (۷) نمایشی از برازش تحلیلی و عددی در باز تعقیب شکل موج را نشان می‌دهند. این شکل‌ها ضمن نمایش برازش نرم‌تر رویکرد عددی نسبت به رویکرد تحلیلی، اختلاف قابل‌توجه حدوداً دو برابری در تصحیح باز تعقیب را برای این دو رویکرد معرفی می‌کنند.



شکل۶: برازش تحلیلی تابع لجستیک به اولین بخش صعودی معنادار شکل موج



شکل۷: برازش عددی تابع لجستیک به اولین بخش صعودی معنادار شکل موج

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

۴-۲- سایر رویکردهای بازتعقیب شکل موج و پردازش داده‌های سطح دو

در پردازش داده‌های سطح دو به منظور محاسبه ارتفاع آب منطقه مورد مطالعه، از فاصله حاصل از تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای (اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، سی- آیس[1] و آیس- شیت[2]) موجود در داده‌های سطح دو استفاده شده است [۳۷]. همچنین طبق پیشینه پژوهش، باتوجه به عملکرد بهینه الگوریتم باز تعقیب حدآستانه در مناطق ساحلی، شکل موج‌های بازگشتی منطقه مورد مطالعه با استفاده از این الگوریتم و با به‌کارگیری حد آستانه‌های ۱۰ الی ۹۰ درصد با گام ده واحدی نیز، باز تعقیب شده‌اند. در بکارگیری الگوریتم حدآستانه در باز تعقیب شکل موج از سه رویکرد شامل بازتعقیب کل شکل موج اصلی (شکل موج‌های مشاهداتی)، شکل موج میانگین (بازتعقیب میانگین شکل موج در هر دوره) و باز تعقیب شکل موجی با بیشترین همبستگی (بازتعقیب شکل موجی که بیشترین همبستگی را با شکل موج میانگین در هر دوره حاصل می‌کند) استفاده شده است [۱۶].

۴-۳- تولید سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای بازتعقیب

در پایان به‌منظور تولید سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مأموریت ارتفاع‌سنجی سنتینل- ۳آ با استفاده از رویکردهای باز تعقیب مورد بررسی در این مطالعه و ارزیابی آن با سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مشاهدات نوسان نگار محلی مراحل ۱ تا ۵ به شرح زیر در این پژوهش انجام شده است [۱۵]:

۱- ایجاد سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای

سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای در هر دوره برداشت ماهواره با استفاده از پردازش داده‌های سطح دو و رویکردهای باز تعقیب شکل موج شرح داده‌شده در بخش پیشین طبق رابطه (۴) تشکیل شد.

۲- حذف مشاهدات اشتباه در سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای

مشاهدات اشتباه از سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای با برازش یک مدل خطی و سطح اطمینان ۹۵ درصد مطابق شکل (۸) شناسایی و از سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای در هر دوره حذف شدند.

۳- سری زمانی ارتفاع آب گذر

با توجه به برتری نمایندگی میانه سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای نسبت به میانگین آن در هر دوره [۳۸]، مقدار میانه سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای در تمامی دوره‌ها کنار هم قرارداده‌شد و سری زمانی ارتفاع آب نهایی گذر مربوطه تشکیل شد.

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

با توجه به متفاوت بودن سطح‌مبنا ارتفاعی ارتفاع‌سنج و نوسان نگار محلی، اختلاف این دو سطح‌مبنا با استفاده از میانگین دو سری زمانی (حاصل از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و نوسان نگار محلی) جبران شد. این بایاس برای هر ماهواره ارتفاع‌سنجی و در هر مکان می‌تواند از چند دسی- متر تا چندین متر متغیر باشد.

۵- ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب گذر با داده‌های نوسان نگار محلی

ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب مورد بررسی در این پژوهش با استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای نسبت به سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مشاهدات نوسان نگار محلی با استفاده از پارامتر جزر خطای مربعی متوسط[3] (*RMSE*) به‌عنوان شاخص معرفی کننده صحت نتایج طبق رابطه (۲۴)، صورت پذیرفت.

$$RMSE_{x,y}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-y_i\right)^2}{n}} \qquad \text{رابطه(۲۴)}$$

در رابطه (۲۴)، x_i نتایج حاصل، y_i داده‌های مرجع (نوسان نگار محلی) و n تعداد داده‌ها است.

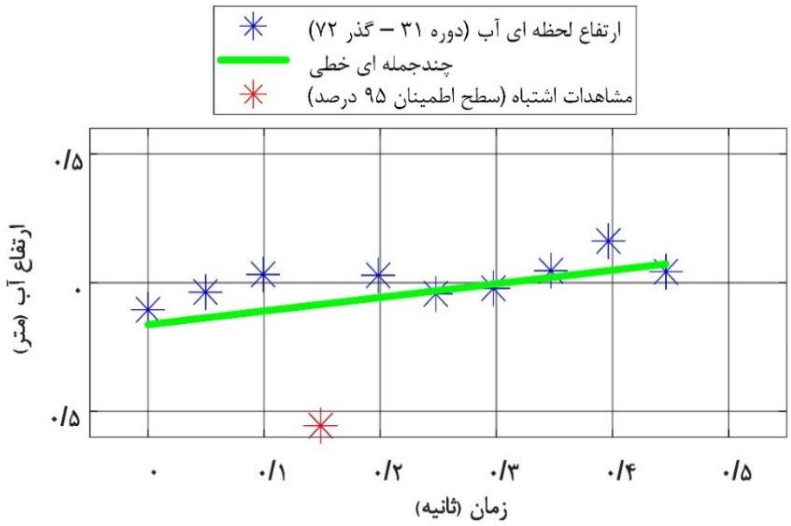
[1] *Sea-ice*

[2] *Ice-sheet*

[3] *Root Mean Square Error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]



شکل ۸: مدل خطی برازش داده‌شده به سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۳۱ گذر ۷۲

۵- نتایج عددی و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از ارزیابی رویکردهای باز تعقیب مختلف شکل موج مورد بررسی در پژوهش و همچنین پردازش داده‌های سطح دو پرداخته می‌شود. در جدول (۳) نتایج عددی و شکل (۹) نمودار میله‌ای ارزیابی سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای موجود در داده سطح دو[1] در مقایسه با نوسان نگار محلی با پارامتر *RMSE* ارائه شده است.

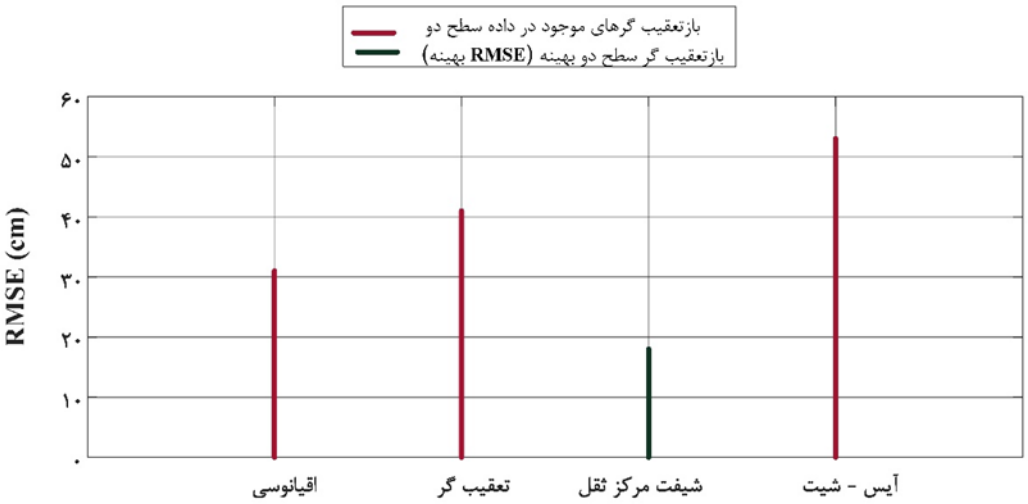
همان‌طور که از نتایج عددی موجود در جدول (۳) و شکل (۹) مشخص است، باز تعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل نسبت به سایر باز تعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو نتیجه بهتری حاصل کرده است. لازم به ذکر است که این باز تعقیب‌گر بر اساس حد آستانه (مطالعات پیشین کارایی بهینه آن را معرفی کرده‌اند) عمل می‌کند و عملکردی مشابه مدل قدیمی آن (دقت کافی نداشت) ندارد. به همین دلیل در این مورد مطالعاتی نیز عملکرد بهینه آن مشاهده شده است. باوجودآنکه باز تعقیب گر سی- آیس ازلحاظ عددی بهترین نتیجه را حاصل کرده است اما این نتیجه قابل‌قبول نیست زیرا نرخ داده قابل‌قبولی ارائه نکرده است. به‌عبارتی‌دیگر مقادیر *Nan* زیادی به‌عنوان ارتفاع آب برای دوره‌های مختلف خروجی داده که سبب شده است ارتفاع آب برای تمامی دوره زمانی مطالعاتی در دسترس نباشد. از طرفی دیگر مقدار *RMSE* پایین حاصل از این باز تعقیب‌گر، کاذب و به دلیل پایین بودن نرخ داده خروجی است. نمودار سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای سطح دو و نوسان نگار محلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

[1] *On-board Re-tracker*

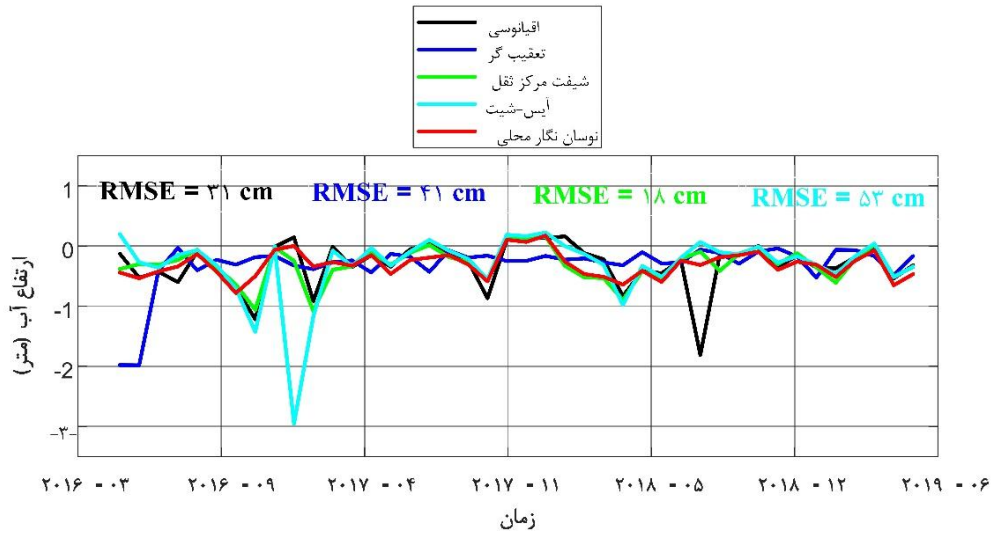
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

جدول ۳ : ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب‌گرهای سطح دو در مقایسه با نوسان نگار محلی

باز تعقیب گرهای سطح دو	تعقیب گر	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی- آیس	آیس- شیت
RMSE (cm)	۴۱	۳۱	۱۸	۱۷ (غیرقابل‌قبول)	۵۳



شکل ۹: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای سطح دو در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی



شکل۱۰: سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب‌گرهای سطح دو و نوسان نگار محلی

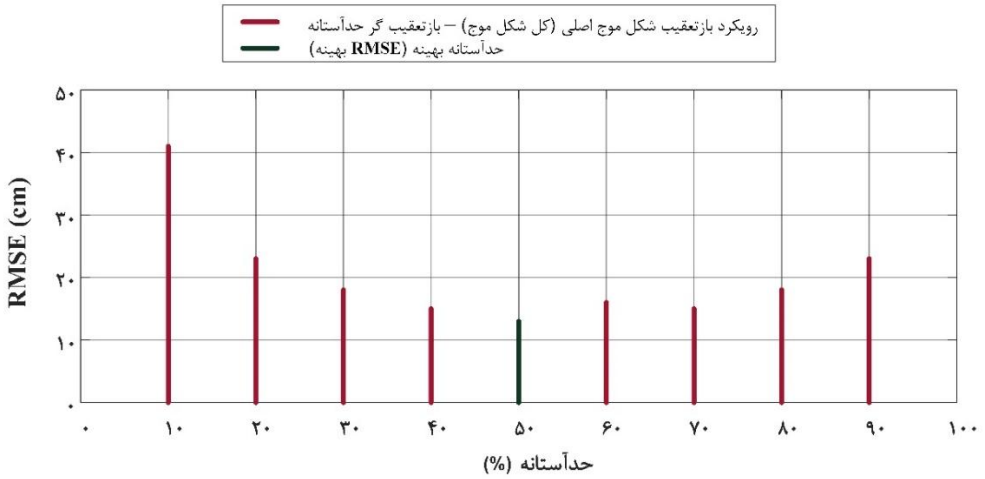
جدول (۴) نتایج عددی و شکل (۱۱) نمودار میله‌ای نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکرد باز تعقیب کل شکل موج اصلی با استفاده از الگوریتم حد آستانه در آستانه‌های مختلف در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی با پارامتر *RMSE* را ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

جدول ۴: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب گر حد آستانه با رویکرد باز تعقیب کل شکل موج اصلی در مقایسه با نوسان نگار محلی

حد آستانه (٪)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
RMSE (cm)	۴۱	۲۳	۱۸	۱۵	۱۳	۱۶	۱۵	۱۸	۲۳



شکل۱۱: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکرد باز تعقیب کل شکل موج اصلی با استفاده از الگوریتم حد آستانه در آستانه‌های مختلف در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی

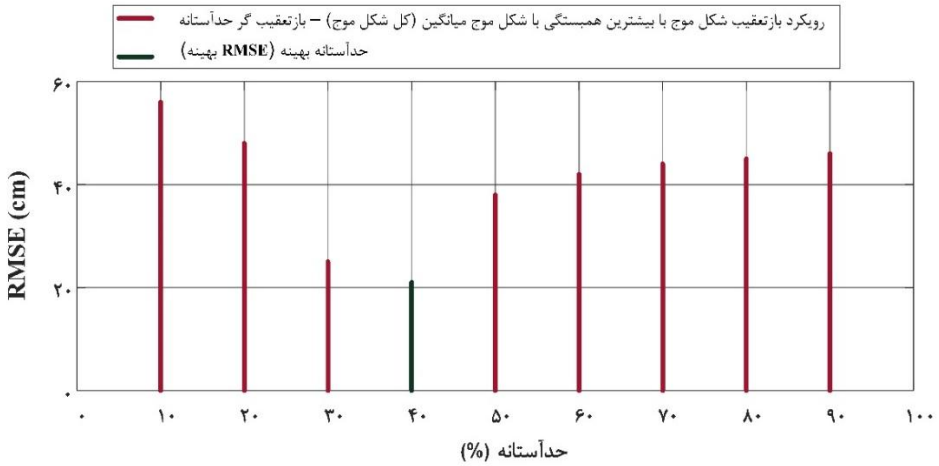
نتایج عددی جدول (۴) و شکل (۱۱) نشان می‌دهند که در باز تعقیب شکل موج اصلی، حد آستانه بهینه، ٪۵۰ و مقدار *RMSE*، ۱۳ سانتی‌متر است. با مقایسه نتایج عددی دو رویکرد فوق می‌توان بیان کرد باز تعقیب کل شکل موج اصلی با الگوریتم حد آستانه نسبت به باز تعقیب گر بهینه سطح دو (شیفت مرکز ثقل) نتیجه مطلوب حاصل کرده است.

جدول (۵) نتایج عددی و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نیز به ترتیب نمودارهای میله‌ای نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب شکل موجی با بیشترین همبستگی با شکل موج میانگین و همچنین باز تعقیب شکل موج میانگین با استفاده از الگوریتم حد آستانه در آستانه‌های مختلف در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی با پارامتر *RMSE* را ارائه می‌دهند.

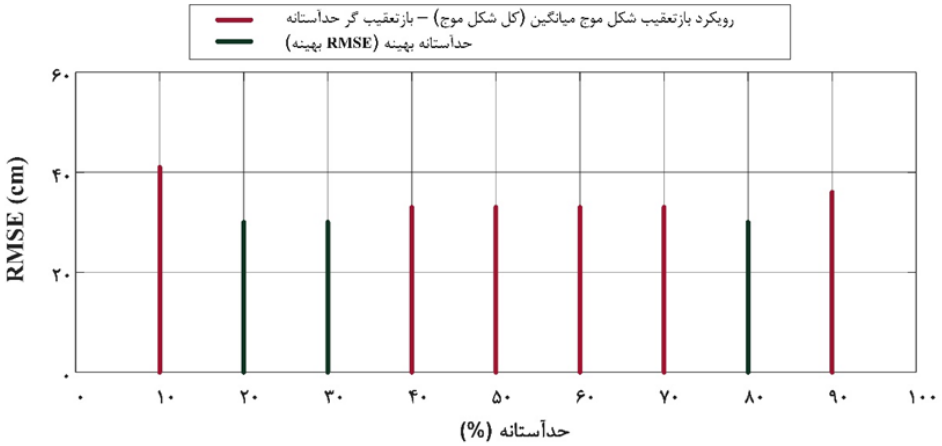
جدول ۵: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب‌گر حد آستانه با رویکردهای باز تعقیب شکل موج با بیشترین همبستگی و شکل موج میانگین در مقایسه با نوسان نگار محلی (*RMSE: (Maxcorr / Mean Waveform) (cm)*)

حد آستانه (٪)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
RMSE (cm)	۵۶/۴۱	۴۸/۳۰	۲۵/۳۰	۲۱/۳۳	۳۸/۳۳	۴۲/۳۳	۴۴/۳۳	۴۵/۳۰	۴۶/۳۶

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]



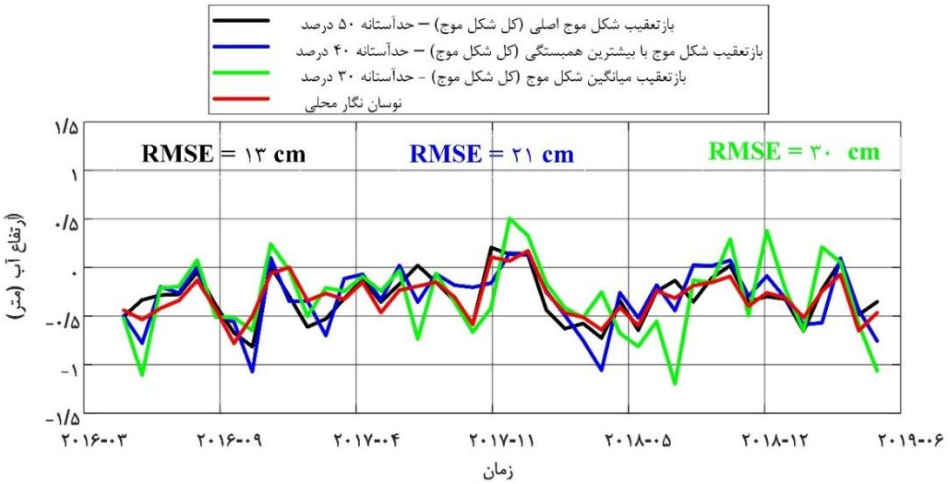
شکل۱۲: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکرد باز تعقیب بیشترین همبستگی در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی



شکل۱۳: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکرد باز تعقیب شکل موج میانگین در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی

نتایج عددی موجود در جدول (۵) و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند که رویکرد باز تعقیب شکل موجی با بیشترین همبستگی با شکل موج میانگین در هر دوره به ازای حد آستانه ۴۰ مقدار *RMSE* بهینه ۲۱ سانتی‌متر و رویکرد باز تعقیب شکل موج میانگین در هر دوره مقدار *RMSE* بهینه ۳۰ سانتی‌متر را به ازای آستانه‌های ۳۰،۲۰ و ۸۰ نتیجه می‌دهد. با مقایسه سه نتیجه عددی اخیر می‌توان کارایی بهینه رویکردهای باز تعقیب را به ترتیب شکل موج اصلی، باز تعقیب‌گر سطح دو بهینه، بیشترین همبستگی و در آخر میانگین شکل موج بیان کرد. شکل (۱۴) نمودار سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای شکل موج اصلی، میانگین شکل موج و بیشترین همبستگی با استفاده از الگوریتم باز تعقیب حد آستانه را به ازای حد آستانه بهینه نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

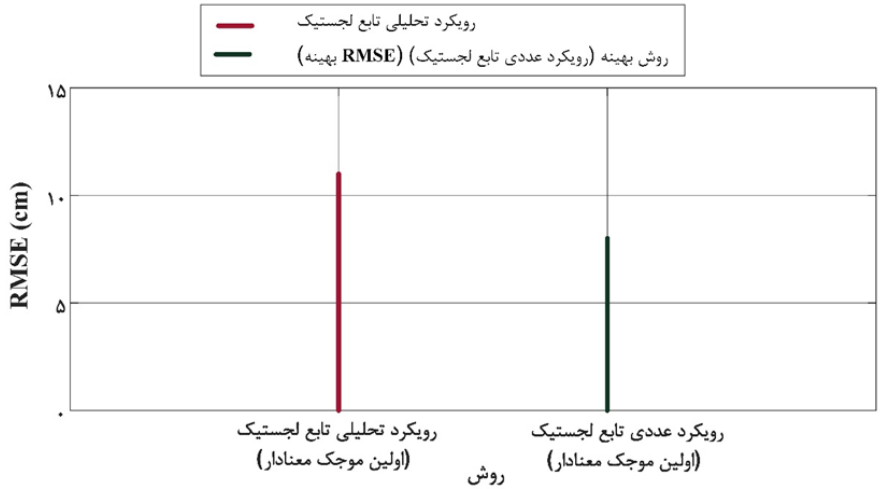


شکل۱۴: سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای بازتعیقب شکل موج اصلی، میانگین شکل موج و بیشترین همبستگی با استفاده از الگوریتم حد آستانه به ازای آستانه بهینه و نوسان نگار محلی

جدول (۶) نتایج عددی و شکل (۱۵) نمودار میله‌ای ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از روش‌های پیشنهادی باز تعقیب شکل موج با استفاده از برازش تابع لجستیک به اولین موجک معنادار شکل موج با رویکرد عددی و تحلیلی، در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی با پارامتر *RMSE* را ارائه می‌دهد.

جدول ۶: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب شکل موج با استفاده از تابع لجستیک با رویکردهای تحلیلی و عددی در مقایسه با نوسان نگار محلی

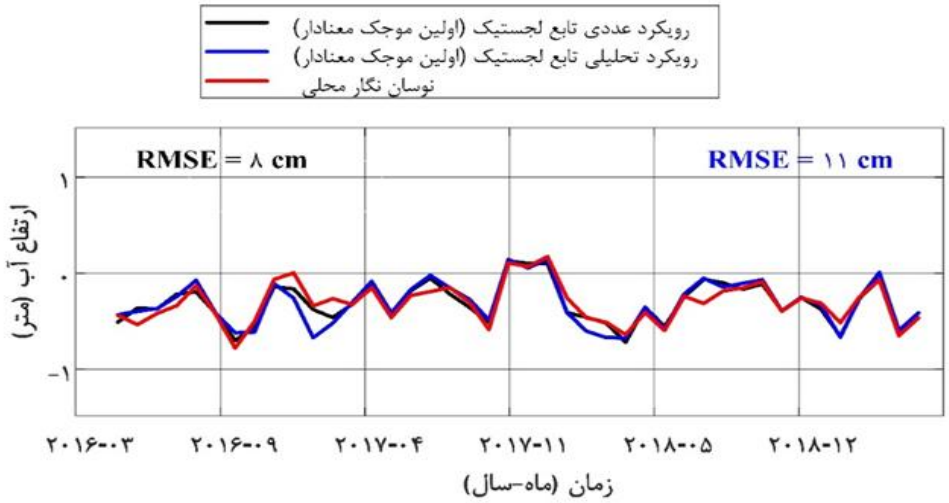
تابع لجستیک	رویکرد عددی	رویکرد تحلیلی
RMSE (cm)	۸	۱۱



شکل۱۵: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای مختلف روش باز تعقیب لجستیک در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

نتایج عددی موجود در جدول (۶) و شکل (۱۵) نشان می‌دهند، رویکرد عددی در مقایسه با رویکرد تحلیلی در برازش تابع لجستیک به شکل موج و باز تعقیب آن‌ها نتیجه بهتری حاصل کرده است. این نتیجه عملکرد بهینه باز تعقیب‌گرهای تجربی در مقایسه با باز تعقیب‌گرهای ریاضی را تائید و علاوه بر آن چالش برازش باز تعقیب‌گر ریاضیاتی به شکل موج را حتی با محلی کردن محدوده برازش تائید می‌کند (شکل (۱۶)). سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای عددی و تحلیلی روش باز تعقیب لجستیک را نشان می‌دهد.



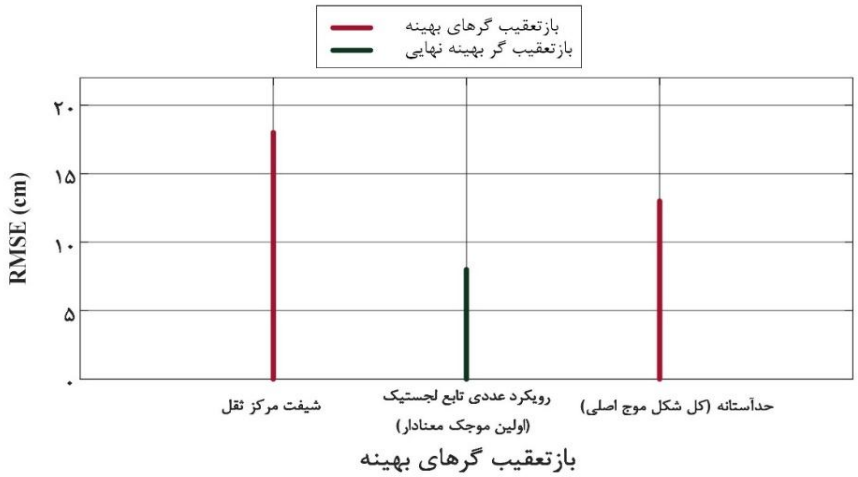
شکل۱۶: سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای مختلف روش باز تعقیب لجستیک و نوسان نگار محلی

مقادیر بهینه *RMSE* سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو و یک با رویکردهای مختلف باز تعقیب شکل موج در جدول (۷) و نمودار میله‌ای آن در شکل (۱۷) معرفی شده است.

جدول ۷: نتایج بهینه ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از باز تعقیب شکل موج با استفاده از رویکردهای مختلف مورد بررسی در مقایسه با نوسان نگار محلی

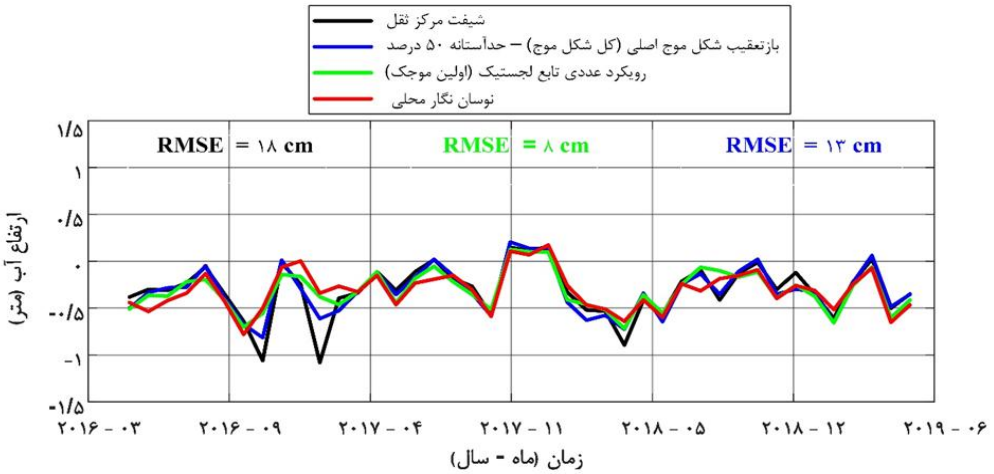
روش‌های باز تعقیب	*RMSE (cm)*
پردازش سطح دو	۱۸
شکل موج اصلی (کل شکل موج)	۱۳
بیشترین همبستگی (کل شکل موج)	۲۱
میانگین شکل موج (کل شکل موج)	۳۰
رویکرد تحلیلی تابع لجستیک (اولین موجک معنادار)	۱۱
رویکرد عددی تابع لجستیک (اولین موجک معنادار)	۸

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]



شکل۱۷: نمودار میله‌ای معرفی نتایج عددی ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای بهینه مختلف باز تعقیب در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی

بر اساس جدول (۷) و شکل (۱۷)، با مقایسه تمامی نتایج عددی می‌توان کارایی رویکردهای باز تعقیب را به ترتیب به‌صورت: تابع لجستیک با رویکرد عددی، تابع لجستیک با رویکرد تحلیلی، باز تعقیب شکل موج اصلی با الگوریتم حد آستانه، باز تعقیب‌گر سطح دو، رویکرد بیشترین همبستگی و میانگین شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه بیان کرد. تابع ریاضی پیشنهادی در این روش در مقادیر *RMSE* در حالت بهینه خود (رویکرد عددی) ۳ سانتی‌متر نسبت به رویکرد تحلیلی، ۱۰ سانتی‌متر نسبت به باز تعقیب‌گر بهینه سطح دو، ۵ سانتی‌متر نسبت به حد آستانه بهینه در باز تعقیب شکل موج اصلی، ۱۳ سانتی‌متر نسبت به رویکرد بیشترین همبستگی و ۲۲ سانتی‌متر نسبت به میانگین شکل موج کارایی بهتر داشته است. شکل(۱۸) سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب بهینه مورد بررسی در پژوهش و نوسان نگار محلی را نشان می‌دهد.



شکل۱۸: سری زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای باز تعقیب بهینه مورد بررسی در پژوهش و نوسان نگار محلی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

۶- نتیجه‌گیری

به‌منظور افزایش کارایی تکنیک ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق ساحلی، از بازتعقیب شکل موج‌ها استفاده می‌شود. ازآنجاکه باز تعقیب‌گرهای ریاضیاتی به دلیل مغشوش بودن شکل موج‌ها کارایی ضعیفی نسبت به باز تعقیب‌گرهای تجربی دارند، مطالعات پیشین باز تعقیب اولین موجک معنادار با استفاده از الگوریتم حد آستانه را پیشنهاد کرده‌اند. در این پژوهش تابع لجستیک به‌عنوان یک باز تعقیب‌گر با دو جنبه ریاضیاتی و تجربی معرفی‌شده است. این باز تعقیب‌گر در دو رویکرد عددی (معادل با یک باز تعقیب‌گر تجربی) و رویکرد تحلیلی (معادل با یک باز تعقیب‌گر ریاضیاتی) به اولین بخش صعودی معنادار شکل موج برازش یافت. علاوه بر باز تعقیب‌گر معرفی‌شده، تعقیب‌گر و باز تعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو، رویکرد باز تعقیب شکل موج اصلی، بیشترین همبستگی و میانگین شکل موج با استفاده از الگوریتم حد آستانه نیز بررسی شد. به‌منظور ارزیابی کارایی رویکردهای بازتعقیب مختلف در پژوهش حاضر، پایش ارتفاع آب شمال شرقی سواحل استونی با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای سنتینل-۳آ درگذر شماره ۷۲ و بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۵/۰۸ الی ۲۰۱۹/۰۵/۲۰ صورت پذیرفت. تابع ریاضی پیشنهادی در این پژوهش در مقادیر *RMSE* در رویکرد عددی ۳ سانتی‌متر نسبت به رویکرد تحلیلی، ۱۰ سانتی‌متر نسبت به باز تعقیب‌گر بهینه سطح دو، ۵ سانتی‌متر نسبت به حد آستانه بهینه در باز تعقیب شکل موج اصلی، ۱۳ سانتی‌متر نسبت به رویکرد بیشترین همبستگی و ۲۲ سانتی‌متر نسبت به میانگین شکل موج بهبود داشته است. بنابراین نتایج حاصل ضمن تائید کارایی بهینه بازتعقیب‌گرهای تجربی نسبت به بازتعقیب‌گرهای ریاضیاتی، تابع لجستیک را به‌عنوان یک بازتعقیب‌گر ریاضیاتی (رویکرد تحلیلی) و یک بازتعقیب‌گر تجربی (رویکرد عددی) کارا در پایش ارتفاع آب نواحی شمال شرقی ساحل کشور استونی، با چالش اغتشاش شکل موج معرفی می‌کنند. پیشنهاد می گردد در تحقیقات آتی، مناطق مطالعاتی بیشتری به منظور بررسی جامعیت کارایی تابع لجستیک به عنوان یک بازتعقیب گر مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] *Y. Jia, K. Xiao, M. Lin, and X. Zhang, "Analysis of Global Sea Level Change Based on Multi-Source Data," Remote Sensing, vol. 14, no. 19, p. 4854, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/14/19/4854.*

[2] *J. M. Magalhaes et al., "Using a Tandem Flight Configuration between Sentinel-6 and Jason-3 to Compare SAR and Conventional Altimeters in Sea Surface Signatures of Internal Solitary Waves," Remote Sensing, vol. 15, no. 2, p. 392, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/2/392*

[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, no. 1, pp. 33-57, 2017/01/01 2017, doi :10.1007/s10712-016-9392-0.*

[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 Sentinel3A," J Hydrogeol Hydrol Eng, vol. 8, no. 3, 2019.*

[5] *Z. Hong, J. Yang, S. Liu, Y. Jia, C. Fan, and W. Cui, "Coastal Waveform Retracking for HY-2B Altimeter Data by Determining the Effective Trailing Edge and the Low Noise Leading Edge," Remote Sensing, vol. 14, no. 19, p. 5026, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/14/19/5026.*

[6] *S. Vignudelli et al., "Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone," Surveys in Geophysics, vol. 40, no. 6, pp. 1319-1349, 2019/11/01 2019, doi:*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

10.1007/s10712-019-09569-1.

[7] H. Wang and Z. Huang, "Waveform Decontamination for Improving Satellite Radar Altimeter Data Over Nearshore Area: Upgraded Algorithm and Validation," (in English), Frontiers in Earth Science, Original Research vol. 9, 2021-September-21 2021, doi: 10.3389/feart.2021.748401.

[8] 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, no. 15, pp. 5680-5694, 2020/08/02 2020, doi: 10.1080/01431161.2019.1681605.

[9] C. Gommenginger et al., "Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts," in Coastal Altimetry, S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 61-101.

[10] T. V. Martin, H. J. Zwally, A. C. Brenner, and R. A. Bindschadler, "Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms," Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 88, no. C3, pp. 1608-1616, 1983, doi: https://doi.org/10.1029/JC088iC03p01608.

[11] D. J. Wingham, C. Rapley, and H. D. Griffiths, "NEW TECHNIQUES IN SATELLITE ALTIMETER TRACKING SYSTEMS," 1986.

[12] 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, no. 5, pp. 1108-1116, 1995, doi: 10.1109/36.469474.

[13] H. Lee et al., "Validation of Jason-2 Altimeter Data by Waveform Retracking over California Coastal Ocean," Marine Geodesy, vol. 33, no. sup1, pp. 304-316, 2010/08/16 2010, doi: 10.1080/01490419.2010.488982.

[14] K. H. Tseng et al., "The Improved Retrieval of Coastal Sea Surface Heights by Retracking Modified Radar Altimetry Waveforms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 2, pp. 991-1001, 2014, doi: 10.1109/TGRS.2013.2246572..

[15] 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, no. 2, pp. 947-962, 2021/07/15/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.024.

[16] 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, Modern Geomatics Technologies and Applications,Tabriz,Iran,2021

[17] R. Deakin, "The Logistic Function," 2018.

[18] R. A. Ramos, "LOGISTIC FUNCTION AS A FORECASTING MODEL: IT'S APPLICATION TO BUSINESS AND ECONOMICS," 2013.

[19] P. A. Mensah, W. Obeng-Denteh, K. B. Gyamfi, M.-A. M. Shior, and B. C. Agbata, "On the study of chaotic behavior using the logistic function," Science World Journal, vol. 16, no. 4, pp. 452-454, 2021.

[20] Y. Yamak, M. Kılıçaslan, and R. Demirci, "Image Filter With Logistic Functions," in 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 22-24 Oct. 2020 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9255100.

[21] D. B. Chelton, J. C. Ries, B. J. Haines, L.-L. Fu, and P. S. Callahan, "Chapter 1 Satellite Altimetry," in International Geophysics, vol. 69, L.-L. Fu and A. Cazenave Eds.: Academic Press, 2001, pp. 1-ii.

[22] R. Arabsahebi, B. voosoghi, and M.-J.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

Tourian, "Sensitivity Analysis of Brown Model Waveform in Radar Altimetry," (in eng), Journal of Geospatial Information Technology, Research vol. 8, no. 2, pp. 21-38, 2020, doi: 10.29252/jgit.8.2.21.

[23] 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, no. 4, pp. 331-352, 2018/07/04 2018, doi: 10.1080/01490419.2018.1448029.

[24] C. Kuo, T. Yang, H. Kao, C. Wang, W. Lan, and H. Tseng, "Improvement of Envisat Altimetric Measurements in Taiwan Coastal Oceans by a Developed Waveform Retracking System," Journal of Environmental Informatics, vol. 31, no. 1, 2018.

[25] M. J. Fernandes and C. Lázaro, "Independent Assessment of Sentinel-3A Wet Tropospheric Correction over the Open and Coastal Ocean," Remote Sensing, vol. 10, no. 3, p. 484, 2018. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/484.

[26] 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, no. 6, p. 426, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2077-1312/8/6/426.

[27] S. Roohi, "Performance evaluation of different satellite radar altimetry missions for monitoring inland water bodies," Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, 2017.

[28] 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, no. 4, pp. 204-216, 2006/07/01 2006, doi: 10.1007/s00190-006-0052- x

[29] G. Rządkowski and L. Sobczak, "A generalized logistic function and its applications," Foundations of Management, vol. 12, no. 1, pp. 85-92, 2020.

[30] EUMETSAT, "Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook," 2017.

[31] 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, no. 4, pp. 1535-1555, 2021/02/16 2021, doi: 10.1080/01431161.2020.1836427.

[32] G. D. Quartly et al., "The Roles of the S3MPC: Monitoring, Validation and Evolution of Sentinel-3 Altimetry Observations," Remote Sensing, vol. 12, no. 11, p. 1763, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1763.

[33] C. Donlon et al., "The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission," Remote Sensing of Environment, vol. 120, pp. 37-57, 2012/05/15/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024.

[34] M. Mostafavi, N. Delpeche-Ellmann, and A. Ellmann, "Accurate Sea Surface heights from Sentinel-3A and Jason-3 retrackers by incorporating High-Resolution Marine Geoid and Hydrodynamic Models," Journal of Geodetic Science, vol. 11, no. 1, pp. 58-74, 2021, doi: doi:10.1515/jogs-2020-0120.

[35] A. Liibusk, T. Kall, S. Rikka, R. Uiboupin, Ü. Suursaar, and K.-H. Tseng, "Validation of Copernicus Sea Level Altimetry Products in the Baltic Sea and Estonian Lakes," Remote Sensing, vol. 12, no. 24, p. 4062, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4062.

[36] F. Leberl, "Observations and Least Squares: Edward M. Mikhail, with

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

contributions by F. Ackermann. Dun-Donelly, New York, NY, 1976, 497 pp., hard cover, US $25.00," ed: Elsevier, 1978.

[37] C. L. Satellites, "Surface Topography Mission (STM) SRAL/MWR L2 Algorithms Definition, Accuracy and Specification," Ramonville St-Agne, France, 2011.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.12, No.3, Autumn 2024

Research Paper

Retracking contaminated Waveforms of Sentinel-3A Satellite Altimetry Observations in Coastal Areas by an Algorithm Based on Logistic Function (Case Study: Northeastern Coasts of Estonia)

Arash Amini [1]*, Behzad Voosoghi [2], Seyed Masoud Fatemi [3], Parisa Agar [4], Mahmoud Pirooznia [5]

1- PhD Student of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
2- Professor of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
3- Associate Professor of Faculty of Mathematics, K. N. Toosi University of Technology
4- Graduated with Master's Degree, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
5- Graduated with Ph.D. Degree, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

The use of satellite altimetry to monitor the sea surface height (SSH) in the coastal regions requires using retracking methods to correct the range of altimeter. This issue is caused by the difference between the ideal ocean waveform and the coastal contaminated waveform affected by some factors such as shallow depth, the presence of non-aquatic effects, and the large footprint of the altimeter. In this regard, in this study, the retracking method based on the logistic function has been proposed due to the geometric and parametric agreement of this function with the satellite altimetry waveforms.This function has two analytical approaches (equivalent to a mathematical retracker) based on the mathematical fitting of the function to the first meaningful sub-waveform and a numerical approach (equivalent to an experimental retracker) based on selecting the optimal retracker gate, for that the function has the highest correlation with the first meaningful sub-waveform. Besides the proposed method, the retracking approaches of full waveform, mean waveform, and waveform with the maximum correlation based on threshold retracking method, the tracker and retrackers available in the level-2 data are also implemented. In order to check the effectiveness of the proposed method, the monitoring of SSH in the northeastern coast of Estonia using the Sentinel-3A mission, pass number of 72, with SAR mode from the cycle of 4 to 45, equivalent to the period of 05/08/2016 to 05/20/2019 is done. The SSH time series obtained from the retracking approaches are compared with the in situ tide gauge data using root mean square error (RMSE) as a statistical parameter. The results of the RMSE value for the retracking approaches of the full waveform, the mean waveform, the waveform with the maximum correlation by the optimal threshold in threshold retracking, the optimal level-2 data, the analytical approach of the logistic function, and the numerical approach of the logistic function are 13cm, 30cm, 21cm, 18cm, 11cm and 8 cm respectively. The results show that the numerical approach of the logistic function has optimal efficiency compared to the analytical approach of this function. Moreover, this approach has superiority over the other retracking methods which were investigated in this research. Therefore, the logistic function can be recognized as an effective retracker method in both mathematical and experimental aspects and it can be used in the SSH monitoring of this research coastal area.

Key words: *Satellite altimetry, coastal areas, synthetic aperture radar (SAR), waveform retracking, logistic function.*

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.1]