نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۴
Vol.13, No.1, Spring 2025
۱۹ -۴۵
مقاله پژوهشی

رویکردی مرجع مبنا برای بهبود صحت مشاهدات سری‌های زمانی ارتفاع آب در نواحی ساحلی و دریاچه‌ها

زهرا اسماعیلی[۱]، بهزاد وثوقی[۲*]، آرش امینی[۳]، محمود پیروزنیا[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- استاد گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۴- دانش‌آموخته دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

چکیده

کارایی ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در نواحی ساحلی و آب‌های بسته، به‌دلیل افزایش نویز مشاهدات پایه (شکل موج‌ها) با محدودیت رو به رو است. این محدودیت با ظهور نسل جدید مأموریت‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و ارائه الگوریتم‌های مختلف بازتعقیب تا حدی کاهش یافته اما همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. استفاده از تمامی داده‌های ارتفاعی دوره‌های مختلف ارتفاع سنجی (کل)، میانه و میانگین آن‌ها، رویکردهای پیشین در ارائه نماینده دوره و تشکیل سری زمانی ارتفاع آب یک گذر بوده‌اند. در این پژوهش سعی شده است با ارائه رویکردی نوین تحت عنوان رویکرد مرجع مبنا این نماینده برگزیده شود. در رویکرد مرجع مبنا، نماینده با ویژگی ارتفاع آب نزدیک‌تر به سری زمانی ارتفاع آب مرجع انتخاب شده تا صحت سری زمانی ارتفاع آب در نواحی نزدیک به ساحل (۱-۰ کیلومتری) و همچنین سری زمانی حاصل از مأموریت‌های نسل قدیم ارتفاع سنجی در آب‌های بسته بهبود یابد. سری زمانی ارتفاع آب مرجع برای نواحی ساحلی در فاصله دور از ساحل (۱-۵ کیلومتری) و برای دریاچه، از مأموریت نسل جدید ارتفاع سنجی حاصل شده است. علاوه بر رویکرد پیشنهادی، رویکردهای کل، میانگین و میانه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به‌منظور افزایش صحت سری زمانی ارتفاع آب در فاصله یک کیلومتری سواحل شمالی و جنوب‌غربی خلیج آلکودیا از داده‌های گذر ۲۴۴ سنتینل-۳آ و ۵۷ سنتینل-۳ب و همچنین از داده‌های گذر ۱۴۱ سنتینل-۳آ و ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ عبوری از دریاچه وترن واقع در کشور سوئد در بازه زمانی ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ استفاده شده است. نتایج ارزیابی سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکرد پیشنهادی نسبت به بهینه‌ترین رویکرد پیشین در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی، در دریاچه مطالعاتی ۴۳ الی ۷۲ درصد و در مناطق ساحلی مورد بررسی ۷ الی۸۷ درصد بهبود *RMSE* حاصل کرده است. همچنین این مقایسه، افزایش ۳۳ درصدی و ۶ الی ۴۰ درصدی پارامتر ضریب همبستگی را به ترتیب برای دریاچه وترن و سواحل آلکودیا نشان می‌دهد. با استفاده از رویکرد پیشنهادی همچنین مقادیر میانه و میانگین سری‌های زمانی به ترتیب عملکرد بهینه داشته‌اند. رویکرد پیشنهادی در این پژوهش علاوه بر افزایش صحت سری زمانی ارتفاع آب در فاصله نزدیک به ساحل، سبب افزایش کارایی مأموریت‌های نسل قدیم ارتفاع‌سنجی در آب‌های بسته، افزایش تعداد مشاهدات و توزیع مناسب آن‌ها در این نواحی شده است.

کلیدواژه‌ها : ارتفاع سنجی ماهواره‌ای، سنتینل-۳، مرجع مبنا، میانه، میانگین.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران- خیابان ولیعصر- تقاطع میرداماد غربی- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری.
تلفن: ۰۲۱-۸۸۸۷۷۰۷۰

Email: Vosoghi@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

۱- مقدمه

بالا رفتن سطح آب دریاها ناشی از گرمایش جهانی، سبب افزایش اهمیت نظارت بر تغییرات سطح دریا در امتداد خطوط ساحلی شده است [۱]. دریاچه‌ها که حدود ۳ درصد از سطح زمین را تشکیل می‌دهند، منابع آب شیرین حیاتی برای بقای موجودات زنده و انسان‌ها هستند [۲]. لذا نظارت دقیق و مداوم بر این منابع آبی ضروری است. ایده ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ مطرح و اولین ماهواره ارتفاع‌سنجی (اسکای‌لب[1]) در سال ۱۹۷۳ به فضا پرتاب شد [۳]. ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی اندازه‌گیری‌های با صحت بالا، پایدار و تکرارپذیر از ارتفاع سطح آب، تحت هر شرایط آب و هوایی، به صورت جهانی و رایگان ارائه می‌دهند[۴ و ۵]. این امر با استفاده از داده‌های نوسان نگار محلی[2] و ابزارهای زمینی، بدلیل محدودیت‌هایی مانند هزینه بالای تعمیر و نگهداری، محدودیت تعداد، عدم پوشش همگن آب‌های کره زمین و وابستگی به شرایط محیطی قابل تحقق نبود [۶ و ۷]. ارتفاع سنجی ماهواره‌ای در ابتدا برای مشاهدات ارتفاع سطح دریا (*SSH*[3]) طراحی شده بود. امروزه با توسعه استراتژی‌های جدید پردازش داده، اندازه‌گیری‌های ارتفاع سنجی بر روی آب‌های داخلی مانند دریاچه‌ها، سدها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها نیز ممکن است [۸].

در گذشته، بیشتر ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای از جمله توپکس- پوزایدن[4]، سری جیسون[5] و انویست[6]، پالس محدود[7] بوده و بدلیل استفاده از روش‌های قدیمی برداشت و پردازش شکل موج، دقت کمی در برآورد ارتفاع سطح آب (خصوصاً نواحی نزدیک ساحل) داشتند[۶]. پردازش در حالت رادار با دریچه مصنوعی (*SAR*[8]) که اولین بار توسط رنی[9] در سال ۱۹۹۸ مطرح شد[۹]، موجب ظهور نسل جدید ماهواره‌ها از جمله کرایوست- ۲[10] و سنتینل-۳[11] گردید. ارتفاع‌سنج *SAR*، پالس‌ها را به صورت گروهی[12] با فرکانس تکرار پالس بالا به سطح زمین ارسال کرده که موجب کاهش نویز و افزایش دقت داده‌ها می‌شوند. در ارتفاع‌سنج‌های نسل جدید، اندازه ردپا (*footprint*) در راستای عرض برداشت[13] همانند ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم (حدود ۷ کیلومتر) بوده و در امتداد برداشت[14] به ۳۰۰ متر کاهش یافته است. این مزیت عملکرد ارتفاع‌سنج‌های نسل جدید را به‌خصوص در مناطقی که مسیر زمینی ماهواره عمود بر خط ساحلی است، ارتقا داده اما در مناطقی که مسیر زمینی ماهواره با خط ساحلی زاویه‌ای تند تشکیل می‌دهد، کماکان با چالش مواجه خواهد بود [۱۰ و ۱۱].

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای ابزاری ارزشمند برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب است. با این حال در نواحی ساحلی و دریاچه‌ها، ردپای بزرگ ماهواره و آلودگی ردپای ارتفاع‌سنج به خشکی، موجب اغتشاش شکل موج و در نتیجه برآورد نادرست ارتفاع آب می‌گردد [۱۲ و ۱۳]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران بسیاری با استفاده از مأموریت‌های مختلف ارتفاع سنجی و رویکردهای متفاوت، به بهبود نتایج ارتفاع‌سنجی در این نواحی پرداخته‌اند که در ادامه، به برخی اشاره می‌شود:

روحی (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای بر روی دریاچه ارومیه از داده‌های مأموریت انویست-آر اِی ۲[15] برای تعیین ارتفاع سطح آب استفاده کرد. در این پژوهش مقادیر

[1] *Skylab*
[2] *Tide Gauge*
[3] *Sea Surface Height*
[4] *Topex-Poseidon*
[5] *Jason*
[6] *Envisat*
[7] *Pulse limited*
[8] *Synthetic Aperture Radar*
[9] *Raney*
[10] *Cryosat-2*
[11] *Sentinel-3*
[12] *Burst*
[13] *Across track*
[14] *Along track*
[15] *Envisat-RA2*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

کل، میانگین و میانه ارتفاع سطح آب برای هر دوره در هر گذر[1]ماهواره پردازش و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که سطح ارتفاعی آب حاصل از مقادیر کل دارای حداکثر جذر خطای مربعی متوسط (*RMSE*[2]) و حاصل از مقادیر میانه دارای حداقل *RMSE* نسبت به داده‌های نوسان نگار محلی است. برتری میانه نسبت به میانگین در نمایندگی سری زمانی ارتفاع آب نیز مشهود است [۱۴]. امینی و همکاران (۲۰۱۹) جهت پایش ارتفاعی آب دریاچه ونرن از داده‌های مأموریت ارتفاع سنجی سنتینل-۳آ استفاده کردند. در این پژوهش به‌منظور انتخاب معیار مناسب برای نمایندگی سری زمانی ارتفاع آب، مقادیر *RMSE* حاصل از انتخاب میانه و میانگین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ۶۸٪ موارد میانه نسبت به میانگین بهتر عمل کرده است [۴]. روحی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به بررسی دقت مأموریت‌های ارتفاع سنجی سنتینل-۳آ و کرایوست-۲ بر روی دریاچه ونرن پرداختند. در این پژوهش ارتفاع سطح آب با کنار هم قرار دادن مقادیر میانه در سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای حاصل شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که سنتینل-۳آ با *RMSE* ۹ سانتی‌متر، نتایج بهتری نسبت به کرایوست-۲ در تخمین ارتفاع سطح آب ارائه می‌دهد [۱۵]. پنگ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به بررسی آناملی‌های سطح دریا (*SLA*[3]) در منطقه ساحلی استرالیا پرداختند. برای این منظور از داده‌های مأموریت ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳آ و جیسون-۳ استفاده شد. نتایج نشان داد که آناملی‌های سطح دریا بدست آمده از داده‌های سطح دو سنتینل-۳آ برتری قابل توجهی نسبت به آناملی‌های سطح دریا حاصل از بازتعقیب شکل موج‌های جیسون-۳ دارند [۱۶]. شو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی، سری زمانی پایدار و بلندمدتی از ارتفاع آب ۱۲ دریاچه با اندازه‌های مختلف ایجاد کردند. نتایج نشان داد که مأموریت سنتینل-۳ به دلیل برداشت در حالت *SAR*، بهترین عملکرد را در میان ۱۱ مأموریت مورد بررسی داشته است [۱۷]. صالحی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳آ و جیسون-۳ در پایش ارتفاعی سطح آب در سواحل شمال اسپانیا پرداختند. سری زمانی نهایی ارتفاع آب، با در نظرگرفتن مقدار میانه در ارتفاع آب لحظه‌ای، تشکیل شد. بنابر نتایج حاصل شده، مأموریت سنتینل-۳آ نسبت به مأموریت جیسون-۳، به ویژه در فاصله ۵ کیلومتری ساحل، در برآورد ارتفاع سطح آب، عملکرد مطلوبی داشته است [۱۱]. تیسنگ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های مأموریت ارتفاع سنجی انویست و جیسون-۲، الگوریتمی برای اصلاح شکل موج‌های نزدیک ساحل، پیشنهاد نمودند. در این الگوریتم، میانگین شکل‌موج‌های دور از ساحل (۳۰-۲۰ کیلومتری) به‌عنوان مرجع برای اصلاح شکل موج‌های نزدیک ساحل به کار گرفته شد. این اصلاحات با فرض آنکه شکل موج‌های دور از ساحل به‌خوبی وضعیت سطح آب را در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهند، انجام شدند. در برآورد ارتفاع سطح آب، نتایج نشان داد که بازتعقیب شکل موج‌های اصلاح‌شده[4] در ۷-۱ کیلومتری ساحل نسبت به بازتعقیب شکل موج‌های اصلی[5] *RMSE* کوچکتری دارند [۱۸]. هوانگ و همکاران (۲۰۱۷) یک روش بهبود یافته برای اصلاح شکل موج با استفاده از داده‌های مأموریت جیسون-۲ ارائه دادند. در این روش، برای برآورد ارتفاع سطح آب، میانگین شکل موج‌ها در فاصله ۲۰ کیلومتری ساحل به عنوان شکل موج مرجع در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ارتفاع آب صحیح‌تری در مقایسه با سایر رویکردها ارائه می‌دهد [۱۲]. آگار و

[1] *Pass*
[2] *Root Mean Square Error*
[3] *Sea Level Anomaly*
[4] *Modified waveform*
[5] *Original waveform*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های مأموریت ارتفاع سنجی سنتینل-۳آ در منطقه خلیج فارس و خلیج بیسکای به بازتعقیب شکل موج‌ها پرداختند. در این پژوهش دو رویکرد اصلاح شکل موج و شکل موج غیرآلوده[1] ارائه شد و شکل موج مرجع معیار تشخیص داده‌های پرت قرار گرفت. شکل موج مرجع در رویکرد اول از میانگین‌گیری شکل موج‌ها در هر دوره در فاصله ۲۰-۳۰ کیلومتری ساحل و در رویکرد دوم در فاصله ۰-۲۰ کیلومتری حاصل شد. نتایج حاکی از آن است که در هر دو منطقه مطالعاتی بازتعقیب اولین موجک معنادار[2]در رویکرد دوم نتایج بهینه‌تری نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده است [۱۹].

براساس مطالعات پیشین اشاره شده در بالا، مأموریت سنتینل-۳ عملکرد بهینه‌ای نسبت به سایر مأموریت‌ها دارد. همچنین نتایج نشان داده‌اند که استفاده از سری زمانی ارتفاع آب در فواصل دور از ساحل، می‌تواند به بهبود دقت مشاهدات در نزدیک ساحل منجر شود. همانطور که اشاره شد در مطالعات پیشین رویکردهای استفاده از تمامی داده‌های ارتفاع آب در هر دوره (کل)، انتخاب میانگین و میانه آن‌ها به‌عنوان نماینده هر دوره مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاکی از برتری رویکرد میانه نسبت به سایر انتخاب‌ها می‌باشد. این پژوهش، رویکردی نوین برای این انتخاب را تحت عنوان رویکرد مرجع مبنا معرفی خواهد کرد. در این رویکرد نماینده سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای برای هر دوره، ارتفاع آب نزدیک‌تر به سری زمانی ارتفاع آب مرجع خواهد بود. در این پژوهش به‌منظور بهبود صحت سری زمانی ارتفاع آب در نواحی ساحلی، سری زمانی ارتفاع آب مرجع در فاصله دور از ساحل (۵-۱ کیلومتری) و در دریاچه، سری زمانی ارتفاع آب مرجع حاصل از مأموریت نسل جدید سنتینل۳-آ برای بهبود صحت سری زمانی مأموریت نسل قدیم جیسون-۳ انتخاب شده است. رویه پیشنهادی در این پژوهش ضمن افزایش صحت سری زمانی ارتفاع آب در نواحی ساحلی و دریاچه‌ها، سبب افزایش کارایی مأموریت‌های نسل قدیم ارتفاع سنجی و ارائه توزیع مناسبی از داده‌های ارتفاعی در دریاچه‌ها می‌گردد. سری زمانی نهایی ارتفاع آب حاصل از رویکرد پیشنهادی در این پژوهش و رویکردهای کل، میانه و میانگین با استفاده از داده‌های نوسان نگار محلی با پارامتر *RMSE* و ضریب همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از پارامتر درصد بهبود (*IMP*[3])، میزان بهبود *RMSE* رویکرد مورد نظر ارائه شده است. نتایج برتری رویکرد پیشنهادی را نسبت به رویکردهای پیشین نشان می‌دهند.

۲- مبانی نظری تحقیق

در این بخش، مبانی ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و لزوم بازتعقیب شکل موج‌ها به‌منظور افزایش صحت سری‌های زمانی ارتفاع آب در دریاچه‌ها و نواحی ساحلی مورد بررسی قرار گرفته سپس اشاره مختصری به بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره‌های جیسون-۳ و سنتینل-۳ خواهد شد.

۲-۱- ارتفاع سنجی ماهواره‌ای

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای مشاهده و ثبت تغییرپذیری ارتفاع سطح دریا طراحی شده و به یک فناوری سنجش از راه دور پیشرفته تبدیل شده است [۲۰]. ارتفاع‌سنج راداری که بر روی ماهواره نصب شده است، پالس‌های الکترومغناطیس را با توان و فرکانس مشخص در جهت نادیر ماهواره ارسال می‌کند. بخشی از پالس‌های ارسالی، از سطح منعکس شده و توسط ارتفاع‌سنج دریافت می‌شود. سیستم رادار زمان رفت و برگشت پالس میان ماهواره و سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کند. با ضرب نصف زمان اندازه‌گیری شده (t) در سرعت نور (C)، فاصله ارتفاع‌سنج از سطح (R) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۱ و ۲۲].

[1] *Decontamination waveform*

[2] *First Meaningful Sub-Waveform*

[3] *Improvement percentage*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

رابطه(۱) $$R = \frac{Ct}{2}$$

ارتفاع سطح آب نسبت به یک بیضوی مرجع، از اختلاف ارتفاع مداری ماهواره و فاصله اندازه‌گیری شده از ماهواره تا سطح آب[1]بدست می‌آید. از آن جایی که گازهای خشک، بخار آب و الکترون‌های آزاد در محیط انتشار پالس وجود دارند، سیگنال راداری دچار تأخیر زمانی می‌شود. همچنین وجود نیروهای جاذبی سبب حرکت عمودی سطح می‌شوند. لذا برای برآورد صحیحی از ارتفاع سطح دریا، بایستی تصحیحات محیطی و ژئوفیزیکی به فاصله اندازه‌گیری شده اعمال شود. از طرفی در نواحی ساحلی و آب‌های بسته، بدلیل اغتشاش شکل موج و فاصله گرفتن از مدل استاندارد براون[2] تصحیح بازتعقیب نیز باید اعمال گردد [۴ و ۲۳]. (رابطه (۲))

رابطه(۲) $$SSH_{corr} = R_{alt} - R = R_{alt} - (R_{obs} + C_{ret}) - \Delta C$$

در رابطه (۲)، SSH_{corr} ارتفاع سطح دریا نسبت به یک بیضوی مرجع، R_{alt} ارتفاع مرکز جرم ماهواره نسبت به بیضوی مرجع، R فاصله تصحیح شده و R_{obs} فاصله اندازه‌گیری شده از ماهواره تا سطح می‌باشد. C_{ret} تصحیح بازتعقیب و ΔC مجموع تصحیحات محیطی و ژئوفیزیکی می‌باشد؛ که به ترتیب از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه اند.

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

رابطه(۴) $$\Delta C = \Delta C_{iono} + \Delta C_{dry} + \Delta C_{wet} + \Delta C_{SSB} + \Delta C_{DAC} + \Delta C_{tides}$$

در رابطه (۳)، G_r گیت[3]بازتعقیب شده، G_0 گیت اسمی[4]ارتفاع‌سنج و τ طول پالس ارسالی می‌باشد

[1] *Range*
[2] *Brown*
[3] *Gate*
[4] *Nominal Gate*

[۲۴]. در رابطه(۴)، تصحیح یونسفر (ΔC_{iono})، تصحیح تروپسفر خشک (ΔC_{dry}) و تصحیح تروپسفر تر (ΔC_{wet}) ناشی از تعامل پالس با محیط انتشار موج بوده و تصحیح بایاس وضع دریا (ΔC_{SSB}) ناشی از تعامل پالس با سطح دریا است. ΔC_{DAC} نیز تصحیح دینامیک اتمسفر می‌باشد؛ که همگی تصحیحات محیطی را تشکیل می‌دهند.

همچنین تصحیح پایانی (ΔC_{tides}) تصحیحی ژئوفیزیکی بوده که شامل تصحیحات جزر و مد اقیانوسی، بارگذاری، زمین صلب و قطبی می‌باشد [۲۵].

در این پژوهش از تصحیحات یونسفر، تروپسفر خشک، تروپسفر تر، جزر و مد زمین صلب و جزر و مد قطبی برای هر دو منطقه دریاچه وترن و ساحل آلکودیا استفاده شده است. علاوه بر موارد مذکور، از تصحیح ژئوئید برای دریاچه وترن و تصحیحات جزر و مد بارگذاری و بایاس وضع دریا برای ساحل آلکودیا نیز استفاده شده است [۲ و ۲۶].

۲-۲- بازتعقیب شکل موج

شکل موج‌های بازگشتی از مشاهدات اساسی در ارتفاع سنجی ماهواره‌ای می‌باشند که برای تعیین پارامترهایی مانند فاصله ارتفاع‌سنج تا سطح، ضریب پراکنش[5]، ارتفاع موج موثر[6]و سرعت باد استفاده می‌شود. با گذشت زمان، سنسور رادار نمونه‌های بیشتری را ثبت می‌کند و با میانگین‌گیری، قسمت‌های مختلف شکل موج تشکیل می‌شود [۲۷]. تأخیر زمانی ناشی از تعامل پالس با سطح به فواصل معین، تحت عنوان گیت، تقسیم می‌شود. به این ترتیب، می‌توان شکل موج را به‌عنوان توان دریافتی توسط رادار براساس گیت تعریف نمود [۲۸].

ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در ابتدا برای پایش ارتفاعی محیط‌های اقیانوسی طراحی شده بود. براون در سال ۱۹۷۷ معادله ریاضی شکل موج‌های بازگشتی از سطوح

[5] *Backscatter coefficient*
[6] *Significant Wave Height*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

اقیانوسی (شکل موج براون) را ارائه کرد [۲۹]. در محیط اقیانوسی، نقطه میانی در لبه پیشین شکل موج، نشان دهنده لحظه برخورد پالس ارسالی از سنجنده به سطح متوسط آب است. تعیین دقیق این نقطه برای تعیین ارتفاع سنجنده تا سطح آب و به دنبال آن، محاسبه صحیح ارتفاع آب از سطح دریا، ضروری است [۳۰]. در شکل موج براون، به گیت متناظر با نقطه میانی لبه پیشین، گیت اسمی ارتفاع‌سنج و به فاصله متناظر با آن فاصله بازتعقیب نشده گویند [۳۱ و ۳۲]. شکل موج‌های ارتفاع سنجی در مجاورت خط ساحلی و دریاچه‌ها، به‌دلیل آلوده شدن ردپای ارتفاع‌سنج به سطوح غیرآبی، مغشوش می‌شوند. این امر موجب عدم تطابق گیت اسمی ارتفاع‌سنج با نقطه میانی لبه پیشین شکل موج شده و در نتیجه، ارتفاع ماهواره از سطح به‌طور صحیح گزارش نخواهد شد. به‌منظور بازیابی لحظه صحیح بازگشت سیگنال از سطح، استفاده از الگوریتم‌های بازتعقیب ضروری است. این تکنیک می‌تواند تعداد مشاهدات معتبر را به ویژه در مناطق ساحلی و آب‌های کم عمق داخلی افزایش دهد [۲۲]. علاوه بر این استفاده از بازتعقیب‌گرها امکان انتخاب‌های بهتری را به‌عنوان نماینده در سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای فراهم می‌کند. به تبع آن سری‌های زمانی حاصل از این انتخاب‌ها نیز دارای صحت بالاتری خواهند بود. لازم به ذکر است کیفیت برآورد ارتفاع سطح آب حاصل از ارتفاع‌سنج به نوع الگوریتم بازتعقیب، توپوگرافی سطح، جنس سطح انعکاسی و مأموریت ارتفاع سنجی بستگی دارد. در ادامه به بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو مأموریت‌های ارتفاع سنجی مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- بازتعقیب‌گرهای داده‌های سطح دو مأموریت سنتینل-۳

داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنج سرال (*SRAL*[1])، شامل فاصله تصحیح شده حاصل از بازتعقیب‌گرهای اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، سی- آیس[2]و آیس- شیت[3] است. تعقیب‌گر[4] به بازتعقیب شکل موج نمی‌پردازد و فاصله اندازه‌گیری شده را برمبنای گیت اسمی ارائه می‌دهد. الگوریتم بازتعقیب اقیانوسی[5]مدل تغییر یافته الگوریتم بازتعقیب ساموسا[6] است. الگوریتم ساموسا یک الگوریتم بازتعقیب فیزیکی بوده و با در نظر گرفتن خصوصیات سطح منعکس‌کننده، پارامترهای شکل موج را استخراج می‌کند. الگوریتم شیفت مرکز ثقل یک الگوریتم بازتعقیب آماری است که برمبنای تعریف یک مستطیل حول مرکز ثقل شکل موج عمل می کند. الگوریتم بازتعقیب سی- آیس برای مناطق یخی-آبی طراحی شده و شکل موج در این الگوریتم، براساس یک تابع سه ضابطه‌ای مدل می‌شود. در نهایت الگوریتم بازتعقیب آیس- شیت برای شکل موج‌های بازگشتی از صفحات یخی توسعه یافته و شکل موج براساس پنج تابع پیوسته تکه‌ای تشکیل می‌شود [۴ و ۱۱].

۲-۲-۲- بازتعقیب‌گرهای داده‌های *GDR-F* مأموریت جیسون-۳

داده‌های *GDR-F*[7] ماهواره جیسون-۳ شامل فاصله‌ی تصحیح شده حاصل از بازتعقیب‌گرهای اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، اقیانوسی-*MLE3*[8]و اداپتیو[9] است. الگوریتم بازتعقیب اقیانوسی، با استفاده از مدل شکل

[1] *SAR Radar Altimeter*
[2] *Sea-Ice*
[3] *Ice-Sheet*
[4] *Tracker*
[5] *Ocean*
[6] *SAMOSA*
[7] *Geophysical Data Records (version F)*
[8] *Ocean-MLE3*
[9] *Adaptive*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

موج براون توسعه داده شد. بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل با استفاده از الگوریتم بازتعقیب آیس به بازتعقیب شکل موج می‌پردازد. الگوریتم آیس اساساً برای مشاهدات ارتفاعی یخ‌های قطبی توسعه یافته است. این الگوریتم براساس ۳۰٪ دامنه شکل موج که با الگوریتم شیفت مرکز ثقل محاسبه شده، تعریف می‌شود. الگوریتم اقیانوسی-*MLE3* براساس برازش مدل تحلیلی مرتبه اول براون و الگوریتم بازتعقیب اداپتیو با برازش یک مدل عددی به شکل موج بازگشتی، بازتعقیب شکل موج را دنبال می کنند [۱۱، ۳۳، ۳۴ و ۳۵].

۳- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

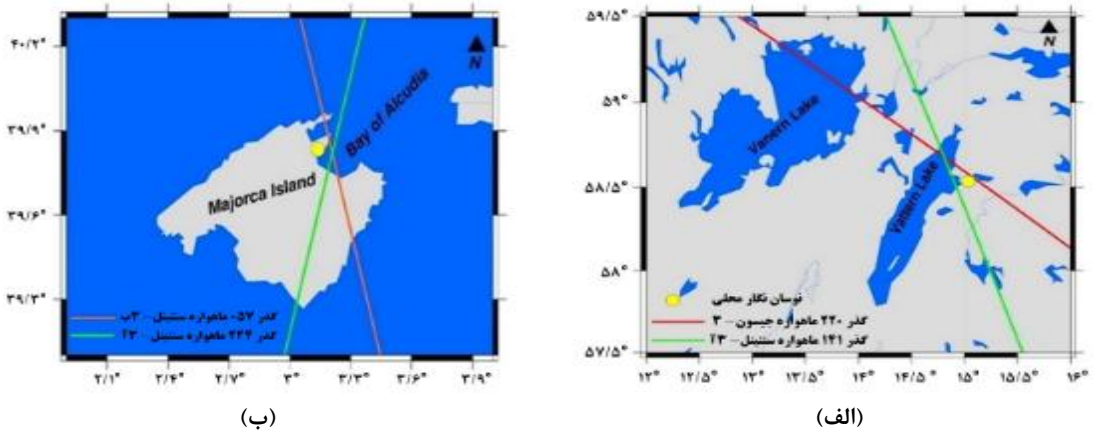
در این بخش، به بررسی منطقه مطالعاتی و داده‌های ماهواره‌ای و زمینی مورد استفاده برای پایش سطح ارتفاعی آب پرداخته شده است. منطقه مورد مطالعه این پژوهش، دریاچه وترن و خلیج آلکودیا می‌باشند که در ادامه به توضیح هر یک پرداخته شده است.

۳-۱- دریاچه وترن

دریاچه وترن، دومین دریاچه بزرگ سوئد، دارای مساحت تقریبی ۱۸۵۶ کیلومتر مربع است. حوضه دریاچه وترن شکلی مشابه قایق دارد و به راحتی تحت تأثیر تغییرات باد و فشار جوی قرار می‌گیرد، که باعث ایجاد امواج ایستاده با دامنه‌ای بین ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر می‌شود. توفان‌های شدید زیادی در دریاچه به‌دلیل شکل آن رخ می‌دهد که آن را به ویژه نسبت به باد حساس می‌کند. عمیق‌ترین نقطه شناخته شده آن ۱۲۸ متر و عمق متوسط آن حدود ۳۹/۹ متر است. عمق، حجم نسبتاً زیاد آب و شفافیت دریاچه وترن، آن را به یک مجموعه آبی منحصربه‌فرد تبدیل کرده است. این ویژگی‌ها همراه با موقعیت مرکزی در جنوب سوئد، آن را به یک منبع آبی با اهمیت بالا مبدل کرده است.[۳۶].

۳-۲- خلیج آلکودیا

مایورکا (ماجورکا) یک جزیره اسپانیایی در غرب مدیترانه است که متعلق به مجمع الجزایر بالئاری است که با مساحت ۳۶۰۳ کیلومتر مربع، به‌عنوان بزرگترین جزیره مجمع الجزایر بالئاری شناخته شده است. این جزیره در ۱۷۰ کیلومتری اسپانیا واقع شده است. طول خط ساحلی مایورکا حدود ۵۵۰ کیلومتر بوده و ۱۸۰ خلیج به طور نسبتاً مساوی در امتداد ساحل جزیره پراکنده شده‌اند [۳۷]. به‌طور کلی خلیج آلکودیا نقش مهمی در تأمین معیشت مردم محلی و توسعه اقتصادی منطقه ایفا می‌کند. محصور بودن گذرهای ماهواره سنتینل-۳ آ و ب در این خلیج، آن را به منطقه‌ای پرچالش در پایش ارتفاع سطح آب با استفاده از مأموریت‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای تبدیل کرده است. لذا در این پژوهش خلیج آلکودیا واقع در بخش شمال‌شرقی جزیره مایورکا جهت بررسی بیشتر این چالش مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل (۱) موقعیت ایستگاه نوسان نگار محلی در دریاچه وترن و خلیج آلکودیا و همچنین گذرهای عبوری ماهواره‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل۱: موقعیت ایستگاه نوسان نگار محلی و گذرهای عبوری ماهواره‌ها. (الف) دریاچه وترن، (ب) ساحل آلکودیا

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

۳-۲- داده‌ها

در این پژوهش، از داده‌های ارتفاع سنجی مأموریت‌های سنتینل-۳ و جیسون-۳ و همچنین داده‌های نوسان نگار محلی استفاده شده است. در ادامه به توضیح هر یک از این داده‌ها پرداخته شده است.

۳-۲-۱- داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مأموریت سنتینل-۳

سنتینل-۳ یک مأموریت مشترک بین آژانس فضایی اروپا (*ESA*[1]) و اومیست (*EUMETSAT*[2]) است که برای نظارت بر زمین و اقیانوس طراحی شده است. اولین ماهواره این مأموریت یعنی سنتینل-۳آ در تاریخ ۱۶ فوریه ۲۰۱۶ و دومین ماهواره آن، سنتینل-۳ب، در تاریخ ۲۵ آوریل ۲۰۱۸ پرتاب شد [۳۸]. این دو ماهواره در یک مدار خورشید آهنگ- شبه قطبی، در ارتفاع متوسط ۸۱۵ کیلومتری و شیب ۹۸/۶ درجه به دور زمین می‌چرخند. مدار سنتینل-۳ب مشابه مدار سنتینل-۳آ است، با این تفاوت که با اختلاف فاز ۱۴۰ درجه نسبت به سنتینل-۳آ در حال گردش است. سنتینل-۳آ و ب، دارای یک دوره تکرار ۲۷ روزه با فاصله گذر ۱۰۴ کیلومتر در استوا می‌باشند. این دو ماهواره اطلاعات مهمی مانند ارتفاع جهانی سطح دریا، ارتفاع موج موثر و سرعت باد را اندازه‌گیری می‌کنند. سنجنده سرال یک ارتفاع‌سنج راداری با دو باند فرکانسی (باند *Ku* و *C*) و نادیرنگر[3] است. مأموریت سنتینل-۳ همچنین مجهز به رادیومتر میکروویو[4](برای تصحیح تروپوسفر تر) و سیستم تعیین مدار دقیق (*POD*[5]) است. سنجنده سرال دارای دو حالت عملیاتی، شامل حالت با قدرت تفکیک مکانی پایین (*LRM*[6]) و رادار با دریچه مصنوعی است. با این حال، تنها یک حالت عملیاتی را می‌توان در لحظه استفاده کرد [۳۹]. سنجنده سرال، اولین ارتفاع‌سنج راداری است که تقریباً کل کره زمین را در حالت رادار با دریچه مصنوعی پوشش می‌دهد. این ارتفاع‌سنج دارای مزایایی از جمله برداشت چند منظری، فرکانس تکرار پالس بالا و کوچک بودن اندازه ردپا (۳۰۰ متر) در امتداد برداشت، می‌باشد[۴۰]. داده‌های مربوط به این مأموریت از آدرس *https://dataspace.copernicus.eu/explore-data* قابل دسترسی است. در این پژوهش داده‌های سطح دو (*SR_2_LAN*) ماهواره‌های سنتینل-۳آ و سنتینل-۳ب به ترتیب با شماره گذرهای ۲۴۴ و ۰۵۷ در فواصل یک کیلومتری و یک تا پنج کیلومتری ساحل مایورکا استفاده شده است. همچنین برای دریاچه وترن نیز داده های گذر شماره ۱۴۱ مأموریت سنتینل-۳آ پردازش شده است.

۳-۲-۲- داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مأموریت جیسون-۳

مأموریت جیسون-۳ یک مأموریت مشترک بین سازمان هوا و فضای ملی آمریکا (*NASA*[7])، آژانس فضایی فرانسه (*CNES*[8])، اومیتست و سازمان ملی هواشناسی و اقیانوس‌شناسی آمریکا (*NOAA*[9]) است. ماهواره جیسون-۳، که در تاریخ ۱۷ ژانویه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شد، جانشین مأموریت‌های جیسون-۲، جیسون-۱ و توپکس-پوزیدون می‌باشد [۳۸]. این ماهواره‌های ارتفاع سنجی توپوگرافی سطح اقیانوس، ارتفاع موج موثر و سرعت باد را از سال ۱۹۹۲ تاکنون اندازه‌گیری کرده‌اند. هدف اصلی این ماهواره‌ها، ارائه یک نمای جهانی منحصر به فرد از اقیانوس‌ها و ارائه داده‌ها برای

[1] *European space agency*
[2] *European Org. for the Exploitation of Meteorological Satellites*
[3] *Nadir*
[4] *Microwave radiometer*
[5] *Precise Orbit Determination*
[6] *Low Resolution Mode*
[7] *National Aeronautics and Space Administration (US space agency)*
[8] *Centre National d'Etudes Spatiales*
[9] *National Oceanic and Atmospheric Administration*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

کاربردهای علمی و عملی مرتبط با افزایش سطح دریا، گردش اقیانوس‌ها و مطالعات تغییرات آب و هوایی است. ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای جیسون-۳ دارای دو باند *Ku* و *C* می‌باشد [۳۹]. ماهواره جیسون-۳ با استفاده از حالت *LRM* قادر به پوشش نواحی آبی جهان با قدرت تفکیک مکانی نسبتاً پایینی است. شکل ردپای این ارتفاع‌سنج به شکل دایره و قطر آن بیشتر از دو کیلومتر است. دوره اندازه‌گیری‌های این ماهواره هر ده روز یک بار می‌باشد[۳۳].

داده‌های مربوط به این مأموریت از آدرس *https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/jason3* قابل دسترسی است. در این پژوهش از داده‌های *GDR-F* ماهواره جیسون-۳ گذر شماره ۲۲۰ عبوری از دریاچه وترن استفاده شده است.

۳-۲-۳- داده‌های نوسان نگار محلی

برای ارزیابی صحت سری زمانی ارتفاع سطح آب حاصل از مأموریت‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای، از داده‌های نوسان نگار محلی استفاده شد. لازم به ذکر است به‌دلیل آنکه فاصله نمونه‌برداری داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌های و نوسان نگار محلی متفاوت است، برای مقایسه این دو دسته داده، داده‌های نوسان نگار محلی در زمان برداشت ارتفاع سنجی درون‌یابی شده‌اند. اطلاعات مربوط به این نوسان نگارها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های نوسان نگار محلی و ماهواره‌های ارتفاع سنجی در مناطق مطالعاتی

ایستگاه نوسان نگار محلی	دیتوم ارتفاعی محلی	نرخ برداشت	طول و عرض جغرافیایی	دوره‌های نظیر مأموریت‌های مذکور	تاریخ داده	ماهواره مورد بررسی / شماره گذر	میانگین فاصله تا گذر ماهواره (km)
موتالا	*RH00*	ساعتی	۱۵٫۰۴۱۹° و ۵۸٫۵۳۴۵°	۰۰۹-۰۸۴	۲۰۱۶/۰۹-۲۰۲۲/۰۴	سنتینل-۳آ/ ۱۴۱	۱۶
				۰۲۱-۲۲۶	۲۰۱۶/۰۹-۲۰۲۲/۰۴	جیسون-۳/ ۲۲۰	۱۹
آلکودیا	*Harbour*	روزانه	۳٫۱۳۹۱° و ۳۹٫۸۳۴۷°	۰۰۶-۱۰۲	۲۰۱۶/۰۷-۲۰۲۳/۰۸	سنتینل-۳آ/ ۲۴۴	۸
				۰۲۰-۰۸۳	۲۰۱۸/۱۲-۲۰۲۳/۰۸	سنتینل-۳ب/ ۰۵۷	۹

۴- روش تحقیق

به‌منظور تشکیل سری زمانی ارتفاع آب حاصل از پردازش داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای برای یک گذر، سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای حاصل از هر دوره تشکیل می‌شود. سپس رویکردهای استفاده از تمامی این داده‌های ارتفاعی در هر دوره (کل)، انتخاب میانگین یا میانه آن‌ها دنبال می‌شود. با کنار هم قرارگیری این نماینده‌ها برای هر دوره سری زمانی ارتفاع آب گذر تعیین می‌شود. علاوه بر این رویکردها، رویکرد مرجع مبنا که در آن نماینده ارتفاع آب لحظه‌ای، با ویژگی ارتفاع آب نزدیک‌تر به سری زمانی مرجع انتخاب شده، به‌عنوان رویکرد پیشنهادی در این پژوهش ارزیابی می‌گردد. از آنجا که نواحی دور از ساحل دارای چالش اغتشاش شکل موج کمتری نسبت به نزدیک ساحل می‌باشند و به تبع سری زمانی ارتفاع آب با صحت بالاتری گزارش می‌دهند؛ سری زمانی ارتفاع مرجع برای نواحی ساحلی در فاصله دور از ساحل (۱-۵ کیلومتری) به‌منظور بهبود صحت سری زمانی ارتفاع آب در نواحی نزدیک ساحل (۱-۰ کیلومتری) تعیین می‌گردد. همچنین در بررسی دریاچه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

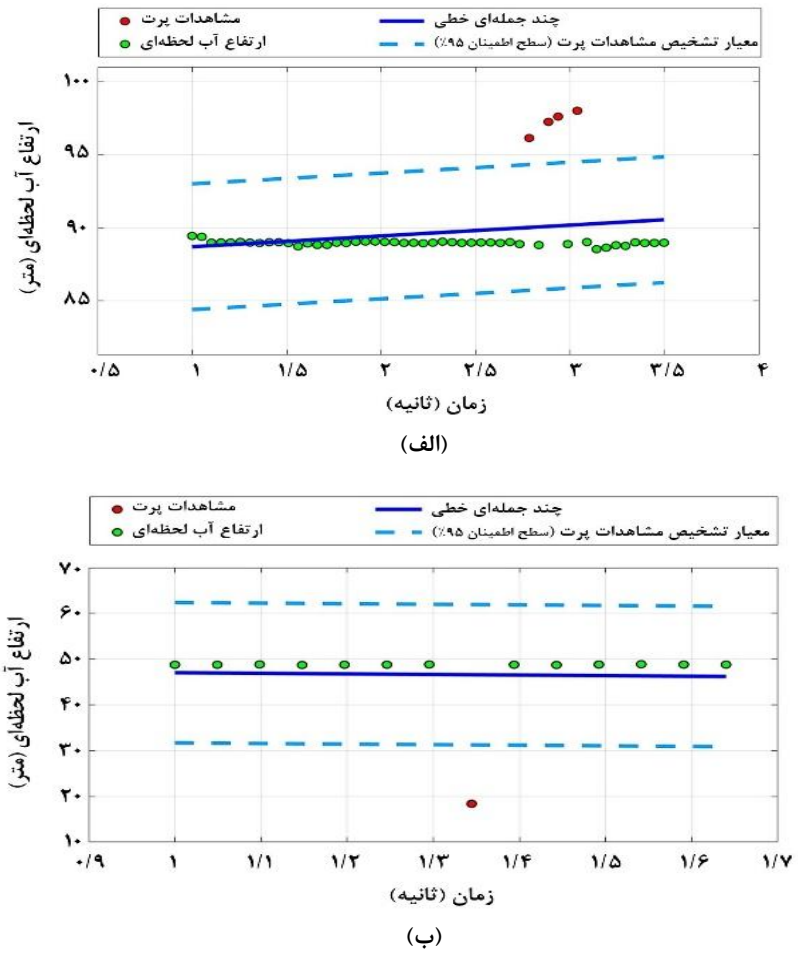
از سری زمانی ارتفاع آب مأموریت نسل جدید سنتینل-۳آ به‌عنوان مرجع به‌منظور بهبود صحت سری زمانی ارتفاع آب مأموریت نسل قدیم جیسون-۳ استفاده می‌شود. در ادامه به مراحل پیاده‌سازی این رویکردها پرداخته شده است:

الف) تشکیل سری های زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای

سری‌های زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده های سطح دو مأموریت‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش، برای هر گذر در هر دوره، با استفاده از رابطه(۲) تشکیل شدند.

ب)حذف مشاهدات پرت در سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای

از آنجا که سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای در هر دوره، عموماً دارای رفتار خطی می‌باشد؛ با برازش یک مدل خطی به سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای، داده‌های پرت با سطح اطمینان ۹۵٪ حذف شدند. شکل(۲) نشان‌دهنده مشاهدات پرت، سالم و مدل خطی برازش داده شده در سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای ماهواره جیسون-۳ در دریاچه وترن و سنتینل-۳ب در شمال خلیج آلکودیا می‌باشد.



شکل۲: مدل خطی برازش داده شده به سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای و کشف مشاهدات پرت با سطح اطمینان ۹۵٪
(الف) ماهواره جیسون-۳ گذر ۲۲۰ دوره ۹۵ ،(ب) ماهواره سنتینل-۳ب گذر۵۷ دوره ۴۶

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

پ) تشکیل سری‌های زمانی ارتفاع آب مرجع

برای تمامی دوره‌ها انتخاب بهینه از میان رویکردهای میانه، میانگین و کل داده‌ها در سری زمانی ارتفاع آب کنار هم قرار گرفته و سری زمانی نهایی ارتفاع آب مرجع تشکیل گردید. در بررسی نواحی ساحلی، این سری زمانی در فاصله ۵-۱ کیلومتری ساحل (به‌عنوان مرجع)، به منظور بهبود ۱-۰ کیلومتری ساحل در نظر گرفته شده است. در بررسی دریاچه نیز سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مأموریت نسل جدید ارتفاع سنجی ماهواره‌ای (سنتینل-۳)، به‌عنوان مرجع، به‌منظور بهبود سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مأموریت نسل قدیم ارتفاع سنجی (جیسون-۳) لحاظ شده است.

ت)تشکیل سری زمانی ارتفاع آب گذر در ناحیه مطالعاتی

ارتفاع آب مرجع در زمان‌های سری‌های زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای گذر مطالعاتی درونیابی شده و نزدیک‌ترین ارتفاع آب لحظه‌ای به ارتفاع مرجع به‌عنوان نماینده انتخاب گردید. بیان ریاضی این انتخاب را می‌توان به صورت رابطه(۵) بیان نمود:

$$SSH_i = \min\left\{ssh_j - H_i\right\} \qquad \text{رابطه(۵)}$$
$$i = 1,2,\ldots,n \qquad j = 1,2,\ldots,m$$

در رابطه (۵)، SSH_i ارتفاع آب انتخاب شده به‌عنوان نماینده سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره iام حاصل از رویکرد مرجع مبنا، ssh_j ارتفاع آب لحظه‌ای شماره jام، H_i ارتفاع آب حاصل از سری زمانی مرجع برای دوره iام، m تعداد مشاهدات ارتفاع آب برای هر دوره و n تعداد دوره‌های بازه مطالعاتی می‌باشد.

در کنار رویکرد مرجع مبنا، رویکردهای کل، میانه و میانگین نیز مورد بررسی قرار گرفت. با کنار هم قرارگیری نماینده سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای بر اساس هر کدام از رویکردها، سری زمانی ارتفاع آب ناحیه و گذر مطالعاتی تشکیل شد.

ج) جبران بایاس ناشی از اختلاف سطح مبنای ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و نوسان نگار محلی

به دلیل وجود اختلاف میان سطح مبنای ماهواره‌های ارتفاع سنجی سنتینل-۳ و جیسون-۳ (بیضوی *WGS84*)، و نوسان نگار محلی (سطح مبنا ارتفاعی محلی)، امکان مقایسه مستقیم سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از این ماهواره‌ها با نوسان نگار محلی وجود ندارد. جهت جبران بایاس ناشی از این اختلاف و فراهم‌سازی امکان مقایسه، از روش میانگین‌گیری دو سری زمانی استفاده شده است.

د) ارزیابی سری‌های زمانی ارتفاع آب هر گذر با داده‌های نوسان نگار محلی

در این مرحله صحت سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای مرجع مبنا، میانه، میانگین و کل برای مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳ و جیسون-۳ با استفاده از پارامتر *RMSE* در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی مورد ارزیابی قرار گرفت که با رابطه (۶) قابل محاسبه است. از ضریب همبستگی نیز به‌عنوان شاخص آماری برای تعیین میزان و نوع رابطه بین دو سری زمانی استفاده شد (رابطه (۷)). ضریب همبستگی دارای مقداری بین صفر و یک است که هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بیشتری بین دو سری زمانی است. علامت این ضریب نیز نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را مشخص می‌کند.

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \qquad \text{رابطه (۶)}$$

$$\mathrm{Corr}_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad \text{رابطه (۷)}$$

در روابط (۶) و (۷)، x_i نتایج اندازه‌گیری شده و $\bar{x}$ میانگین آن‌ها، y_i داده‌های مرجع (نوسان نگار محلی) و $\bar{y}$ میانگین آن‌ها و n تعداد داده‌ها است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

همچنین به‌منظور بررسی میزان بهبود *RMSE* رویکرد پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کل، میانگین و میانه در سری زمانی ارتفاع آب، از پارامتر درصد بهبود (*IMP*[1]) که در رابطه (۸) ارائه شده، استفاده شد.

$$IMP = \frac{R_{base} - R_{comp}}{R_{base}} \times 100 \qquad \text{رابطه(۸)}$$

در رابطه(۸)، R_{base}، *RMSE* سری زمانی ارتفاع آب اولیه حاصل از رویکرد بهینه (کل/ میانگین/ میانه)، و R_{comp}، *RMSE* سری زمانی ارتفاع سطح آب رویکرد مرجع مبنا است. لازم به ذکر است درصد بهبود برای پارامتر ضریب همبستگی از اختلاف میان درصد ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه رویکرد مرجع مبنا و ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه رویکرد بهینه پیشین (کل/ میانگین / میانه) محاسبه شده است.

۵- نتایج و بحث

سری زمانی ارتفاع آب مرجع با استفاده از رویکرد بهینه میان رویکردهای کل، میانه و میانگین تشکیل شد. پس از آن سری زمانی ارتفاع آب تشکیل شده برای ناحیه و گذر مورد مطالعه جهت بهبود، با رویکردهای مرجع مبنا، میانه، میانگین و کل حاصل شد و با استفاده از پارامتر *RMSE* و ضریب همبستگی با داده‌های نوسان نگار محلی مقایسه و درصد بهبود محاسبه گردید. نتایج برای سری‌های زمانی ارتفاع آب مرجع و بهبود یافته به تفکیک منطقه مطالعاتی ارائه شده است. در این جداول، کمینه *RMSE* محاسبه شده برای هر یک از رویکردها با خطی زیر مقدار آن، کمینه *RMSE* هر یک از بازتعقیب‌گرها در رویکردهای کل، میانه و میانگین با رنگ قرمز و درنهایت کمینه *RMSE* رویکردهای مورد بررسی به‌عنوان نتیجه بهینه با رنگ سبز معرفی شده است. همچنین بیشینه ضریب همبستگی در رویکردهای کل، میانگین و میانه با رنگ قرمز و بیشینه ضریب همبستگی در کل رویکردهای مورد بررسی با رنگ سبز مشخص شده است.

۵-۱- نتایج دریاچه وترن

در دریاچه وترن سری زمانی ارتفاع آب گذر ۱۴۱ سنتینل-۳آ به‌عنوان مرجع برای بهبود سری زمانی ارتفاع آب گذر ۲۲۰ جیسون-۳ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (۲)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی (درصد) مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو به ازای رویکردهای کل، میانگین و میانه، در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی می‌باشد.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد، غالباً رویکرد میانه در مقایسه با دو رویکرد دیگر کمترین مقادیر *RMSE* را در ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از بازتعقیب‌گرهای مختلف به خود اختصاص داده و در تعقیب‌گر نتیجه‌ای تقریباً معادل با میانگین حاصل شده است. لذا به ترتیب عملکرد میتوان میانه، میانگین و کل را معرفی کرد. به ازای دو رویکرد کل و میانگین، بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل و به ازای میانه بازتعقیب‌گر آیس- شیت عملکرد مناسبی داشته است. همچنین بیشترین مقدار ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه در رویکرد میانه (آیس-شیت) با مقدار ۶۲٪ حاصل شده و درصد ضریب همبستگی رویکرد میانگین نیز بیشتر از رویکرد کل بوده است. نتیجه بهینه به ازای میانه و بازتعقیب‌گر آیس- شیت با مقدار *RMSE* ۰٫۱۱ متر حاصل شده است. لذا از سری زمانی حاصل از رویکرد میانه و بازتعقیب‌گر آیس- شیت، به‌عنوان سری زمانی مرجع برای بهبود سری زمانی ارتفاع آب گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ استفاده شد.

جدول (۳)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ حاصل از رویکردهای پیشین به همراه رویکرد پیشنهادی مرجع مبنا در این پژوهش را نشان می‌دهد.

[1] *Improvement Percentage*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

جدول۲: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو گذر ۱۴۱ ماهواره سنتینل-۳آ در دریاچه وترن

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۲٫۰۵	۲٫۹۲	۱٫۸۶	۲٫۴۸	۳٫۲۶	٪۲
	میانگین	۰٫۹۳	۱٫۲۳	۰٫۷۶	۱٫۵۹	۳٫۲۰	٪۵
	میانه	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۰٫۱۴	۱٫۰۸	۳٫۲۱	٪۶۲

جدول۳: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ در دریاچه وترن

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	اداپتیو	اقیانوسی	اقیانوسی-MLE3	شیفت مرکز ثقل	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۸۶٫۷۴	۳٫۳۲	۱٫۸۱	۱٫۹۳	٪۶
	میانگین	۲۸٫۹۰	۲٫۵۴	۰٫۹۱	۱٫۱۴	٪۱۴
	میانه	۲٫۹۷	۲٫۶۱	۰٫۵۱	۰٫۶۰	٪۲۶
	مرجع مبنا	۰٫۹۳	۰٫۹۹	۰٫۲۹	۰٫۱۷	٪۵۹
	درصد بهبود	٪۶۹	٪۶۱	٪۴۳	٪۷۲	٪۳۳

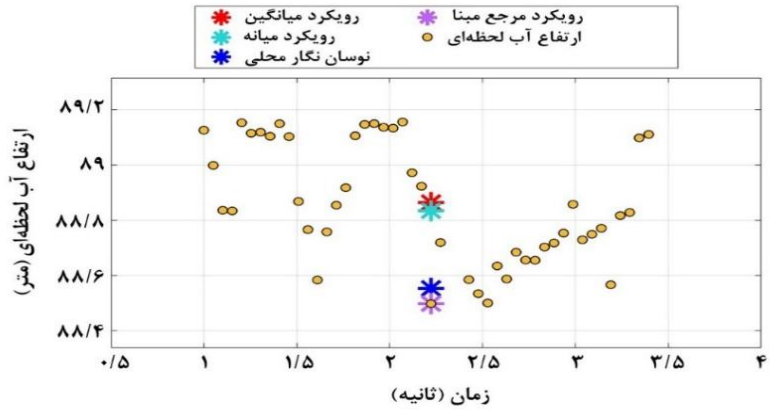
نتایج جدول(۳) حاکی از آن است که رویکرد مرجع مبنا نسبت به سایر رویکردها نتیجه بهینه حاصل نموده است. بهینه‌ترین نتیجه به ازای بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل و روش مرجع مبنا با مقدار *RMSE* ۰٫۱۷ متر و بهبود ۷۲ درصدی صحت نسبت به رویکرد میانه حاصل شده است. این رویکرد در مقایسه با بهترین نتایج حاصل از بازتعقیب‌گرهای اداپتیو، اقیانوسی، اقیانوسی-*MLE3* و شیفت مرکز ثقل برای رویکردهای میانه، میانگین و کل (مقادیر با رنگ قرمز در هر ستون)، به ترتیب بهبودهای ٪۶۹، ٪۶۱، ٪۴۳ و ٪۷۲ را حاصل کرده است. به ازای تمامی بازتعقیب‌گرها به‌جز بازتعقیب‌گر اقیانوسی، میانه عملکرد مناسب‌تری نسبت به میانگین داشته و استفاده از تمامی داده‌ها (کل) پس از آن‌ها قرار گرفته است. بازتعقیب‌گر اقیانوسی-*MLE3* در سه رویکرد کل، میانه و میانگین نتیجه بهتری نسبت به سایر بازتعقیب‌گرها ارائه نموده است. ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه برای رویکردهای مرجع مبنا، میانه، میانگین و کل به ترتیب مقادیر ۵۹٪، ۲۶٪، ۱۴٪ و ۶٪ بوده که بیشترین همبستگی را رویکرد مرجع مبنا و پس از آن رویکرد میانه حاصل کرده است. رویکرد مرجع مبنا سبب افزایش ۳۳ درصدی ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه نسبت به رویکرد میانه شده است.

شکل (۳) سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۸۷ ماهواره جیسون-۳ حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل، ارتفاع آب حاصل از نوسان نگار محلی در زمان متناظر به همراه رویکردهای انتخابی میانه، میانگین و رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد. نزدیکی نتیجه رویکرد مرجع مبنا به داده نوسان نگار محلی نسبت به سایر رویکردها پر واضح است.

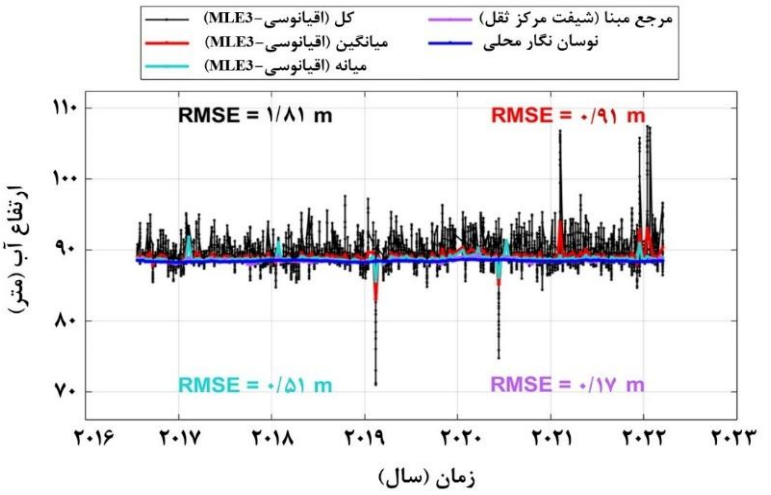
همچنین شکل (۴) سری زمانی نهایی ارتفاع آب گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه برای رویکردهای کل، میانگین، میانه و مرجع مبنا را معرفی می‌کند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

شکل (۵) مقدار *RMSE* و ضریب همبستگی حاصل از ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب میان بازتعقیب‌گر بهینه در هر رویکرد و مشاهدات نوسان نگار محلی در داده‌های سطح دو گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود به‌ترتیب رویکردهای مرجع مبنا، میانه، میانگین و کل دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین مقدار *RMSE* می‌باشند.



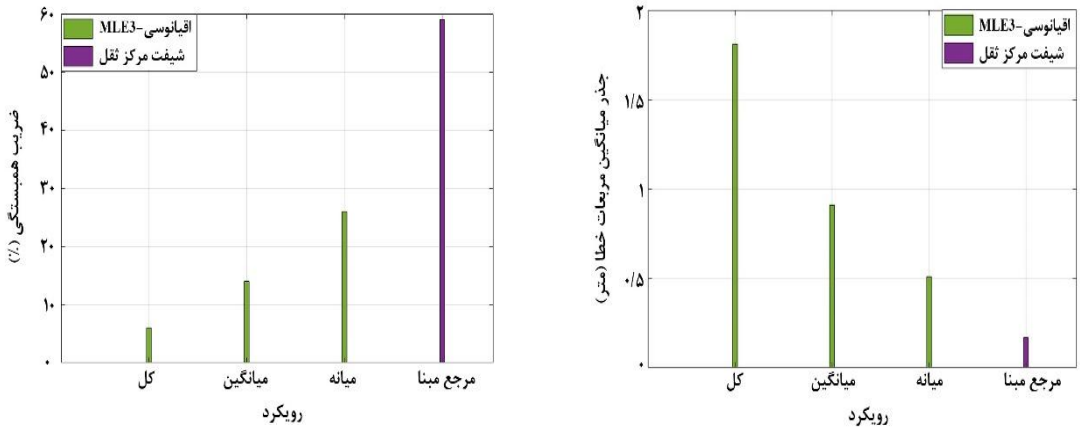
شکل۳: سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۸۷ گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل



شکل۴: سری زمانی نهایی ارتفاع آب گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳ حاصل از بازتعقیب‌گرهای بهینه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]



شکل۵: پارامترهای آماری ارزیابی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و مشاهدات نوسان‌نگارمحلی در گذر ۲۲۰ ماهواره جیسون-۳، (الف) *RMSE*، (ب) ضریب همبستگی

۵-۲- نتایج خلیج آلکودیا

دو بخش شمالی و جنوب غربی خلیج آلکودیا با استفاده از گذر ۵۷ مأموریت سنتینل-۳ب مورد مطالعه قرار گرفت. از سری زمانی ارتفاع آب در فاصله ۵-۱ کیلومتری ساحل به‌عنوان مرجع برای بهبود سری زمانی ارتفاع آب در فاصله ۱-۰ کیلومتری ساحل استفاده شد.

در جدول(۴)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب در فاصله ۵-۱ کیلومتری بخش شمالی خلیج آلکودیا، حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ب، به ازای رویکردهای کل، میانگین و میانه در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی آورده شده است.

جدول۴: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش شمالی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳ب (۵-۱ کیلومتری ساحل)

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
***RMSE* (*m*)**	کل	۲٫۸۶	۳٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۱۳	۱٫۵۲	٪۶۷
	میانگین	۲٫۱۴	۲٫۲۷	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۱٫۴۳	٪۶۹
	میانه	۳٫۱۰	۲٫۸۵	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۱٫۴۵	٪۶۹

با توجه به نتایج *RMSE* جدول (۴)، میانگین و میانه در برآورد سری زمانی ارتفاع آب برای بازتعقیب‌گر سی-آیس نتایج معادل حاصل کرده‌اند. به ازای بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل میانه و برای سه بازتعقیب‌گر دیگر میانگین نتیجه بهینه داشته است. به ازای تمامی رویکردها، بازتعقیب‌گر سی- آیس عملکرد مناسبی داشته است. کمترین مقدار *RMSE* از رویکرد میانه و میانگین حاصل از بازتعقیب‌گر سی- آیس و میانه از شیفت مرکز ثقل حاصل شده است. ضریب همبستگی برای رویکردهای میانه و میانگین معادل و مقدار ٪۶۹ بوده و برای رویکرد کل ٪۶۷ است. در مقایسه رویکردها، رویکرد کل نتایج ضعیفی نسبت به دو رویکرد دیگر نشان داده است. از سری زمانی حاصل از رویکرد میانه برای بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل در فاصله ۵-۱ کیلومتری بخش شمالی خلیج آلکودیا، به‌عنوان سری زمانی مرجع برای بهبود سری زمانی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

۰-۱ کیلومتری ساحل این بخش استفاده شده است. جدول(۵)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش شمالی خلیج آلکودیا در فاصله یک کیلومتری ساحل، حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو در گذر سنتینل-۳ب به‌همراه رویکردهای کل، میانگین، میانه و رویکرد پیشنهادی مرجع مبنا در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول۵: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش شمالی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳ب (۱-۰ کیلومتری ساحل)

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۶٫۷۱	۷٫۵۷	۵٫۲۶	۲٫۵۳	۱٫۳۳	٪۱۵
	میانگین	۵٫۵۱	۴٫۶۵	۳٫۵۵	۲٫۴۶	۱٫۱۵	٪۱۶
	میانه	۵٫۶۰	۶٫۰۹	۴٫۲۳	۲٫۳۴	۱٫۱۷	٪۱۷
	مرجع مبنا	۵٫۱۲	۲٫۹۶	۰٫۴۶	۲٫۰۵	۱٫۰۳	٪۲۳
	درصد بهبود	٪۷	٪۳۶	٪۸۷	٪۱۲	٪۱۰	٪۶

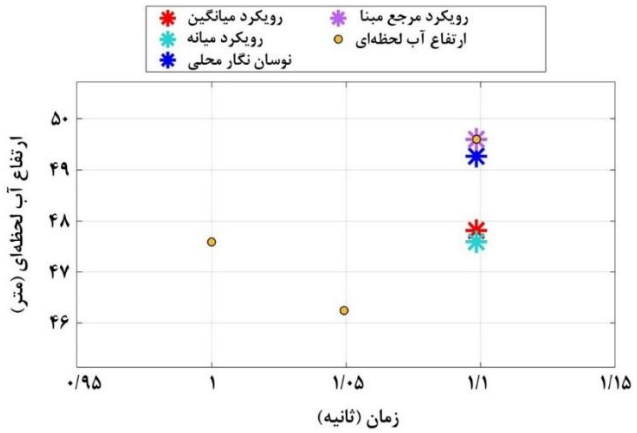
با توجه به نتایج جدول (۵)، رویکرد مرجع مبنا نسبت به هر سه رویکرد دیگر، نتایج بهتری حاصل کرده است. بهینه‌ترین نتیجه به ازای بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل و رویکرد مرجع مبنا با مقدار *RMSE* ۰/۴۶ متر حاصل شده است. درصد بهبود نتایج این رویکرد نسبت به بهترین نتایج سایر رویکردها برای بازتعقیب‌گرهای آیس-شیت، اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، سی-آیس و تعقیب‌گر ماهواره به ترتیب ٪۷، ٪۳۶، ٪۸۷، ٪۱۲ و ٪۱۰ بوده است. مقایسه رویکرد میانه و میانگین نشان می‌دهد که بازتعقیب‌گر سی-آیس در رویکرد میانه و سایر بازتعقیب‌گرها در رویکرد میانگین عملکرد بهتری داشته‌اند. عملکرد ضعیف رویکرد کل نیز نسبت به رویکردهای دیگر مشاهده می‌شود. به ازای سه رویکرد کل، میانگین و میانه تعقیب‌گر ماهواره نسبت به بازتعقیب‌گرها عملکرد بهتری داشته است. این امر که همسو با نتایج مطالعه پیشین [۴] است؛ نشان می‌دهد لزوماً هر بازتعقیب‌گری سبب بهبود صحت سری زمانی ارتفاع سطح آب نسبت به بازتعقیب‌گرهای ارتفاع‌سنج نمی‌شود. مقایسه مقادیر ضریب همبستگی نشان می‌دهد که رویکرد مرجع مبنا (٪۲۳)، بیشترین ضریب همبستگی را در میان چهار رویکرد مورد بررسی داشته و ضریب همبستگی در رویکردهای میانه، میانگین و کل تقریباً معادل بوده است. نتایج ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه نشان دهنده افزایش ۶ درصدی رویکرد مرجع مبنا نسبت به رویکرد میانه است.

در شکل (۶) سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۳۲ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل را نشان می‌دهد. در شکل (۷) نیز مطابق نتایج ذکر شده، نزدیکی نتیجه حاصل از رویکرد پیشنهادی به نوسان نگار محلی در مقایسه با رویکردهای دیگر به وضوح دیده می‌شود.

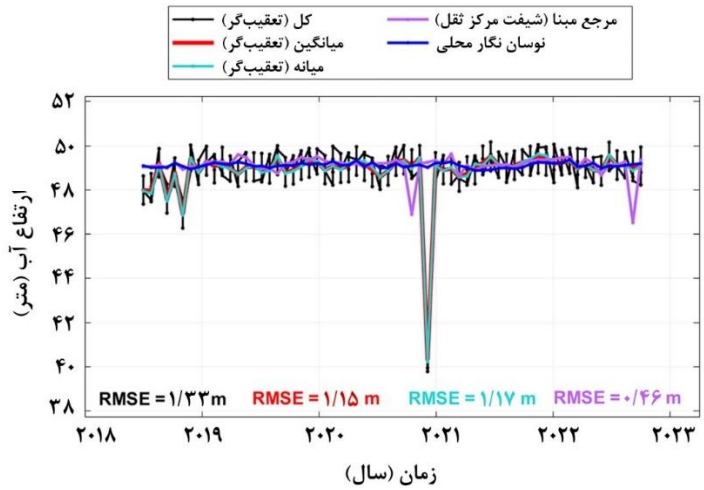
شکل (۸) مقدار *RMSE* و ضریب همبستگی حاصل از ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب میان بازتعقیب‌گر بهینه در هر رویکرد و مشاهدات نوسان نگار محلی در داده‌های سطح دو گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۸) پیداست، رویکرد پیشنهادی نسبت به سایر رویکردها دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین مقدار *RMSE* می‌باشد و ضریب همبستگی رویکردهای میانه و میانگین و کل تقریباً معادل بود است.

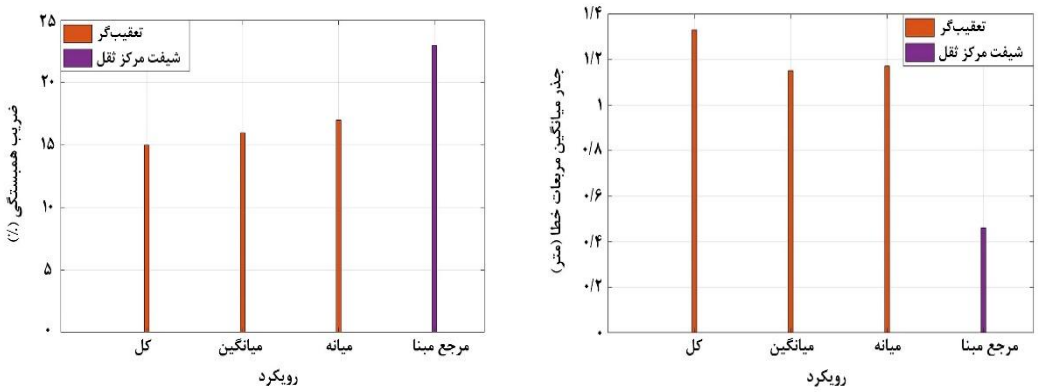
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]



شکل۶: سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۳۲ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل



شکل۷: سری زمانی نهایی ارتفاع سطح آب گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتعقیب‌گرهای بهینه



شکل۸: پارامترهای آماری ارزیابی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و مشاهدات نوسان‌نگارمحلی در گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب، (الف) *RMSE*، (ب) ضریب همبستگی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

حال به بررسی نتایج بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا پرداخته می‌شود.

در جدول(۶)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب در فاصله ۵-۱ کیلومتری بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا، حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ب، به ازای رویکردهای پیشین، در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جدول (۶)، میانه در مقایسه با دو روش دیگر کمترین مقادیر *RMSE* را در ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای مختلف به خود اختصاص داده است. همچنین بازتعقیب‌گر آیس- شیت در هر سه رویکرد عملکرد مناسبی نسبت به سایر بازتعقیب‌گرها داشته است. نتیجه‌ی بهینه به ازای رویکرد میانه و بازتعقیب‌گر آیس- شیت با مقدار *RMSE* ۰٫۰۹ متر حاصل شده است. لذا از سری زمانی حاصل از آن، در فاصله ۵-۱ کیلومتری بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا، به‌عنوان سری زمانی مرجع برای بهبود سری زمانی ۱-۰ کیلومتری ساحل همین بخش استفاده شده است. در میان سه رویکرد مورد بررسی، رویکرد میانه با ضریب همبستگی ۷۹ درصد بیشترین همبستگی را میان مشاهدات نوسان نگار محلی و داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه در رویکرد میانه (آیس-شیت) داشته و پس از آن به ترتیب رویکرد میانگین و کل بیشترین مقدار را برای این پارامتر به خود اختصاص داده‌اند.

جدول۶: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳ب (۵-۱ کیلومتری ساحل)

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۰٫۴۷	۲٫۱۳	۰٫۶۷	۰٫۷۸	۱٫۳۳	٪۲۶
	میانگین	۰٫۳۴	۱٫۱۵	۰٫۴۳	۰٫۳۷	۰٫۶۴	٪۳۹
	میانه	۰٫۰۹	۰٫۸۸	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۴۱	٪۷۹

جدول (۷)، مقادیر *RMSE* مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا را در فاصله یک کیلومتری ساحل حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو در گذر سنتینل-۳ب را با رویکردهای کل، میانگین، میانه و مرجع مبنا نشان می‌دهد. ضریب همبستگی نیز برای رویکردهای مختلف ارائه شده است.

جدول۷: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳ب (۱-۰ کیلومتری ساحل)

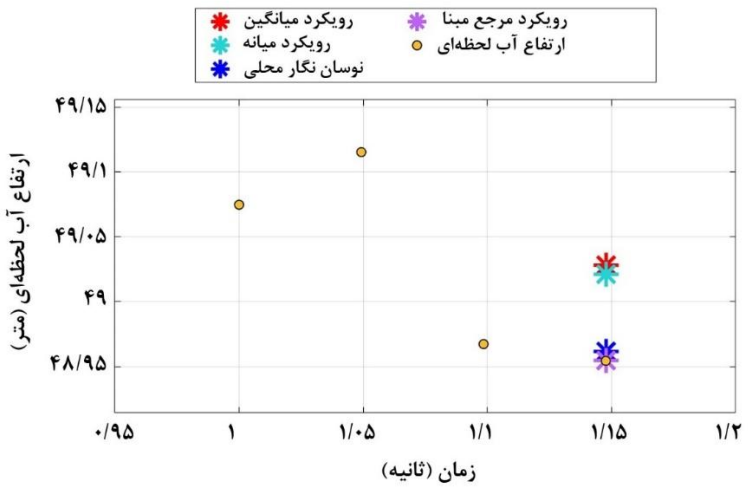
	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۰٫۳۵	۰٫۷۷	۱٫۱	۲٫۴۲	۰٫۶۸	٪۱۷
	میانگین	۰٫۳۲	۰٫۶۳	۰٫۸۲	۲٫۳۶	۰٫۴۵	٪۲۳
	میانه	۰٫۳۲	۰٫۵۸	۰٫۵۷	۲٫۶۱	۰٫۴۶	٪۲۱
	مرجع مبنا	۰٫۲۹	۰٫۱۴	۰٫۱۶	۱٫۹۱	۰٫۲۸	٪۶۳
	درصد بهبود	٪۹	٪۷۶	٪۷۲	٪۱۹	٪۳۸	٪۴۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

بررسی جدول(۷) نشان می‌دهد که در رویکرد مرجع مبنا بازتعقیب‌گر اقیانوسی بهینه‌ترین مقدار *RMSE* را با مقدار ۰/۱۴ حاصل کرده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که رویکرد مرجع مبنا در مقایسه با سایر رویکردها، صحت بیشتری در برآورد ارتفاع آب داشته است. درصد بهبود نتایج این رویکرد در مقایسه با بهترین نتایج سایر رویکردها، برای بازتعقیب‌گرهای آیس-شیت، اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، سی- آیس و تعقیب‌گر ماهواره به ترتیب ۹٪، ۷۶٪، ۷۲٪، ۱۹٪ و ۳۸٪ است. غالباً رویکرد میانه بهتر از رویکرد میانگین در برآورد سری زمانی ارتفاع آب عمل کرده است. بازتعقیب‌گر آیس- شیت در مقایسه با سایر بازتعقیب‌گرها، در سه رویکرد کل، میانگین و میانه، عملکرد بهتری داشته است. بازتعقیب‌گر آیس- شیت در رویکردهای میانه و میانگین، نتایج معادل را نشان داده است. مقایسه ضریب همبستگی نشان می‌دهد که رویکرد مرجع مبنا با مقدار ۶۳٪، بیشترین ضریب همبستگی را در میان چهار رویکرد مورد بررسی دارد. پس از آن ضریب همبستگی به ترتیب در رویکردهای میانگین، میانه و کل از بیشترین به کمترین تغییر می‌کند. نتایج حاصل از ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه حاکی از آن است که رویکرد مرجع مبنا بهبود ۴۰ درصدی را نسبت به رویکرد میانگین داشته است.

شکل (۹)، سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۳۹ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتعقیب‌گر اقیانوسی، رویکردهای انتخابی میانگین، میانه، مرجع مبنا به همراه ارتفاع آب حاصل از نوسان نگار محلی در زمان متناظر را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۰) سری زمانی نهایی ارتفاع آب گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتقیب‌گر بهینه رویکردهای میانگین، میانه و کل را نشان می‌دهد.

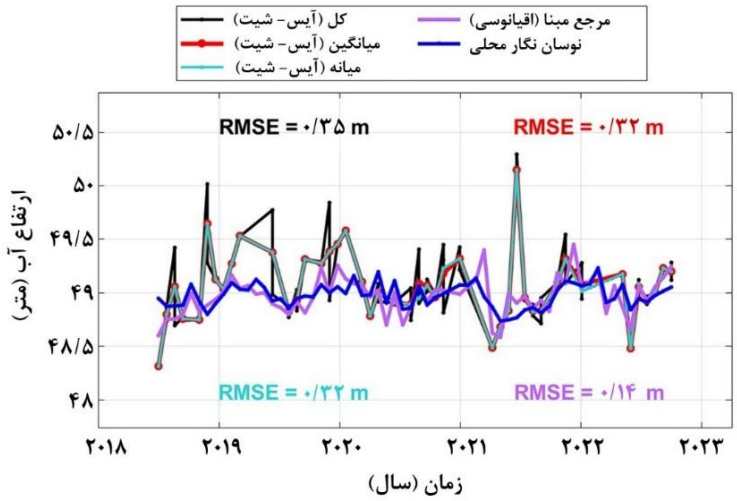
همانطور که شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند؛ از میان رویکردهای بررسی شده، روش مرجع مبنا در برآورد سری زمانی ارتفاع آب، صحت بالاتر و مقادیر نزدیک‌تر به مشاهدات نوسان نگار محلی را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد.



شکل۹: سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۳۹ ماهواره سنتینل-۳ب حاصل از بازتعقیب‌گر اقیانوسی

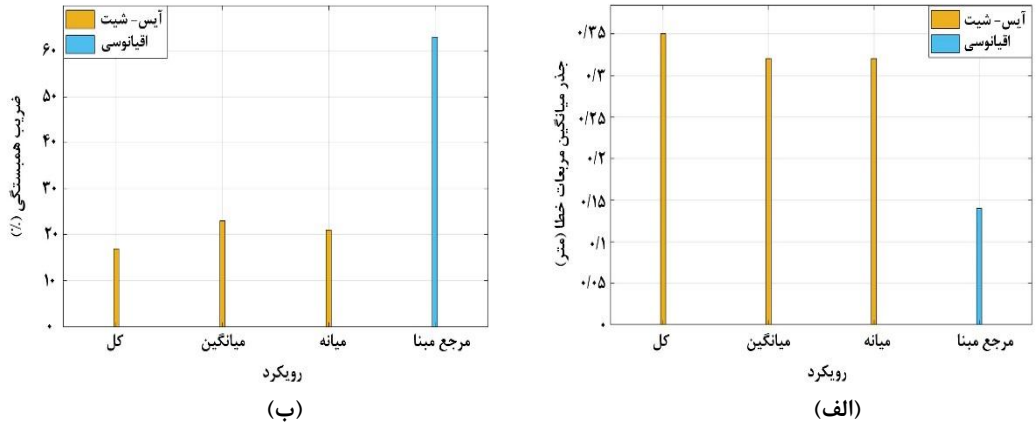
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]



شکل۱۰: سری زمانی نهایی ارتفاع آب حاصل از بازتعقیب‌گرهای بهینه گذر۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب

شکل (۱۱) مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی حاصل از ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب میان بازتعقیب‌گر بهینه در هر رویکرد و مشاهدات نوسان نگار محلی در داده‌های سطح دو گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود رویکرد مرجع مبنا دارای بیشترین همبستگی و کمترین مقدار *RMSE* می‌باشد.



شکل۱۱: پارامترهای آماری ارزیابی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و مشاهدات نوسان‌نگارمحلی در گذر ۵۷ ماهواره سنتینل-۳ب، (الف) *RMSE*، (ب) ضریب همبستگی

بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا با گذر ۲۴۴ ماهواره سنتینل-۳آ نیز مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۸)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو گذر سنتینل-۳آ را برای بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا در فاصله ۵-۱ کیلومتری ساحل، در مقایسه با داده‌های نوسان نگار محلی را ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

جدول۸: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳آ (۵-۱ کیلومتری ساحل)

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۰٫۲۵	۰٫۷۲	۰٫۲۷	۱٫۰۸	۱٫۱۴	٪۳۲
	میانگین	۰٫۱۴	۰٫۴۷	۰٫۱۴	۰٫۷۸	۱٫۰۱	٪۵۲
	میانه	۰٫۱۰	۰٫۳۲	۰٫۱۲	۰٫۶۳	۱٫۰۰	٪۶۹

نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد که رویکرد میانه در مقایسه با دو رویکرد دیگر، کمترین مقادیر *RMSE* را در ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب مرجع حاصل از بازتعقیب‌گرهای مختلف به دست آورده است. همچنین بازتعقیب‌گرهای آیس- شیت و شیفت مرکز ثقل در رویکرد میانگین نتایج معادلی داشته اند. بهترین *RMSE* حاصل از میانه مربوط به بازتعقیب‌گر آیس-شیت با مقدار ۰٫۱۰ متر بوده است؛ همچنین این بازتعقیب‌گر کمترین *RMSE* را برای رویکردهای میانگین و کل به ترتیب با مقادیر ۰٫۱۴ و ۰٫۲۵ ارائه نموده است. در میان سه رویکرد مورد بررسی، رویکرد میانه با ضریب همبستگی ٪۶۹ بیشترین همبستگی را میان داده‌های نوسان نگار محلی به ازای بازتعقیب‌گر بهینه (آیس-شیت) دارد. پس از آن به ترتیب رویکرد میانگین و کل بیشترین مقدار را دارند. از آنجایی که نتیجه‌ی بهینه به ازای رویکرد میانه و بازتعقیب‌گر آیس- شیت حاصل شده است؛ لذا از سری زمانی میانه بازتعقیب‌گر آیس- شیت در فاصله ۵-۱ کیلومتری بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا به عنوان سری زمانی مرجع برای بهبود سری زمانی ۱-۰ کیلومتری ساحل همین بخش استفاده شده است.

جدول (۹)، مقادیر *RMSE* و ضریب همبستگی مربوط به ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی آلکودیا و به فاصله یک کیلومتری ساحل که حاصل از تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو در گذر سنتینل-۳آ می‌باشد را نشان می‌دهد.

نتایج جدول (۹) نشان می‌دهد رویکرد مرجع مبنا نسبت به سایر رویکردها نتیجه بهینه حاصل نموده است. این رویکرد در مقایسه با بهترین نتایج *RMSE* حاصل از بازتعقیب‌گرهای آیس- شیت، اقیانوسی، شیفت مرکز ثقل، سی- آیس و تعقیب‌گر ارتفاع‌سنج، به ترتیب بهبودهای ۱۴٪، ۱۴٪، ۸۲٪، ۷۲٪ و ۳۵٪ را حاصل کرده است.

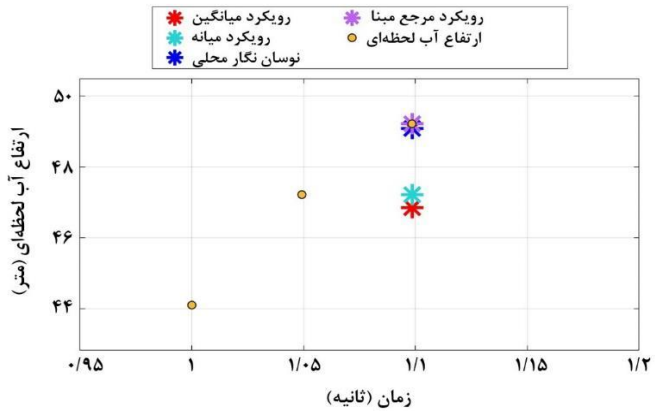
جدول۹: ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب بخش جنوب غربی خلیج آلکودیا حاصل از مأموریت سنتینل-۳آ (۱-۰ کیلومتری ساحل)

	بازتعقیب‌گر / رویکرد	آیس-شیت	اقیانوسی	شیفت مرکز ثقل	سی-آیس	تعقیب‌گر	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه
RMSE (m)	کل	۰٫۷۹	۱٫۴۱	۲٫۷۵	۳٫۰۷	۱٫۲۰	٪۱۶
	میانگین	۰٫۷۱	۰٫۶۸	۱٫۴۹	۲٫۲۵	۱٫۱۰	٪۳
	میانه	۰٫۷۱	۰٫۵۰	۰٫۹۳	۲٫۱۷	۱٫۱۰	٪۱۰
	مرجع مبنا	۰٫۶۱	۰٫۴۳	۰٫۱۷	۰٫۶۱	۰٫۷۲	٪۴۶
	درصد بهبود	٪۱۴	٪۱۴	٪۸۲	٪۷۲	٪۳۵	٪۳۰

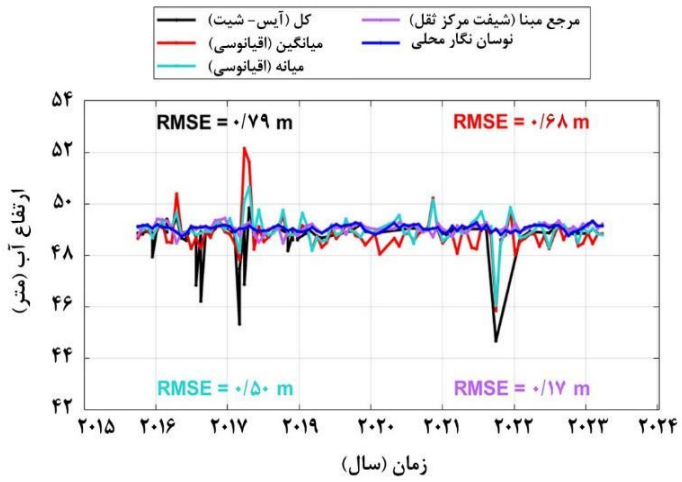
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

عملکرد بازتعقیب‌گر آیس-شیت و تعقیب‌گر ماهواره در دو رویکرد میانگین و میانه معادل است. همچنین مشاهده می‌شود که رویکرد میانه در مقایسه با رویکرد میانگین و کل عملکرد بهتری در برآورد سری زمانی ارتفاع آب داشته است. عملکرد ضعیف رویکرد کل نیز مشهود است. مقایسه مقادیر ضریب همبستگی نشان می‌دهد که رویکرد مرجع مبنا با مقدار ۴۶٪، بیشترین ضریب همبستگی را در میان سایر رویکردهای مورد بررسی داشته است. پس از آن ضریب همبستگی به ترتیب در رویکردهای کل، میانه و میانگین بیشتر است. از نتایج حاصل از ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه می‌توان دریافت که رویکرد مرجع مبنا به میزان ۳۰٪ عملکرد بهتری را نسبت به رویکرد کل از خود نشان داده است.

شکل (۱۲) سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای دوره ۴۲ ماهواره سنتینل-۳آ حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل، ارتفاع آب حاصل از نوسان نگار محلی در زمان متناظر به همراه رویکردهای انتخابی میانه، میانگین و رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد. نزدیکی نتیجه رویکرد مرجع مبنا به داده نوسان نگار نسبت به سایر رویکردها روشن است. همچنین شکل(۱۳) سری زمانی نهایی ارتفاع آب حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه برای رویکردهای کل، میانگین، میانه و مرجع مبنا به همراه ارتفاع آب حاصل از نوسان نگار محلی را ارائه می‌دهد.



شکل۱۲: سری زمانی ارتفاع سطح آب لحظه‌ای دوره ۴۲ ماهواره سنتینل-۳آ حاصل از بازتعقیب‌گر شیفت مرکز ثقل

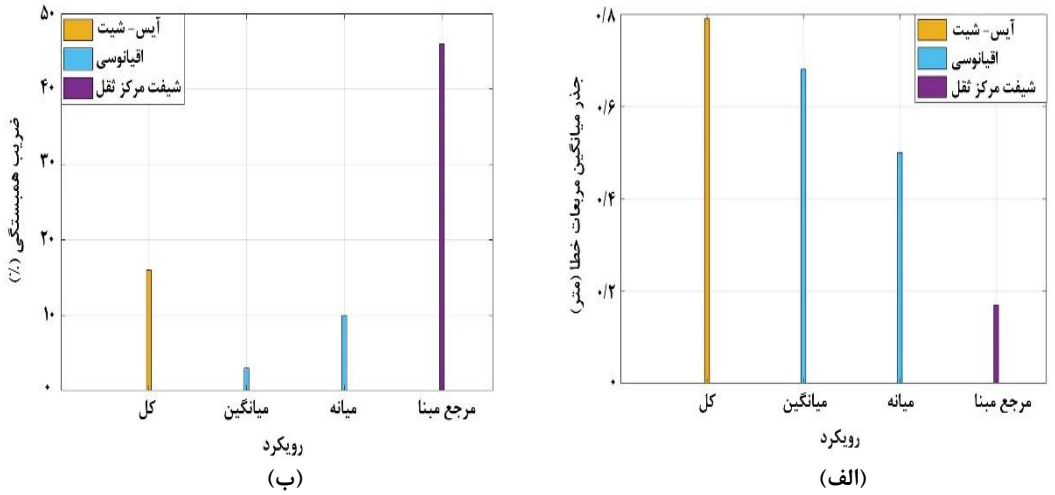


شکل۱۳: سری زمانی نهایی ارتفاع سطح آب گذر ۲۴۴ ماهواره سنتینل-۳آ حاصل از بازتعقیب‌گرهای بهینه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

شکل (۱۴) مقدار *RMSE* و ضریب همبستگی حاصل از ارزیابی سری زمانی ارتفاع آب میان بازتعقیب‌گر بهینه در هر رویکرد و مشاهدات نوسان نگار محلی در داده‌های سطح دو گذر ۲۴۴ ماهواره سنتینل-۳آ را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که رویکرد پیشنهادی نسبت به سایر رویکردها دارای بیشترین درصد همبستگی و کمترین مقدار *RMSE* می‌باشد. پس از رویکرد مرجع مبنا، ضریب همبستگی رویکرد کل بیشتر بوده اما *RMSE* بالایی را به خود اختصاص داده است.



شکل۱۴: پارامترهای آماری ارزیابی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و مشاهدات نوسان‌نگارمحلی در گذر ۲۴۴ ماهواره سنتینل-۳آ، (الف) *RMSE*، (ب) ضریب همبستگی

در جدول (۱۰) به ارائه بهینه‌ترین *RMSE* برای بخش بهبود داده شده حاصل از رویکردهای پیشین (کل/ میانه / میانگین) در میان تعقیب‌گر و بازتعقیب‌گرها و *RMSE* بهینه در رویکرد پیشنهادی مرجع مبنا به تفکیک منطقه مطالعاتی، پرداخته شده است. همچنین ضریب همبستگی حاصل از آنالیز همبستگی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و مشاهدات نوسان نگار محلی در رویکردهای پیشین (کل/ میانگین/ میانه) و رویکرد مرجع مبنا و درصد بهبود آن‌ها ارائه شده است.

براساس جدول (۱۰)، نتایج حاصل از پردازش *RMSE*ها حاکی از آن است که رویکرد مرجع مبنای پیشنهادی در این پژوهش در مطالعه دریاچه وترن، سبب بهبود ۶۷ درصدی صحت سری زمانی ارتفاع آب مأموریت نسل قدیم ارتفاع سنجی (جیسون-۳) و بهبود ۵۶ تا ۶۶ درصدی صحت در مطالعه فاصله ۱-۰ کیلومتری سواحل آلکودیا نسبت به رویکرد بهینه پیشین (میانه، میانگین یا کل) شده است. نتایج ضرایب همبستگی میان داده‌های حاصل از بازتعقیب‌گر بهینه و داده‌های نوسان نگار محلی نشان دهنده آن است که رویکرد مرجع مبنای پیشنهادی در این پژوهش در مطالعه دریاچه وترن، سبب افزایش ۳۳ درصدی و افزایش ۶ تا ۴۰ درصدی این پارامتر در فاصله ۱-۰ کیلومتری سواحل آلکودیا شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

جدول۱۰: ارزیابی سری‌های زمانی ارتفاع آب بهینه حاصل از رویکردهای کل، میانگین و میانه در مقایسه با روش مرجع مبنا به ازای بازتعقیب‌گر بهینه در پارامتر های ارزیابی *RMSE* و ضریب همبستگی

منطقه مطالعاتی	ماهواره ارتفاع سنجی	بهترین *RMSE(m)* کل/میانه/میانگین	*RMSE(m)* بازتعقیب‌گر بهینه مرجع مبنا	درصد بهبود *RMSE*	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه کل/میانه/میانگین	ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه مرجع مبنا	درصد بهبود ضریب همبستگی
دریاچه وترن	جیسون-۳	۰٫۵۱	۰٫۱۷	٪۶۷	٪۲۶	٪۵۹	٪۳۳
شمال خلیج آلکودیا	سنتینل-۳ب	۱٫۱۵	۰٫۴۶	٪۶۰	٪۱۷	٪۲۳	٪۶
جنوب غربی خلیج آلکودیا	سنتینل-۳ب	۰٫۳۲	۰٫۱۴	٪۵۶	٪۲۳	٪۶۳	٪۴۰
	سنتینل-۳آ	۰٫۵۰	۰٫۱۷	٪۶۶	٪۱۶	٪۴۶	٪۳۰

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش دمای کره زمین و بحران کمبود آب، پایش دقیق ارتفاع آب و اطلاع از تغییرات لحظه‌ای و بلند مدت سطح آب در راستای نظارت، تصمیم‌گیری و انجام اقدامات لازم از اهمیت بالایی برخوردار است. ارتفاع سنجی ماهواره‌ای یکی از روش‌های متداول برای پایش ارتفاع آب است، اما در نواحی ساحلی و آب‌های بسته با چالش‌هایی هم چون اغتشاش شکل موج و کاهش کارایی همراه است. ظهور نسل جدید مأموریت‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای تحت عنوان ارتفاع سنج راداری با دریچه مصنوعی با افزایش تعداد و صحت مشاهدات تاحدی با این کاهش کارایی مقابله کرده است اما همچنان این چالش پابرجاست. در تشکیل سری زمانی ارتفاع آب یک گذر مطالعاتی، نماینده سری‌های زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای کنار هم قرار گرفته و سری زمانی نهایی ارتفاع آب گذر تشکیل می‌گردد. این نماینده‌ها در مطالعات پیشین استفاده از تمامی داده‌ها (کل)، میانه و میانگین آن‌ها معرفی شده است. در این پژوهش نماینده در هر سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای با ویژگی ارتفاع آب نزدیک‌تر به سری زمانی ارتفاع آب مرجع انتخاب شده است. این رویکرد معرفی شده در این پژوهش "رویکرد مرجع مبنا" نامیده شده است. به منظور بهبود کارایی نسل قدیم مأموریت ارتفاع سنجی جیسون-۳ در دریاچه وترن، سری زمانی ارتفاع آب مرجع، سری زمانی ارتفاع آب حاصل از مأموریت نسل جدید سنتینل-۳ در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش صحت سری زمانی ارتفاع آب در فاصله ۱-۰ کیلومتری ساحل خلیج آلکودیا، سری زمانی ارتفاع آب در فاصله دور از ساحل (۱ تا ۵ کیلومتری) به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. سری‌های زمانی ارتفاع آب حاصل از رویکردهای میانه، میانگین، کل و رویکرد مرجع مبنا تشکیل و به منظور ارزیابی با پارامتر*RMSE*، ضریب همبستگی و درصد بهبود آن ها، با داده‌های نوسان نگار محلی مقایسه شدند. روش مرجع مبنا که به‌عنوان رویکرد پیشنهادی در تعیین ارتفاع سطح آب در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، دارای عملکرد بهتر و نتایج نزدیک‌تری به مشاهدات نوسان نگار محلی نسبت به سایر رویکرد های پیشین بوده است. خلاصه‌ای از نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

- رویکرد مرجع مبنا نسبت به بهینه‌ترین رویکردهای پیشین (میانه، میانگین و کل) بهبود *RMSE* ۴۳ الی ۷۲ درصدی در دریاچه وترن و ۷ الی ۸۷ درصدی در سواحل آلکودیا حاصل کرده است.
- ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه در روش مرجع مبنا نسبت به ضریب همبستگی بازتعقیب‌گر بهینه در رویکردهای پیشین در دریاچه وترن افزایش ۳۳ درصدی و در سواحل آلکودیا افزایش ۶ الی ۴۰ درصدی را حاصل کرده است.
- در هر دو ناحیه مطالعاتی دریاچه و ساحل، رویکرد مرجع مبنا نسبت به هر سه رویکرد میانه، میانگین و کل نتایج بهتری حاصل کرده است.
- در نواحی مطالعاتی در این پژوهش عموماً میانه نسبت به میانگین نماینده بهتری برای سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای بوده که این امر در تایید مطالعات گذشته است.
- رویکردهای مطالعاتی به عنوان نماینده سری زمانی ارتفاع آب لحظه‌ای را می توان به ترتیب عملکرد بهینه به صورت رویکرد مرجع مبنا، میانه، میانگین و کل بیان نمود.

رویکرد مرجع مبنـای پیشـنهادی در ایـن روش ضـمن ارائه مشاهدات صحیح در فاصله نزدیک به ساحل (یـک کیلومتری)، سبب بهبود کارایی مأموریـت‌هـای ارتفـاع-سنجی نسل قدیم در نواحی آبـی بسـته و ارائـه توزیـع مناسبی از داده‌های ارتفاعی در این نواحی می شود.

مراجع

[1] X.-Y. Xu, F. Birol, and A. Cazenave, "Evaluation of Coastal Sea Level Offshore Hong Kong from Jason-2 Altimetry," Remote Sensing, vol. 10, no. 2, p. 282, 2018. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/2/282.

[2] Z. An, P. Chen, F. Tang, X. Yang, R. Wang, and Z. Wang, "Evaluating the Performance of Seven Ongoing Satellite Altimetry Missions for Measuring Inland Water Levels of the Great Lakes," Sensors, vol. 22, no. 24, p. 9718, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/24/9718.

[3] K. A. Saman, Ardalan, "Monitoring of Inland Water Levels by Satellite Altimetry," Master Thesis, University of Tehran, 2011.

[4] A. Amini, B. Voosoghi, and S. Roohi, "Monitoring lakes water variations using satellite altimetry observations and radar SAR images," Master Thesis, 2019.

[5] A. Parisa, B. Voosoghi, and S. Roohi, "Monitoring water level variations from recent altimetry missions in coastal area," Master Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2021.

[6] J. Zheng, X.-Y. Xu, Y. Xu, and C. Guo, "Coastal Waveform Retracking for Synthetic Aperture Altimeters Using a Multiple Optimization Parabolic Cylinder Algorithm," Remote Sensing, vol. 15, no. 19, p. 4665, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/19/4665.

[7] S. Biancamaria et al., "Preliminary Characterization of SWOT Hydrology Error Budget and Global Capabilities," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 3, 04/01 2010, doi: 10.1109/JSTARS.2009.2034614.

[8] E. Boergens, D. Dettmering, C. Schwatke, and F. Seitz, "Treating the Hooking Effect in Satellite Altimetry Data: A Case Study along the Mekong River and Its Tributaries," Remote Sensing, vol. 8, no. 2, p. 91, 2016. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/8/2/91.

[9] R. K. Raney, "The delay/Doppler radar altimeter," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 5, pp. 1578-1588, 1998, doi: 10.1109/36.718861.

[10] N. H. Idris, S. Vignudelli, and X. Deng,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

25-1643-2021.

[18] 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.

[19] P. Agar, S. Roohi, B. Voosoghi, A. Amini, and D. Poreh, "Sea Surface Height Estimation from Improved Modified, and Decontaminated Sub-Waveform Retracking Methods over Coastal Areas," Remote Sensing, vol. 15, no. 3, p. 804, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/3/804.

[20] 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.

[21] S. Calmant, J.-F. Crétaux, and F. Rémy, "Principles of radar satellite altimetry for application on inland waters," in Microwave Remote Sensing of Land Surface: Elsevier, 2016, pp. 175-218.

[22] S. Roohi, "Performance evaluation of different satellite radar altimetry missions for monitoring inland water bodies," 2017.

[23] L.-L. Fu and A. Cazenave, Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications. Elsevier, 2000.

[24] R. Arabsahebi, B. Voosoghi, and M. Tourian, "The Inflection-Point Retracking Algorithm: Improved Jason-2 Sea Surface Heights in the Strait of Hormuz," Marine Geodesy, vol. 41, pp. 1-22, 04/10 2018, doi: 10.1080/01490419.2018.1448029.

[25] M. J. Fernandes and C. Lázaro, "Independent Assessment of Sentinel-3A Wet Tropospheric Correction over the

"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.

[11] P. Salehi, B. Voosoghi, P. Agar, and A. Amini, Performance evaluation of Sentinel-3 & Jason-3 altimetry missions for estimating water level in coastal areas (Text in Persian). 2021.

[12] Z. Huang, H. Wang, Z. Luo, C. K. Shum, K.-H. Tseng, and B. Zhong, "Improving Jason-2 Sea Surface Heights within 10 km Offshore by Retracking Decontaminated Waveforms," Remote Sensing, vol. 9, no. 10, p. 1077, 2017. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/9/10/1077.

[13] K. Nielsen, O. B. Andersen, and H. Ranndal, "Validation of Sentinel-3A Based Lake Level over US and Canada," Remote Sensing, vol. 12, no. 17, p. 2835, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2835.

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

[15] S. Roohi, A. Amini, and B. Voosoghi, Monitoring inland water bodies from Sentinel-3 and CryoSat-2 SAR altimeters. 2018.

[16] F. Peng and X. Deng, "Validation of Sentinel-3A SAR mode sea level anomalies around the Australian coastal region," Remote Sensing of Environment, vol. 237, p. 111548, 2020/02/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111548.

[17] S. Shu et al., "Evaluation of historic and operational satellite radar altimetry missions for constructing consistent long-term lake water level records," Hydrology and Earth System Sciences, vol. 25, pp. 1643-1670, 04/01 2021, doi: 10.5194/hess-

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

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] S. Mafi, S. Farzaneh, M. A. Sharifi, and E. Forootan, "Spline retracker: a geometrical retracking algorithm for coastal and open ocean altimetry," Marine Geodesy, pp. 1-36, 01/02 2024, doi: 10.1080/01490419.2023.2291772.

[27] 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," vol. 8, 12/27 2019.

[28] S. Vignudelli, A. Scozzari, R. Abileah, J. Gomez-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, 2019, pp. 87-127.

[29] G. Brown, "The average impulse response of a rough surface and its applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 25, no. 1, pp. 67-74, 1977, doi: 10.1109/TAP.1977.1141536.

[30] R. Arabsahebi, B. Voosoghi, and M. Tourian, "Sensitivity Analysis of Brown Model Waveform in Radar Altimetry," Journal of Geospatial Information Technology, vol. 8, pp. 21-38, 09/01 2020, doi: 10.29252/jgit.8.2.21.

[31] P. Agar, B. Voosoghi, S. Roohi, and A. Amini, "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)," Journal of Geospatial Information Technology, vol. 10, pp. 17-37, 06/09 2023.

[32] 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, 2019.

[33] E. T. CNES:SALP-MU-M-OP-16118-CN , JPL:TBD,NOAA/NESDIS:TBD, Jason-3 Products Handbook. 2020.

[34] B. Nababan, M. Hakim, and J. Panjaitan, "Waveform identification and retracking analyses of Jason-2 altimeter satellite data for improving sea surface height estimation in Southern Java Island Waters and Java Sea, Indonesia," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 149, p. 012057, 05/01 2018, doi: 10.1088/1755-1315/149/1/012057.

[35] M. Passaro, F. Schlembach, J. Oelsmann, D. Dettmering, and F. Seitz, "Coastal Assessment of Sentinel-6 Altimetry Data during the Tandem Phase with Jason-3," Remote Sensing, vol. 15, no. 17, p. 4161, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/17/4161.

[36] World.Lake.Database. "https://wldb.ilec.or.jp/Display/html/3477." (accessed.

[37] mallorca.com. "https://mallorca.com/en/travel-info/shopping/mallorca-facts-figures." (accessed.

[38] aviso.altimetry. "https://www.aviso.altimetry.fr." (accessed.

[39] J. Yang and J. Zhang, "Validation of Sentinel-3A/3B Satellite Altimetry Wave Heights with Buoy and Jason-3 Data," Sensors, vol. 19, no. 13, p. 2914, 2019. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/13/2914.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.1, Spring 2025

Research Paper

A Reference-Based Approach for Improving the Accuracy of Water Level Time Series in Coastal Areas and Lakes

Zahra Esmaeili [1], Behzad Voosoghi [2*], Arash Amini [3], Mahmoud Pirooznia [4]

1- Master Student of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Professor of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3- PhD Student of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
4- PhD Graduate of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The efficiency of the satellite altimetry in the coastal and inland water areas is facing limitations due to the increased noise in the base observations (waveforms). Although these limitations have somewhat decreased with the emergence of new generations of satellite altimetry missions and the development of various retracking algorithms these limitations have decreased somewhat, they still remain a challenge. In the previous approaches, all altimetry data from different cycles (all), their medians, and means have been used for representing the cycle and forming a time series of water levels in a pass. In this study, an innovative approach called the reference-based approach has been proposed to select this representative. In the reference-based approach, the representative with the characteristic of water level closer to the reference water level time series is selected to improve the accuracy of the water level time series in the coastal areas (0–1 kilometers) as well as the time series resulting from the conventional altimetry missions in inland water. The reference water level time series for the coastal areas at a distance from the shore (1–5 kilometers) and for lakes has been obtained from the new generation altimetry mission. In addition to the proposed approach, all, mean and median approaches have also been evaluated. To improve the accuracy of the water level time series within one kilometer from the northern and southwestern shores of the Alcudia Gulf, data from passes 244 of Sentinel-3A and 57 of Sentinel-3B, as well as data from passes 141 of Sentinel-3A and 220 of Jason-3 satellites passing over Lake Vattern in Sweden, have been used from 2016 to 2023. The evaluation results of the water level time series of lake obtained from the proposed approach compared to the optimal previous approach in comparison with in situ gauge data show an improvement in RMSE ranging from 43% to 72% and in the studied lake and 7% to 87% in the coastal lines of the study area. This comparison also shows an increase of 33% and 6% to 40% of the correlation coefficient parameter for Lake Vattern and the coastal areas of Alcudia, respectively. Based on the proposed approach, the median and the mean of the time series show optimal performance, as well. In addition to increasing the accuracy of water level time series near the shore, the proposed approach has also increased the efficiency of conventional altimetry missions in inland waters the number of observations and their appropriate distribution in these areas.

Key words: *Satellite altimetry, Sentinel-3, Mean, Median, Reference.*

Correspondence Address: *ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : 021-88877070
Email : *Vosoghi@kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61882/jgit.13.1.19]