

بازیابی شکل موج‌های بازگشتی مأموریت ارتفاع‌سنجی رادار با روزنه مصنوعی

Sentinel-3A به منظور پایش تراز سطح آب‌های درون‌سرزمینی

(مطالعه موردی: مخزن سد درودزن شیراز)

آرش طایفه رستمی^{۱*}، علیرضا آزموده اردلان^۲، شیرزاد روحی^۳ و امیرحسین پورمینا^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه ژئودزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۴. دانشجوی دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

در آب‌های درون‌سرزمینی، تراز سطح آب حاصل از داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنجی مغشوش می‌باشد. از این رو، برای تصحیح تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در این نواحی، انجام بازیابی شکل موج‌های بازگشتی، الزامی است. در این مطالعه از داده‌های سطح دو و سطح یک سنجنده ارتفاع‌سنج رادار SAR (SRAL) مأموریت Sentinel-3A که در حالت رادار با روزنه مصنوعی (SAR) اندازه‌گیری می‌کند، در بازه زمانی مارس ۲۰۱۶ تا نوامبر ۲۰۱۹ برای پایش تراز سطح آب سد درودزن شیراز استفاده شده است. همچنین برای بازیابی شکل موج‌های موجود در داده‌های سطح یک نیز از الگوریتم بازیابی حد‌آستانه به‌ازای حد‌آستانه‌های مختلف استفاده شده است. نتایج نشان داد، بازیابنده مرکز ثقل (OCOG) موجود در داده‌های سطح دو با مقدار جذر خطای مربعی میانگین (RMSE) ۳۸٫۲۳ سانتی‌متر و ضریب وابستگی ۹۹٫۲۳٪ با داده‌های نوسان‌نگار محلی نسبت به دیگر بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو از دقت بالاتری در برآورد سری زمانی تراز سطح آب سد درودزن دارد. پس‌از آن، سری زمانی تراز سطح آب از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو و انتخاب بازیابنده سطح دو بهینه، شکل موج‌های بازگشتی از داده‌های سطح یک با استفاده از الگوریتم بازیابی حد‌آستانه ابتدا بازیابی شده و سپس سری زمانی تراز سطح آب به‌ازای آستانه‌های مختلف حاصل شده و با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه شد که نتایج نشان داد آستانه ۶۰٪ با مقدار RMSE ۳۷٫۷۳ سانتی‌متر و وابستگی ۹۹٫۳۰٪ سبب بهبود ۱۳٪ دقت و افزایش ۰/۰۷٪ وابستگی با داده‌های نوسان‌نگار نسبت به سری زمانی تراز سطح آب حاصل از بازیابنده سطح دو بهینه شده است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، Sentinel-3، بازیابی شکل موج‌های بازگشتی، تراز سطح آب، سد درودزن.

۱. مقدمه

پالس رادار به آب نفوذ نمی‌کند، بلکه از سطح آب منعکس شده و به طرف ماهواره باز می‌گردد. الگوریتم‌های مورد استفاده برای پردازش اکوهای بازگشتی به منظور اندازه‌گیری دقیق زمان رفت و برگشت موج، بازیاب (Tracker) نامیده می‌شود که برای قرار گرفتن صحیح پنجره دریافتی ماهواره در موقعیت مناسب برای جمع‌آوری کل شکل موج‌های بازگشتی استفاده می‌شود. برآورد دقیق فاصله ماهواره از سطح آب توسط بازیابی مجدد (Retracker) (پردازش شده در زمین) ارائه می‌شود که تصحیح خوبی برای تعیین موقعیت نقطه بازیابی مجدد (Retracking Point) شکل موج ارائه

تکنیک ارتفاع‌سنجی رادار زمان رفت و برگشت پالس رادار بین آنتن ماهواره و سطح زمین در امتداد شاقولی (Nadir) سنجنده اندازه‌گیری می‌کند. از طریق آنتن ماهواره ارتفاع‌سنجی، امواج الکترومغناطیسی به صورت امواج مخروطی شکل، به صورت پالس به طرف زمین فرستاده شده و سطح زمین را پوشش می‌دهد که به آن ردپای ماهواره گفته می‌شود. سپس، امواج الکترومغناطیسی از سطح زمین منعکس شده و به طرف ماهواره باز می‌گردد. زمان رفت و برگشت موج، توسط ساعت ماهواره اندازه‌گیری می‌شود؛ در نتیجه می‌توان فاصله ماهواره از سطح آب (Range) را محاسبه کرد.

بزرگ ردپای ماهواره که از آب رودخانه‌های کوچک-متوسط (عرض ۴۰ تا ۸۰۰ متر) بزرگ‌تر است، توپوگرافی اطراف رودخانه سیگنال بازگشتی رادار را نویزی می‌کند. به‌همین دلیل، اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب برای رودخانه‌های عریض بهتر از رودخانه‌های باریک است، اما این همچنین بستگی به نوع سنسور ارتفاع سنج موجود در ماهواره (LRM یا SAR) دارد. برای مثال، کوبلینسکی و همکاران (۱۹۹۳) در رودخانه آمازون، بزرگ‌ترین رودخانه جهان، با ماهواره RMSE Geosat در حد ۷۰ سانتی‌متر را در مقایسه با داده‌های نوسان‌نگار محلی نتیجه گرفتند و در ادامه، فرایپارت و همکاران (۲۰۰۶) و سانتوس داسیلوا و همکاران (۲۰۱۰)، به RMSE در حدود ۳۰ سانتی‌متر با ماهواره Envisat دست یافتند که با توجه به قدیمی بودن مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی فوق، نتایج خوبی می‌باشند. با ارتفاع‌سنج‌های SAR نه تنها دقت افزایش می‌یابد، بلکه به‌خاطر توان تفکیک بالایی که در طول گذر دارند، رودخانه‌های باریک‌تر نیز قابل کنترل و پایش هستند (اشنایدر و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، پردازش اندازه‌گیری‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای رودخانه‌های کوچک-متوسط به دلیل ردپای بزرگ آنتن حتی در حالت SAR در جهت متقاطع (که دارای عرض ردپای مشابه با ارتفاع‌سنجی معمولی هستند) چالش برانگیز است. برای پردازش امواج پیچیده اکو، الگوریتم‌های بازبازی خاصی طراحی شده‌اند تا تغییرات ارتفاع آب را با دقت بیشتری برآورد کنند (سلیستیوآدی و همکاران، ۲۰۱۵؛ بیانکاماریا و همکاران، ۲۰۱۷).

در سال ۱۹۷۷ برآون معادله ریاضی شکل موج‌های بازگشتی ایده‌آل از سطوح اقیانوسی (شکل موج برآون) را ارائه کرد (برآون، ۱۹۷۷). شکل موج‌های بازگشتی از دریاچه‌ها، مخازن سدها و رودخانه‌ها به دلیل اندازه بزرگ ردپای ماهواره، وجود بازپراکنش‌گرهای مختلف در ردپا (جزیره‌های کوچک، پوشش‌های گیاهی) و عمق کم از حالت شکل موج ایده‌آل اقیانوسی (برآون) دور می‌شوند (گانگولی و همکاران، ۲۰۱۵؛ یوان و همکاران، ۲۰۱۷)؛

می‌دهد (تارپانلی و بنونیسته، ۲۰۱۹). فاصله ماهواره از سطح آب به‌دست‌آمده از بازباینده پس از اعمال تصحیحات اتمسفری (تصحیح تروپوسفر خشک و تر و تصحیح یونوسفری) و تصحیح جزر و مد ناشی از زمین صلب تصحیح می‌شود (کلمنت و همکاران، ۲۰۰۸). در نهایت اختلاف بین ارتفاع ماهواره (مدار) نسبت به بیضوی مرجع و فاصله به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری رادار (فاصله ماهواره از سطح آب)، ارتفاع سطح آب را نسبت به بیضوی مرجع (مثل WGS84) به‌دست می‌دهد.

مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی در ابتدا برای پایش اقیانوس‌ها و به‌صورت کلی برای پهنه‌بندی و مطالعه یخچال‌های طبیعی و یخ‌های دریا طراحی و برنامه‌ریزی شده بودند. تاکنون با اینکه ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی به‌طور مداوم در سراسر جهان داده ثبت می‌کنند، با این حال از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی هیچ مأموریتی برای نظارت بر آب‌های درون‌سرزمینی طراحی نشده است. بازباینده برآون (Brown) برای آب‌های درون‌سرزمینی که شکل موج‌های بازگشتی بسیار متغیری دارند طراحی شده ولی کارآمد نیست. از این رو، از بازباینده‌های مختلفی برای بهره‌برداری از این اندازه‌گیری‌ها روی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و تالاب‌ها استفاده می‌شود (تارپانلی و بنونیسته، ۲۰۱۹).

در اولین مطالعات در حوزه آب‌های درون‌سرزمینی به پایش سطح آب دریاچه‌های بزرگ در آمریکا و آفریقا با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی از ماهواره‌های Seasat، Geosat و TOPEX/Poseidon اشاره شده است (بروکس، ۱۹۸۲؛ موریس و گیل، ۱۹۹۴؛ بیرکت، ۱۹۹۵؛ کازناو و همکاران، ۱۹۹۷؛ مرسیه و همکاران، ۲۰۰۲). سپس، تعدادی از مطالعات، کاربرد ارتفاع‌سنجی را به رودخانه‌ها، یعنی آمازون، نگرو، اوب، مکونگ، گنگ، براهماپوترا و پو گسترش دادند (کورائف و همکاران، ۲۰۰۴؛ فرایپارت و همکاران، ۲۰۰۶؛ لئون و همکاران، ۲۰۰۶؛ بیرینکشو و همکاران، ۲۰۱۰؛ تارپانلی و همکاران، ۲۰۱۳؛ دومنه‌گنی و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به اندازه

موج‌های مأموریت ارتفاع‌سنجی CryoSat-2 در مطالعه اقیانوس شمال با استفاده از الگوریتم‌های حد‌آستانه و OCOG در مقایسه با نتایج حاصل از الگوریتم‌های OCOG، حد‌آستانه و β -5 در بازیابی شکل موج اصلی و پردازش داده‌های سطح دو نشان داده شد (جین و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی تراز سطح آب مخزن سد یوکای هند از طریق بازیابی اولین موجک معنادار با الگوریتم حد‌آستانه، نتایج مطلوب‌تری را در مقایسه با اعمال الگوریتم‌های بازیابی β -5، Ice-2، OCOG و حد‌آستانه به شکل موج اصلی نتیجه داده است (گانگولی و همکاران، ۲۰۱۵).

در مطالعه نواحی مختلف آبی با بهره‌گیری از مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی متفاوت، ضمن معرفی الگوریتم حد‌آستانه به‌عنوان بازیابنده بهینه، میانگین بازیابی موجک‌های معنادار و پس از آن بازیابی اولین موجک معنادار، پیشنهاد شده است. همچنین توانایی میانه (Median) در مقایسه با میانگین در برآورد سری زمانی تراز لحظه‌ای سطح آب معرفی شده است (روحی، ۲۰۱۷). تا به حال، مطالعه‌ای در راستای برآورد تراز سطح آب با استفاده از مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی برای پایش مخازن سدهای ایران صورت نگرفته است. در مطالعه‌ای که به تازگی صورت گرفته است سری زمانی مساحت سطح آب سد درودزن با استفاده از دو پلاریزاسیون تصاویر راداری مأموریت Sentinel-1 پایش شده است که نتایج حاصل از تصاویر همبستگی بالایی را با داده‌های میدانی نشان داده است (طایفه رستمی و همکاران، ۲۰۲۱). از این‌رو، اهداف اصلی این مطالعه، (۱) ایجاد سری زمانی تراز سطح آب سد درودزن شیراز با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی Sentinel-3A SAR با پردازش داده‌های سطح دو؛ (۲) بازیابی شکل موج‌های بازگشتی سطح یک همین ماهواره با الگوریتم حد‌آستانه به ازای آستانه‌های مختلف؛ (۳) تجزیه و تحلیل و ارزیابی سری‌های زمانی تراز سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی در داده‌های سطح یک

بنابراین در این نواحی فاصله ماهواره از سطح آب به‌طور درستی اندازه‌گیری نخواهد شد. لذا لازم است تا با به‌کارگیری الگوریتم‌های خاصی تحت‌عنوان الگوریتم‌های بازیابی، زمان صحیح بازگشت سیگنال از سطح آب مجدداً بازیابی شود. این مسئله به‌عنوان بازیابی شکل موج‌های بازگشتی مطرح شده و چالشی در پایش تراز سطح آب‌های درون‌سرزمینی به‌شمار می‌رود.

الگوریتم بازیابی ریاضی β -Parameter به‌عنوان اولین الگوریتم بازیابی توسط مارتین و همکاران در سال ۱۹۸۳ در مطالعه یخچال‌های طبیعی قطب جنوب و گرینلند با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی Seasat-1 معرفی شد (مارتین و همکاران، ۱۹۸۳). وینگهام و همکاران در سال ۱۹۸۶ الگوریتم باز تعقیب آماری OCOG با ویژگی حساسیت به توپوگرافی سطح را ارائه کردند (وینگهام، رایلی و همکاران، ۱۹۸۶). دیویس نیز در سال ۱۹۹۵ الگوریتم بازیابی آماری حد‌آستانه (Threshold) در مطالعه تغییرات ارتفاعی صفحات یخی را معرفی کرد (دیویس، ۱۹۹۵). سپس رویکردهای مختلفی در بازیابی شکل موج‌های بازگشتی ارائه شد که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

بازیابی آنومالی ثقل در قسمت‌های ساحلی جزیره تایوان با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی مأموریت Geosat حاصل از بازیابی موجک (Sub-waveform) بهینه با الگوریتم حد‌آستانه در مقایسه با نوسان ژئوئید و توپوگرافی دینامیکی، نتایج با دقت بالاتری را نسبت به داده‌های GDRs و الگوریتم β -5 نتیجه داد (جینیوم و همکاران، ۲۰۰۶؛ گوو و همکاران، ۲۰۱۰). مطالعه اقیانوس جنوبی با استفاده از مأموریت ارتفاع‌سنجی ERS-1 و بازیابی موجک بهینه با بیشترین وابستگی در مقایسه با موجک مرجع با استفاده از الگوریتم حد‌آستانه، نتایج مناسبی را نسبت به اعمال الگوریتم‌های حد‌آستانه، OCOG و β -5 به‌شکل موج اصلی نشان داده است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

عملکرد مطلوب بازیابی اولین موجک معنادار در شکل

با الگوریتم حدآستانه با داده‌های نوسان‌نگار محلی سد درودزن، است.

۲. منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی درودزن (عرض جغرافیایی "۳۰°۱۲'۲۸" و طول جغرافیایی "۵۲°۲۵'۵") در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شیراز-مرودشت، بر روی رودخانه گُر در سال ۱۳۵۱ هجری شمسی احداث شده است و با تنظیم حدود ۷۶۰ میلیون مترمکعب آب در سال، آب کشاورزی حدود ۴۲ هزار هکتار از اراضی بلوک رامجرد و حدود ۳۴ هزار هکتار از اراضی منطقه کربال و کناره مرودشت را تأمین کرده و همچنین نیروگاه این سد سالانه ۴۵/۵ گیگاوات ساعت برق تولید می‌کند.

توزیع آب در سطح شهر رامجرد به روش مدرن و در سایر اراضی پایین دست سد به روش نیمه‌مدرن و سنتی صورت می‌گیرد، میزان اراضی رو به افزایش بوده و با تمام طرح‌های در دست اجرا به ۱۱۲ هزار هکتار خواهد رسید. همچنین از طریق سد درودزن آب شرب شهر شیراز-مرودشت و تعدادی از روستاهای بین راه و مؤسسات بزرگ صنعتی نزدیک و نیز آب صنعتی برای مصارف صنایع پتروشیمی نیز تأمین می‌شود.

پس از اتمام پروژه ساخت سد در سال ۱۳۵۱ پروژه‌های مختلفی جهت احداث کانال‌ها، زهکش‌ها و شبکه‌های آبیاری در دست اجرا بوده است که می‌توان به زهکش در مناطق رامجرد، کربال، بیضا، دشت آهوچر و بازسازی بندهای امیر، موان، تیلکان و پوشش بتنی کانال‌های اصلی، درجه یک، درجه دو، سه و چهار پایین دست سد اشاره کرد.

۳. داده‌های مورد استفاده

۳-۱. داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

مأموریت Sentinel-3 به‌عنوان سومین مأموریت از مأموریت‌های نسل Sentinel بوده که ابتدا مأموریت Sentinel-3A در فوریه ۲۰۱۶ و سپس دوقلوی آن یعنی Sentinel-3B در آوریل ۲۰۱۸ از طرف آژانس فضایی

اروپا (ESA) به فضا پرتاب شد. اهداف اصلی مأموریت Sentinel-3 را می‌توان اندازه‌گیری دمای سطح دریا و زمین با سنجنده SLSTR، اندازه‌گیری پارامترهای رنگی مناطق خشکی و اقیانوسی با استفاده از سنجنده OLCI، و پایش توپوگرافی سطح دریا با استفاده از یک سنجنده ارتفاع‌سنجی بیان کرد.

سیستم ارتفاع‌سنجی این مأموریت شامل سنجنده‌های ارتفاع‌سنج رادار با روزنه مصنوعی، رادیومتر میکروویو، و مجموعه ابزار تعیین مدار دقیق (POD) است. ارتفاع‌سنج SRAL، ابزاری دوفرکانسه (باند KU و C) بوده که در حالت SAR سطح زمین را برداشت کرده و زمان رفت‌و برگشت پالس ارسال از رادار و منعکس‌شده از سطح را با دقتی بهتر از نانوثانیه (ns) اندازه می‌گیرد. باند C برای برآورد تأخیر تروپوسفری به کار گرفته شده است. این سنجنده اولین ارتفاع‌سنجی است که تمام کره‌زمین را در حالت SAR برداشت می‌کند (یومتست، ۲۰۱۷).

از ویژگی‌های مأموریت فوق می‌توان به میل مداری ۹۸٫۶۵ درجه، مدار خورشید آهنگ، ارتفاع مداری ۸۱۹٫۵ کیلومتر، دوره مداری ۲۷ روز و فاصله ۱۰۴ کیلومتری گذرها در استوا اشاره کرد. در این پژوهش، از داده‌های سطح دو (SR-2-LAN) و همچنین، داده‌های سطح یک (SR-1-SRA) با دسترسی زمانی از نوع NTC متناظر با بازه زمانی مارس ۲۰۱۶ تا نوامبر ۲۰۱۹ استفاده شده است. از روی مخزن سد درودزن نیز گذر ۲۵۳ مأموریت ارتفاع‌سنجی Sentinel-3A رد شده و لذا داده‌های گذر فوق در بازه زمانی فوق داندود شدند. داده‌های مربوط به ابزار SRAL مأموریت Sentinel-3 از آدرس <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> در دسترس عموم قرار دارند.

۳-۲. داده‌های نوسان‌نگار محلی

برای اعتبار‌سنجی و مقایسه تراز سطح آب به‌دست آمده از مأموریت Sentinel-3A، داده‌های تراز سطح آب سد درودزن شیراز فراهم شده توسط شرکت سهامی مدیریت

فاصله ماهواره از سطح قرار می‌دهد، اما باید توجه داشت که شکل موج‌های بازگشتی از آب‌های درون‌سرزمینی مانند دریاچه‌ها، مخازن سدها و رودخانه‌ها به دلیل ردپای بزرگ ماهواره، عمق کم آب، وجود بازپراکنش‌گرهای مختلف در ردپای ماهواره اعم از پوشش گیاهی و یا خشکی‌های کوچک، از شکل موج حالت ایده‌آل فاصله می‌گیرد و دچار اعوجاج و پیچیدگی می‌شود (در شکل ۲، نمونه‌هایی از شکل موج‌های روی سد درودزن نشان داده شده است). در نتیجه، فاصله ارائه شده توسط ارتفاع‌سنج در نواحی فوق صحیح نخواهد بود، لذا بایستی در نواحی آب‌های درون‌سرزمینی با استفاده از الگوریتمی، گیت متناظر با لحظه بازگشت موج از سطح (Retracked Gate) بازیابی شده و با مقایسه نسبت به گیت پیش‌فرض ماهواره (Nominal Gate) تصحیح بازیابی شکل موج‌های بازگشتی محاسبه شود. این تصحیح به‌همراه تصحیحات اتمسفری (یونوسفر، تروپوسفر و تروپوپا) و ژئوفیزیکی (جزر و مد زمین صلب، جزر و مد قطبی و ژئوئید) به فاصله بازیابی نشده اعمال شده و با استفاده از ارتفاع ماهواره به تراز سطح نسبت به سطح مبنا تبدیل خواهد شد (روابط ۱ و ۲).

$$\Delta R_{ret} = (Gate_{ret} - Gate_{nom}) \cdot \tau \cdot \frac{c}{2} \quad (1)$$

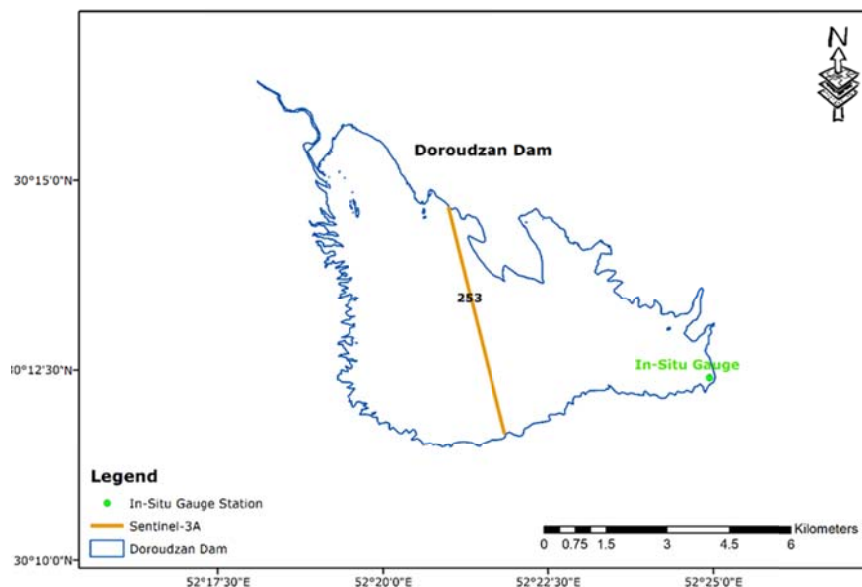
$$h_{corr} = H_{sat} - (\hat{R} + \Delta R_{ret}) + \sum_i \Delta R_i \quad (2)$$

در روابط بالا، ΔR_{ret} تصحیح بازیابی شکل موج بازگشتی در واحد متر، $Gate_{ret}$ شماره گیت بازیابی شده و $Gate_{nom}$ شماره گیت پیش‌فرض ارتفاع‌سنج (که برای مأموریت Sentinel-3 مقدار آن ۴۴ است) بوده و پارامتر τ نیز طول پالس ارسالی (برای مأموریت Sentinel-3 مقدار آن ۳٫۱۲۵ نانوثانیه)، H_{sat} ارتفاع ماهواره نسبت به بیضوی مرجع به‌دست آمده از پارامترهای مداری ماهواره، \hat{R} ارتفاع خام ارتفاع‌سنج (حاصل از گیت پیش‌فرض) و $\sum_i \Delta R_i$ مجموع تصحیحات اتمسفری و ژئوفیزیکی است.

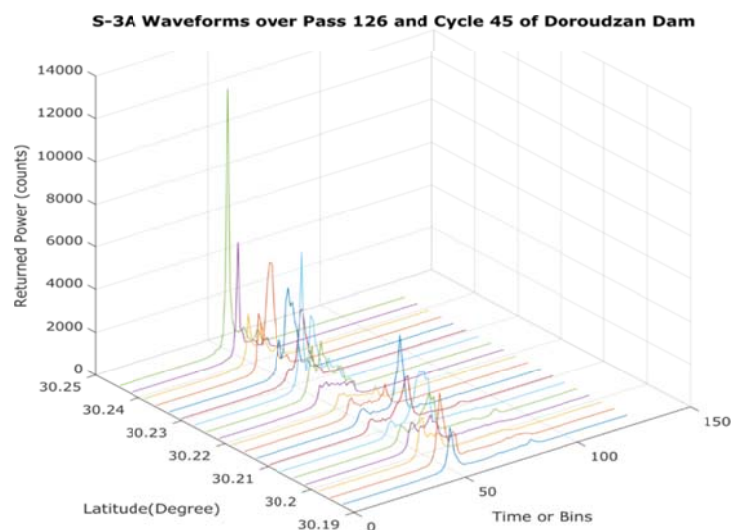
منابع آب ایران (<https://www.wrm.ir/>) استفاده شد. این شرکت در گزارش دوره‌ای وضعیت هیدرولوژیکی و هواشناسی سدهای ایران که شامل اطلاعاتی مثل بارندگی، تبخیر، ورودی، تراز سطح آب، حجم مخزن، مساحت سطح آب مخزن سد و متوسط دما است، مقادیر مربوط به هر پارامتر را به‌صورت روزانه ارائه می‌کند. لذا با توجه به بازه زمانی و تاریخ داده‌های مأموریت Sentinel-3A، داده‌های محلی مربوط به آن تاریخ نیز استخراج شده و برای مقایسه و اعتبارسنجی تراز سطح آب مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱، موقعیت گذر عبوری از سد درودزن را به همراه ایستگاه‌های نوسان‌نگار محلی نشان می‌دهد.

۴. ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در آب‌های درون‌سرزمینی

در ارتفاع‌سنجی رادار ماهواره‌ای، سنسور ارتفاع‌سنج امواج الکترومغناطیس را به سمت سطح در راستای قائم ارسال کرده و با دو تأخیر زمانی، اولی به دلیل تعامل امواج با محیط انتشار و دومی ناشی از تعامل امواج با سطح، توسط رادار دریافت می‌شود. تأخیر زمانی دوم بر اساس طول امواج ارسالی به قسمت‌هایی تحت‌عنوان گیت (Gate) تقسیم‌بندی می‌شود، که در نهایت توان امواج بازگشتی از سطح به‌عنوان تابعی از گیت‌ها شکل موج را حاصل می‌کنند (نیلسن و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین مشاهده پایه در ارتفاع‌سنجی رادار ماهواره‌ای، شکل موج‌های بازگشتی می‌باشد. با توجه به این‌که اساساً ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای برای پایش اقیانوس‌ها و یخچال‌های طبیعی پایه‌گذاری شد، لذا شکل موج‌های اقیانوسی به‌عنوان شکل موج‌های ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. برآون در سال ۱۹۷۷ معادله ریاضی شکل موج فوق را معرفی کرده است، لذا این نوع شکل موج، تحت‌عنوان شکل موج برآون نیز شناخته می‌شود (برآون، ۱۹۷۷). سنسور ارتفاع‌سنج ماهواره زمان بازگشت پالس از سطح را بر اساس شکل موج برآون، نقطه مرکزی، بخش صعودی شکل موج فرض کرده و آن را مبنای محاسبه



شکل ۱. گذر عبوری مأموریت Sentinel-3A و موقعیت ایستگاه نوسان‌نگار محلی روی سد درودزن.



شکل ۲. شکل موج‌های مربوط به گذر ۱۲۶ و دوره ۴۵ مأموریت Sentinel-3A روی سد درودزن.

۲۰٪ و ۵۰٪ حداکثر دامنه به‌عنوان آستانه انتخاب می‌شوند. از این‌رو، آستانه ۱۰٪ بیان‌گر بالاترین تکرارپذیری و آستانه ۲۰٪ نیز مفید برای بازپراکنش حجم و سطح اندازه‌گیری صفحات یخی می‌باشند. آستانه ۵۰٪ فقط در صورت وجود بازپراکنش سطح غالب در شکل موج، توصیه شده است (دیویس، ۱۹۹۷). برای پیدا کردن گیت بازیابی، یک درون‌یابی خطی بین گیت‌های مجاور در موقعیتی که مقدار آستانه از بخش صعودی شکل موج

۵. الگوریتم بازیابنده حدآستانه

بازیابنده حدآستانه در سال ۱۹۹۷ با هدف اصلی برای اندازه‌گیری ارتفاعات صفحات یخی توسعه داده شد (دیویس، ۱۹۹۷). مزایای اصلی این الگوریتم پیاده‌سازی نرم (Smooth) و نشان دادن نتایج خوب مرتبط با تکرارپذیری می‌باشد (دیویس، ۱۹۹۵). در این حالت، تکرارپذیری ثابت بازیابنده را در انتخاب نقطه بازیابی توصیف می‌کند (دیویس، ۱۹۹۷). به‌همین ترتیب، ۱۰٪،

۱- داده‌های ارتفاع‌سنجی مأموریت Sentinel-3A با استفاده از پلی‌گون مرز سد درودزن، استخراج شد.
 ۲- با پردازش داده‌های سطح دو (SR-2-LAN)، تصحیحات اتمسفری و ژئوفیزیکی به فاصله حاصل از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو اعمال شده و سری زمانی تراز سطح آب برای هر گذر در هر دوره تشکیل شد.

۳- همان‌طور که گفته شد، شکل موج‌های بازگشتی روی آب‌های درون‌سرزمینی، مغشوش بوده و لذا تراز سطح آب ارائه شده در داده‌های سطح دو ممکن است از دقت پایینی برخوردار باشند. از این‌رو، با استفاده از الگوریتم بازیابی حدآستانه شکل موج‌های موجود در داده‌های سطح یک مأموریت Sentinel-3A بازیابی شدند. حال بایستی الگوریتم حدآستانه به کار گرفته شده برای بازیابی شکل موج‌های بازگشتی به سوال زیر به درستی پاسخ دهد:

- آیا الگوریتم حدآستانه به درستی بخش صعودی شکل موج‌ها را شناسایی می‌کند؟

در پاسخ به این سوال باید گفت که به دلیل تعداد زیاد شکل موج‌های بازگشتی در گذر منطقه مطالعاتی، امکان بررسی تمامی شکل موج‌ها وجود ندارد. از این‌رو نمونه‌هایی از شکل موج‌های منطقه مطالعاتی ارزیابی می‌شود. در ارزیابی صورت گرفته برای نمونه‌هایی از شکل موج‌های منطقه مطالعاتی، توانایی الگوریتم حدآستانه در شناسایی بخش صعودی شکل موج تأیید شد. در زیر نمونه‌هایی از بخش صعودی شکل موج شناسایی شده با استفاده از الگوریتم حدآستانه برای منطقه مطالعاتی نشان داده شده است.

در شکل ۴ نیز، نمونه‌ای از شکل موج بازیابی شده در درودزن بر اساس الگوریتم حدآستانه به ازای آستانه‌های ۱۰ تا ۹۰ درصد نشان داده شده است.

عبور می‌کند، انجام می‌شود. روابط زیر برای این بازیابنده استفاده می‌شود.

نویز حرارتی (P_N) با میانگین‌گیری از پنج گیت اول به دست می‌آید:

$$P_N = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 P_i \quad (3)$$

پس از آن، دامنه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

که N تعداد کل گیت‌های شکل موج و $n_2 = n_1 + 4$ گیت‌هایی هستند که از ابتدا و انتهای نمونه‌های شکل موج برای جلوگیری از خطای تداخل سیگنال (Aliasing) حذف می‌شوند. سطح حدآستانه نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Th = P_N + q(A - P_N) \quad (5)$$

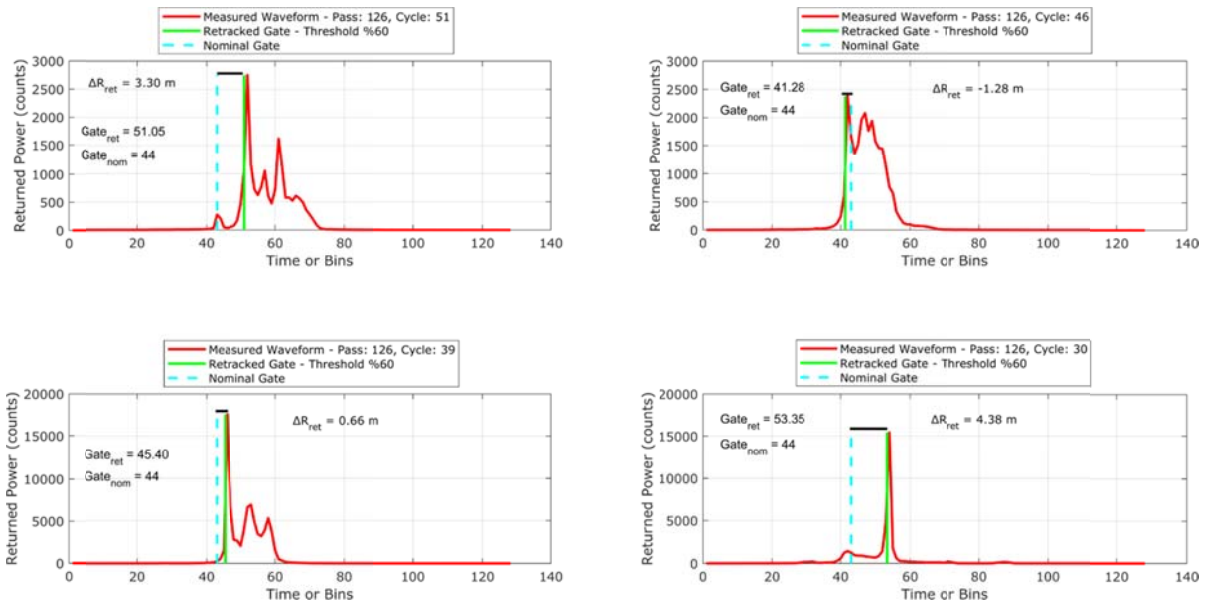
که در آن A از معادله ۴ محاسبه شده و q مقدار آستانه (به عنوان مثال، ۰٫۲ معادل ۲۰٪) است. سپس، محل بخش صعودی شکل موج $Gate_{ret}$ را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$Gate_{ret} = (k-1) + \frac{Th - P_{k-1}}{P_k - P_{k-1}} \quad (6)$$

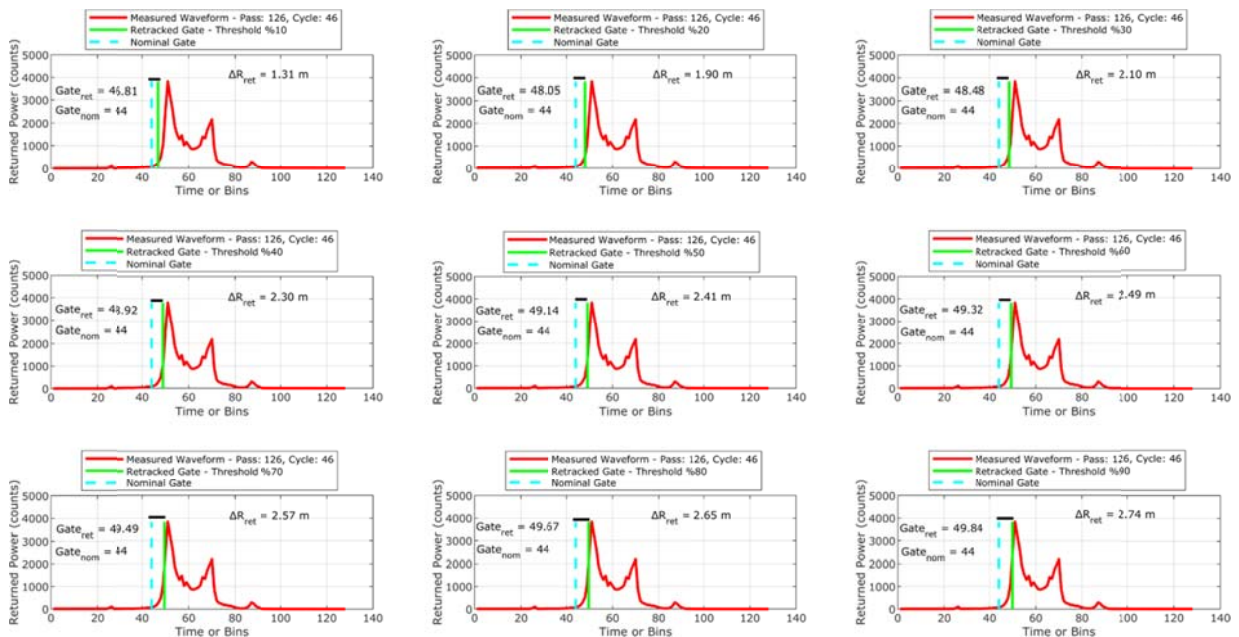
که در آن k اولین گیتی است که توان آن از آستانه Th تجاوز می‌کند.

۶. روش تحقیق

برای پردازش داده‌های ارتفاع‌سنجی سطح دو مأموریت Sentinel-3A و همچنین بازیابی شکل موج‌های بازگشتی در داده‌های سطح یک، گام‌های پردازشی زیر صورت گرفت:



شکل ۳. بخش‌های صعودی شکل موج شناسایی شده در شکل موج‌های دوره‌های ۳۰، ۳۹، ۴۶ و ۵۶ از گذر ۱۲۶ سد درودزن.



شکل ۴. بازیابی شکل موجی از گذر ۱۲۶ و دوره ۴۶ سد درودزن با استفاده از الگوریتم حدآستانه به ازای آستانه‌های مختلف.

بازیابی نشده ارتفاع سنج (Tracker Range)، تراز سطح آب برای هر کدام از بخش‌های صعودی شکل موج محاسبه شده و سری زمانی تراز سطح آب تشکیل شد. ۵- با توجه به وجود مشاهدات پرت در سری زمانی سد درودزن با اعمال شرطی که تراز سطح آب برآورد شده بین حداقل و حداکثر مقدار نوسان‌نگارهای محلی باشد، مشاهدات پرت از سری زمانی تراز سطح آب

۴- پس از پردازش داده‌های SR-1-SRA مأموریت Sentinel-3، بخش‌های صعودی شکل موج در هر شکل موج اصلی شناسایی شده و با الگوریتم حدآستانه به ازای آستانه‌های مختلف بازیابی شدند. سپس، تصحیح بازیابی برای هر کدام محاسبه شد (در شکل‌های ۳ و ۴، ΔR_{ret} نشان‌دهنده تصحیح بازیابی می‌باشد). با اعمال تصحیحات اتمسفری و ژئوفیزیکی به‌همراه تصحیح بازیابی به فاصله

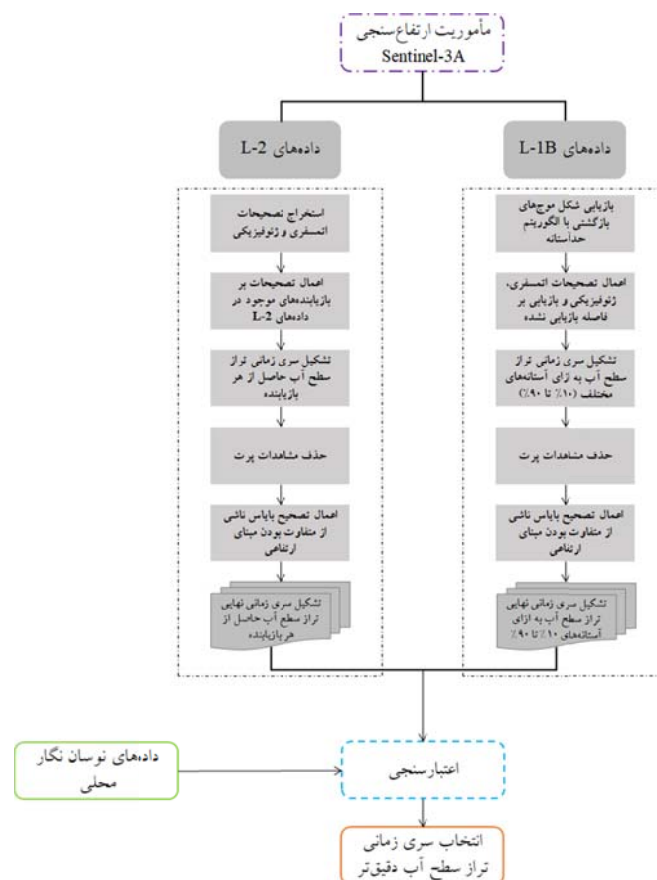
بازیابنده‌ای در داده‌های سطح دو با مقدار کمترین RMSE نسبت به سایر بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو در مقایسه با داده‌های نوسان‌نگار محلی به‌عنوان بازیابنده سطح دو بهینه در نظر گرفته شد. سپس، تراز سطح آب به‌دست آمده از بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با استفاده از الگوریتم حد‌آستانه به ازای آستانه‌های ۱۰٪ تا ۹۰٪ نیز با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه شدند که آستانه‌ای با کمترین مقدار RMSE نسبت به آستانه‌های دیگر به‌عنوان آستانه بهینه انتخاب شد. پس از آن، سری زمانی تراز سطح آب به‌دست آمده از بازیابی سطح دو بهینه و حد‌آستانه بهینه با استفاده از پارامترهای آماری RMSE، وابستگی با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه و اعتبارسنجی شده و تراز سطح آب نهایی انتخاب شد. شکل ۵، روش کلی استفاده شده در این مطالعه برای برآورد تراز سطح آب را نشان می‌دهد.

محاسبه‌شده، حذف شدند.

۶- مقادیر میانگین و میانه سری زمانی تراز سطح آب با یکدیگر مقایسه شد که مشاهده شد میانه در برآورد سری زمانی تراز سطح آب عملکرد بهتری دارد، لذا مقدار میانه سری زمانی تراز سطح آب برای تمام دوره‌های گذر سد درودزن کنار هم قرار داده شده و سری زمانی تراز سطح آب هر منطقه مطالعاتی حاصل گشت.

۷- بایاس ارتفاعی ناشی از متفاوت بودن مبنای ارتفاعی داده‌های نوسان‌نگار محلی و تراز سطح آب به‌دست آمده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای با استفاده از میانگین‌گیری از دو سری زمانی تراز سطح آب، جبران شد.

۸- درنهایت، ابتدا تراز سطح آب به‌دست آمده از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو شامل Ocean، OCOG، Sea Ice، Ice Sheet و همچنین فاصله بازیابی نشده، با داده‌های نوسان‌نگار محلی با یکدیگر با استفاده از پارامترهای آماری RMSE، وابستگی مقایسه شدند.



شکل ۵. فلوجارت روش تحقیق استفاده شده برای برآورد تراز سطح آب با استفاده از مأموریت Sentinel-3A.

۷. نتایج

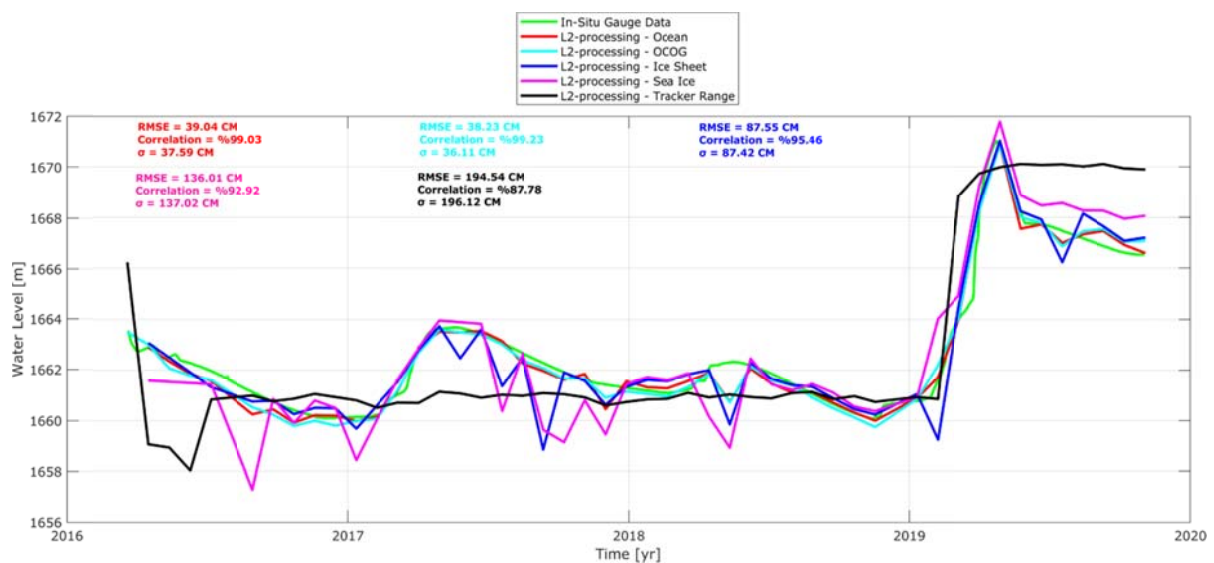
با تجزیه و تحلیل داده‌های سطح دو و سطح یک ارتفاع‌سنجی SAR مأموریت Sentinel-3A که در شکل‌های این بخش نشان داده شده است، تغییرات تراز سطح آب سد درودزن حاصل شد. برای این منظور، پس از جبران بایاس ناشی از اختلاف مبنای ارتفاعی و حذف مشاهدات پرت ابتدا، سری زمانی تراز سطح آب حاصل از الگوریتم‌های بازایی موجود در داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی با برنامه‌نویسی در محیط زبان MATLAB مقایسه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

جدول ۱. ارزیابی سری زمانی تراز سطح آب حاصل از پردازش داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی سد درودزن.

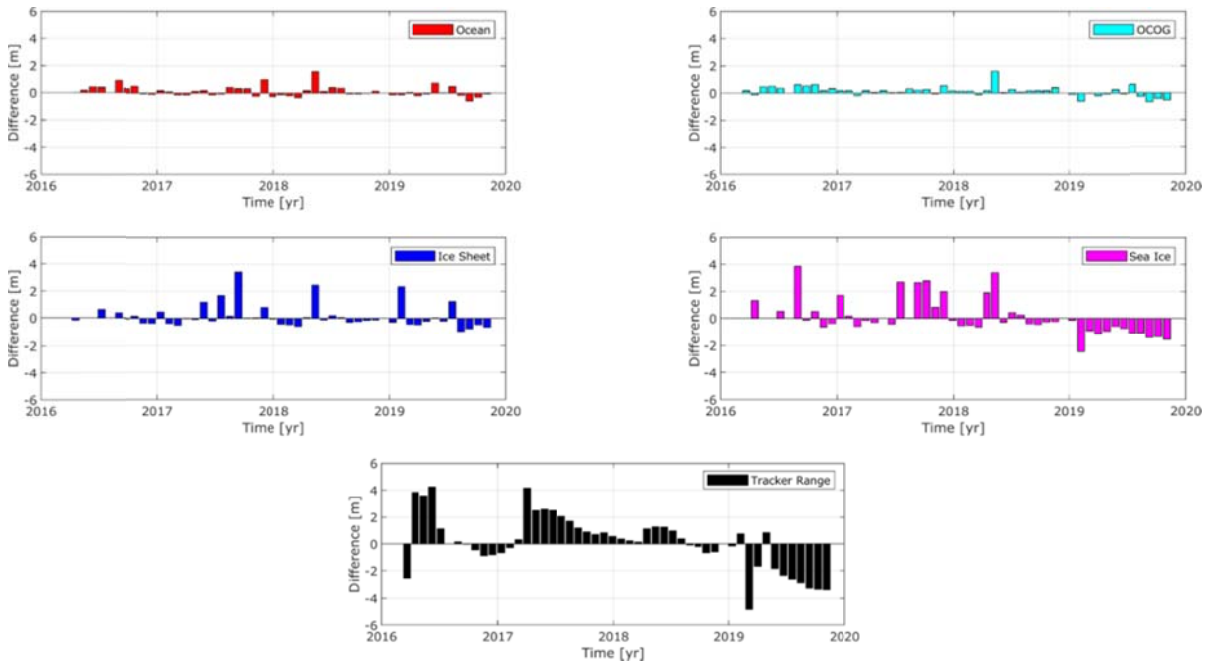
| وابستگی (%) | RMSE (سانتی‌متر) | داده‌های سطح دو |
|-------------|------------------|-----------------|
| ۸۷/۷۸ | ۱۹۴/۵۴ | Tracker |
| ۹۹/۰۴ | ۳۹/۰۴ | Ocean |
| ۹۹/۲۳ | ۳۸/۲۳ | OCOG |
| ۹۵/۴۶ | ۸۷/۵۵ | Ice Sheet |
| ۹۲/۹۲ | ۱۳۶/۰۱ | Sea Ice |

در جدول بالا، Tracker فاصله بازایی نشده ارتفاع‌سنج،

Ocean بازاینده اقیانوسی، OCOG روش بازایی مرکز ثقل، Ice Sheet روش بازایی در محیط صفحات یخی و Sea Ice روش بازایی در محیط یخی-دریایی موجود در داده‌های سطح دو می‌باشند که نتایج آن نشان می‌دهد الگوریتم بازایی OCOG نسبت به سایر بازاینده‌های موجود در داده‌های سطح دو نتیجه نزدیک‌تری را در مقایسه با سری زمانی داده‌های نوسان‌نگار محلی ارائه کرده است. همچنین بازاینده Ocean نیز نتیجه‌ای نزدیک به بازاینده OCOG را به دست داده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب این دو بازاینده در بازایی تراز سطح آب است. شکل ۶، سری زمانی تراز سطح آب حاصل از بازاینده‌های موجود در داده‌های سطح دو و نشان داده و شکل‌های ۷ و ۸ نیز به ترتیب اختلاف و وابستگی ترازهای سطح آب حاصل از بازاینده‌های موجود در داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی را نشان می‌دهد. ضریب وابستگی مقادیری بین -۱ تا +۱ را اختیار می‌کند که هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، وابستگی مستقیم‌تری میان دو سری داده را معرفی خواهد کرد. از طرفی علامت این پارامتر، میزان ارتباط (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد.



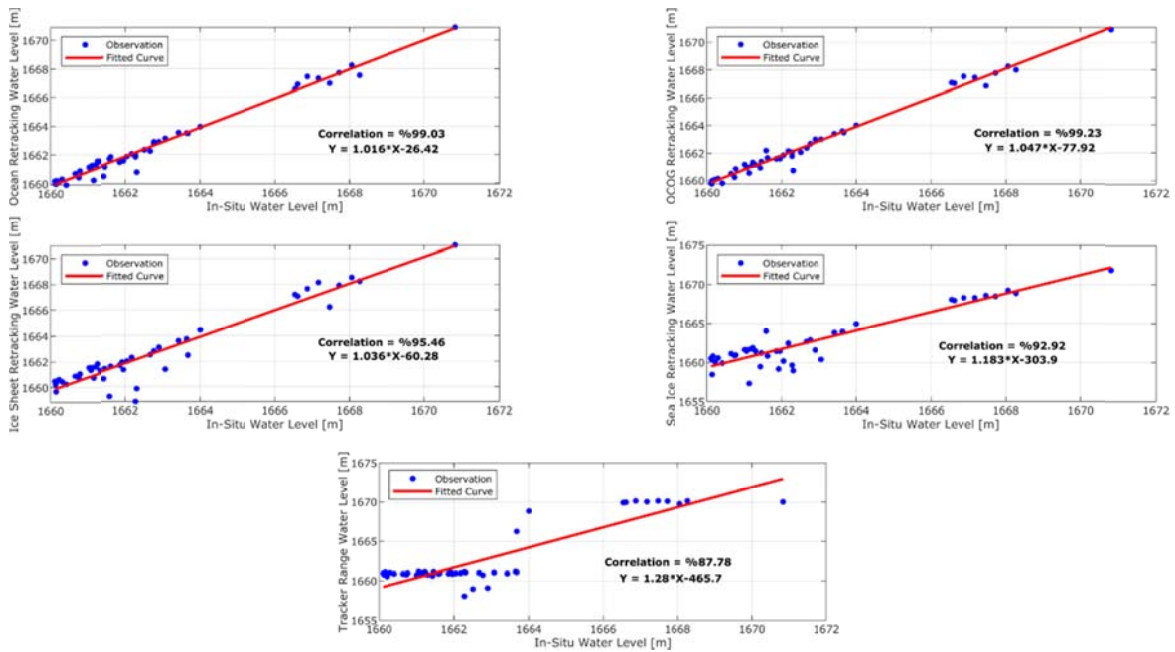
شکل ۶. سری زمانی تراز سطح آب حاصل از بازاینده‌های موجود در داده‌های سطح دو.



شکل ۷. اختلاف ترازهای سطح آب حاصل از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی.

آب به‌دست آمده از این دو بازیابنده از داده‌های نوسان‌نگار محلی به صورت کلی در اکثر مشاهدات صورت گرفته نسبت به دو بازیابنده Ice Sheet و Sea Ice کمتر است.

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که در برخی از مشاهدات بازیابنده Ocean و در برخی نیز بازیابنده OCOG نتیجه نزدیک‌تری را نسبت به داده‌های نوسان‌نگار محلی ارائه کرده است. همچنین اختلاف تراز سطح



شکل ۸. وابستگی ترازهای سطح آب به‌دست آمده از داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی.

است. در شکل ۹، سری‌های زمانی تراز سطح آب به‌دست آمده به‌ازای حدآستانه‌های مختلف نشان داده شده است.

از این‌رو، سری زمانی تراز سطح آب به‌دست آمده از حدآستانه ۶۰٪ انتخاب شده و مشاهدات پرت از آن حذف شد. پس از آن، سری‌های زمانی تراز سطح آب بهینه سد درودزن حاصل از پردازش داده‌های سطح دو و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه را کنار یکدیگر قرار داده و نتایج آنها با داده‌های نوسان‌نگار محلی از طریق پارامترهای RMSE، ضریب وابستگی مقایسه شد.

جدول ۳. ارزیابی سری‌های زمانی نهایی تراز سطح آب سد درودزن حاصل از بازیابنده سطح دو بهینه و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه با آستانه بهینه.

| وابستگی (%) | RMSE (سانتی‌متر) | روش |
|-------------|------------------|-------------------------------|
| ۹۹/۲۳ | ۳۸/۲۳ | بازیابنده بهینه سطح دو (OCOG) |
| ۹۹/۳۰ | ۳۷/۷۳ | آستانه بهینه (۶۰٪) |

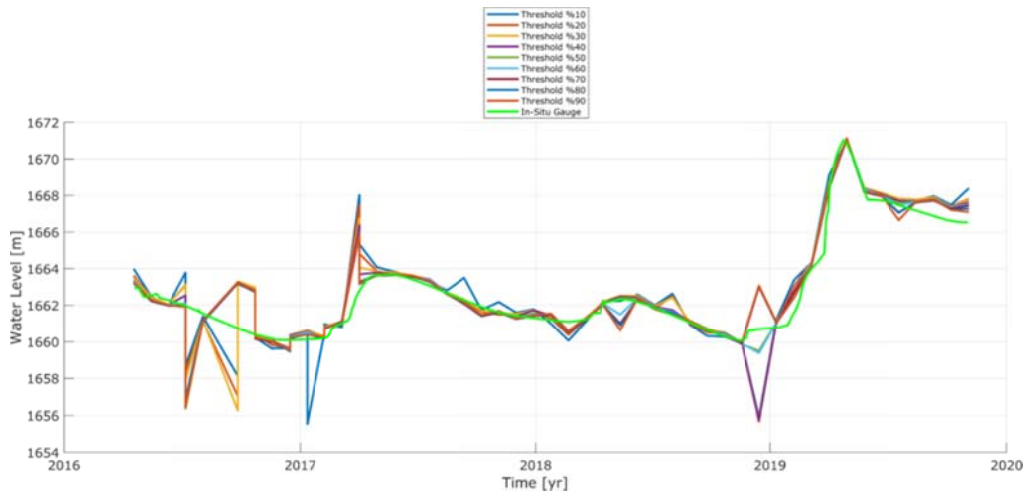
نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد، بازیابی شکل موج‌های بازگشتی داده‌های سطح یک سد درودزن با الگوریتم حدآستانه با آستانه ۶۰٪ سبب بهبود ۱/۳٪ دقت و افزایش ۰/۰۷٪ وابستگی با داده‌های نوسان‌نگار محلی نسبت به سری زمانی تراز سطح آب حاصل از بازیابنده بهینه سطح دو شده است. بنابراین، دو رویکرد فوق در برآورد سری زمانی تراز سطح آب تقریباً عملکرد یکسانی داشته‌اند. شکل ۱۰، سری‌های زمانی نهایی تراز سطح آب برای سد درودزن را نشان می‌دهد.

شکل ۸ نیز وابستگی بالای بازیابنده‌های Ocean و OCOG را با داده‌های نوسان‌نگار محلی تأیید می‌کند. پس از به‌دست آوردن سری زمانی تراز سطح آب از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو، همان‌طور که در بخش قبل شرح داده شد، با استفاده از الگوریتم بازیابی حدآستانه شکل موج‌های بازگشتی از داده‌های سطح یک ابتدا بازیابی شده و سپس سری زمانی تراز سطح آب به‌ازای آستانه‌های مختلف حاصل شده و با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه شد که نتایج آن به شرح زیر است:

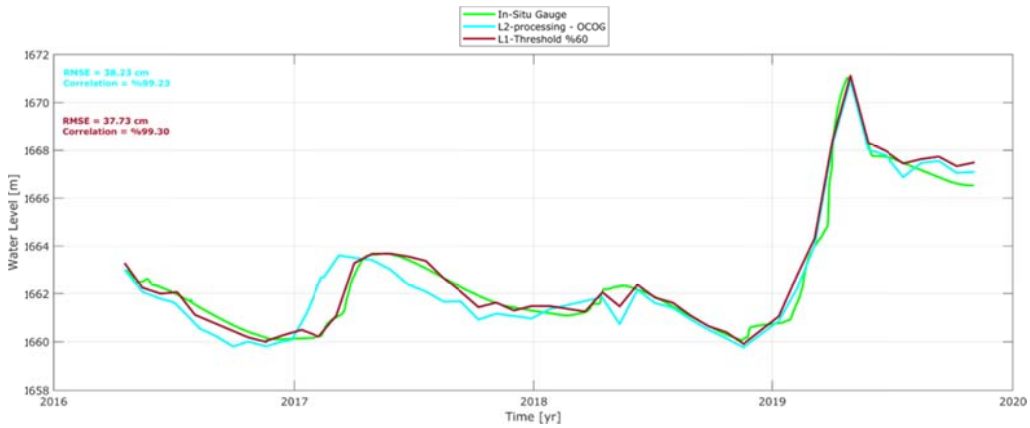
جدول ۲. ارزیابی سری زمانی خام تراز سطح آب حاصل از حدآستانه‌های مختلف با داده‌های نوسان‌نگار محلی.

| وابستگی (%) | RMSE (سانتی‌متر) | حد آستانه (%) |
|-------------|------------------|---------------|
| ۸۹/۱۴ | ۱۵۲/۱۷ | ۱۰ |
| ۹۰/۱۷ | ۱۳۶/۶۱ | ۲۰ |
| ۹۰/۱۵ | ۱۳۶/۴۱ | ۳۰ |
| ۹۱/۱۴ | ۱۲۵/۰۱ | ۴۰ |
| ۹۲/۹۹ | ۱۰۷/۱۷ | ۵۰ |
| ۹۳/۴۶ | ۱۰۳/۲۱ | ۶۰ |
| ۹۲/۶۵ | ۱۰۶/۷۲ | ۷۰ |
| ۹۲/۷۴ | ۱۰۵/۷۹ | ۸۰ |
| ۹۱/۹۸ | ۱۱۱/۰۰ | ۹۰ |

از نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که سری زمانی تراز سطح آب محاسبه شده با حدآستانه ۶۰٪ نتیجه‌ای بهتر از حدآستانه‌های دیگر و نتیجه‌ای نزدیک به داده‌های نوسان‌نگار محلی ارائه داده

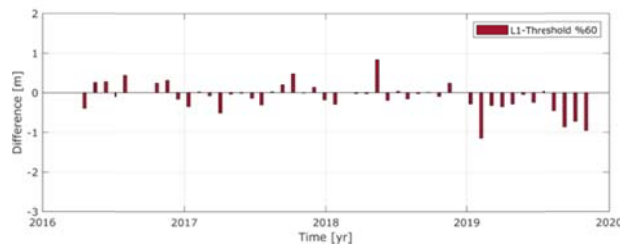
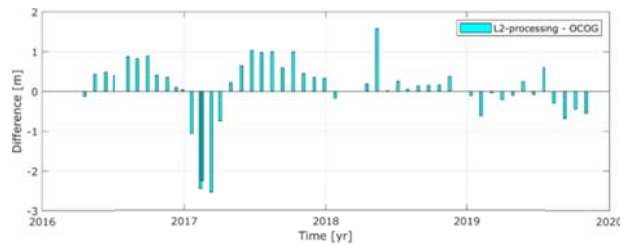


شکل ۹. سری‌های زمانی تراز سطح آب به‌دست آمده سد درودزن به‌ازای حد‌آستانه‌های مختلف.



شکل ۱۰. سری‌های زمانی نهایی تراز سطح آب سد درودزن حاصل از بازیابنده بهینه سطح دو و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حد‌آستانه با آستانه بهینه.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز اختلاف و وابستگی سری زمانی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حد‌آستانه با آستانه بهینه را نشان می‌دهد. تراز سطح آب حاصل از بازیابنده بهینه سطح دو و بازیابی



شکل ۱۱. اختلاف سری‌های زمانی تراز سطح آب سد درودزن حاصل از بازیابنده بهینه سطح دو و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حد‌آستانه بهینه.

جدول ۴. بیشترین افزایش، کاهش و میانگین تغییرات تراز سطح آب سد درودزن حاصل از سری زمانی تراز سطح آب حدآستانه ۶۰٪.

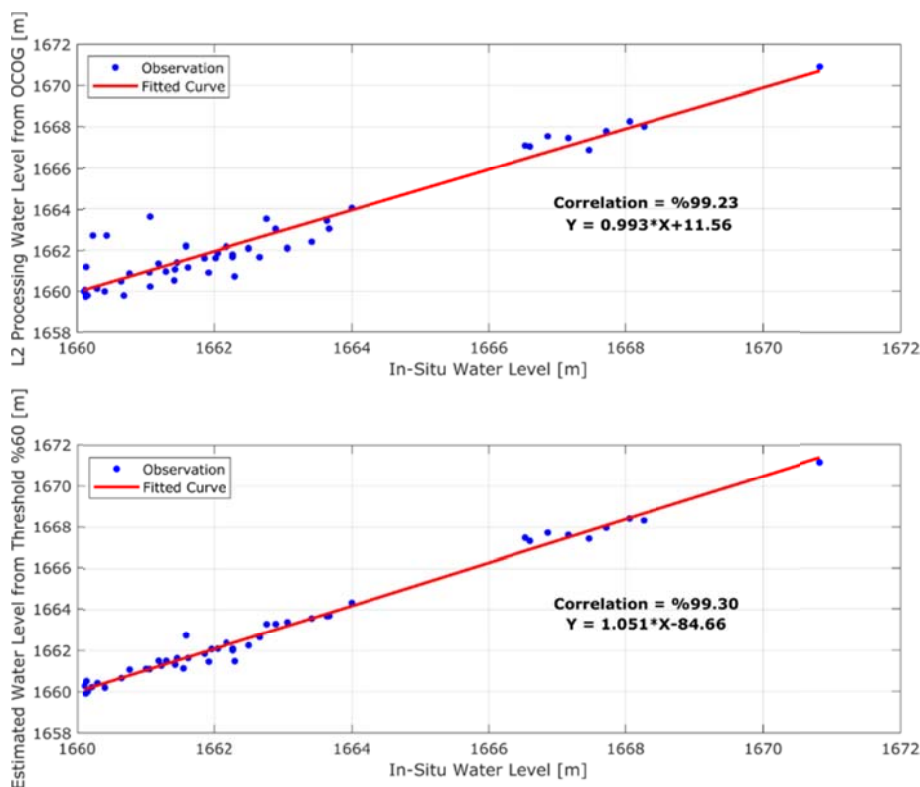
| تغییرات تراز سطح آب (متر) | پارامتر |
|---------------------------|-----------------|
| ۰٫۰۹ | میانگین تغییرات |
| ۴٫۰۹ | بیشترین افزایش |
| -۲٫۸۰ | بیشترین کاهش |

بیشترین افزایش تراز سطح آب با مقدار ۴٫۰۹ متر از ۶ مارس تا ۲ آوریل ۲۰۱۹ (انتهای بازه مطالعاتی) که به طور معمول ماه‌های پربارشی هستند، اتفاق افتاده است. از طرفی بیشترین کاهش تراز سطح آب با مقدار ۲٫۸۰ متر از ۲۹ آوریل ۲۰۱۹ تا ۲۶ مه ۲۰۱۹ (انتهای بازه مطالعاتی) که معمولاً ماه‌های کم‌بارشی هستند، اتفاق افتاده است. همچنین نتایج جدول ۴، افزایش ناچیز تراز سطح آب سد درودزن را نشان می‌دهد.

از شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که به خصوص در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ اختلاف ترازهای سطح آب حاصل از بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه با آستانه بهینه (۶۰٪) با داده‌های نوسان‌نگار محلی کمتر از بازیابنده بهینه سطح دو (OCO2) است.

از شکل (۱۲) نیز می‌توان وابستگی نسبتاً بهتر تراز سطح آب به دست آمده از بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه با آستانه بهینه را با داده‌های نوسان‌نگار محلی نسبت به تراز سطح آب حاصل از بازیابنده سطح دو بهینه نتیجه گرفت.

نتایج بیشترین افزایش، بیشترین کاهش و میانگین تغییرات تراز سطح آب سد درودزن، به صورت زیر به دست آمد:



شکل ۱۲. وابستگی ترازهای سطح آب سد درودزن حاصل از بازیابنده سطح دو بهینه و بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه با آستانه بهینه با داده‌های نوسان‌نگار محلی.

۸. بحث و نتیجه‌گیری

نشان داد به‌خصوص در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ اختلاف ترازهای سطح آب حاصل از بازیابی شکل موج‌های بازگشتی با الگوریتم حدآستانه با آستانه بهینه (۶۰٪) با داده‌های نوسان‌نگار محلی کمتر از بازیابنده بهینه سطح دو (OCOG) می‌باشد. از طرفی، بیشترین افزایش، کاهش و میانگین تراز سطح آب سد درودزن حاصل از حدآستانه ۶۰٪ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج نشان داد، بیشترین افزایش تراز سطح آب با مقدار ۴٫۰۹ متر از ۶ مارس تا ۲ آوریل ۲۰۱۹ که به‌طور معمول ماه‌های پربارشی هستند، اتفاق افتاده است. از طرفی بیشترین کاهش تراز سطح آب با مقدار ۲٫۸۰ متر از ۲۹ آوریل ۲۰۱۹ تا ۲۶ مه ۲۰۱۹ که معمولاً ماه‌های کم‌بارشی هستند، اتفاق افتاده است. همچنین نتایج به‌دست آمده افزایش ناچیز تراز سطح آب سد درودزن را نشان داد. باتوجه به شکل سخت، پیچیده و توپوگرافی سد درودزن و شکل موج‌های آلوده آن، از این‌رو، در منطقه مطالعاتی فوق نمی‌توان هم از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو و هم نتایج حاصل از بازیابی انتظار دقت بالایی را داشت. لذا نزدیک بودن نتایج RMSE و وابستگی به شکل و توپوگرافی مخزن سد درودزن برمی‌گردد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران برای در اختیار گذاشتن داده‌های نوسان‌نگار محلی، جهت اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

Biancamaria, S., Frappart, F., Leleu, A.-S., Marieu, V., Blumstein, D., Desjonquères, J.-D., Boy, F., Sottolichio, A. and Valle-Levinson, A., 2017, Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200 m wide river: Evaluation over the Garonne River. *Adv. Space Res.*, 59 (1), 128-146.
Birkett, C. M., 1995, The contribution of

در آب‌های درون‌سرزمینی، شکل موج‌های بازگشتی در نواحی آب‌های درون‌سرزمینی از حالت ایده‌آل اقیانوسی فاصله گرفته و مغشوش می‌شوند، لذا بازیابی شکل موج‌ها در نواحی فوق برای دستیابی به زمان صحیح بازگشت امواج ارتفاع‌سنج رادار از سطح امری مهم است. در این پژوهش ابتدا سری زمانی تراز سطح آب از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو با پردازش داده‌های سطح دو مأموریت ارتفاع‌سنجی Sentinel-3A روی سد درودزن شیراز به‌دست آمد. پس‌از آن، سری‌های زمانی تراز سطح آب حاصل از بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه شده و بازیابنده بهینه سطح دو مشخص شد. نتایج نشان داد بازیابنده OCOG موجود در داده‌های سطح دو با مقدار $RMSE_{38/23}$ سانتی‌متر و همچنین وابستگی ۹۹٫۲۳٪ با داده‌های نوسان‌نگار محلی نسبت به دیگر بازیابنده‌های موجود در داده‌های سطح دو از دقت بالاتری در برآورد سری زمانی تراز سطح آب سد درودزن دارد. پس‌از به‌دست آوردن سری زمانی تراز سطح آب از بازیابنده‌های موجود و انتخاب بازیابنده بهینه سطح دو، شکل موج‌های بازگشتی از داده‌های سطح یک با استفاده از الگوریتم بازیابی حدآستانه ابتدا بازیابی شده و سپس سری زمانی تراز سطح آب به‌ازای حدآستانه‌های مختلف حاصل شده و با داده‌های نوسان‌نگار محلی مقایسه شد که نتایج نشان داد آستانه ۶۰٪ با مقدار $RMSE_{37/73}$ سانتی‌متر و همچنین وابستگی ۹۹٫۳۰٪ سبب بهبود ۱۳٪ دقت و افزایش ۰٫۰۷٪ وابستگی با داده‌های نوسان‌نگار محلی نسبت به سری زمانی تراز سطح آب حاصل از بازیابنده بهینه سطح دو شده است. همچنین، نتایج

Topex/Poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *J. Geophys. Res.* 100 (C12), 25179-25204.
Birkinshaw, S. J., O'Donnell, G. M., Moore, P., Kilsby, C. G., Fowler, H. J. and Berry, P. A. M., 2010, Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River. *Hydrol. Process* 24,

- 3811_3825.
- Brooks, R. L., 1982, Lake Elevation from Satellite Radar Altimetry from a Validation Area in Canada. Report. Geoscience Research Corporation, Salibury, MD.
- Brown, G., 1977, The average impulse response of a rough surface and its applications. IEEE transactions on antennas and propagation, 25(1), 67-74.
- Calmant, S., Seyler, F. and Cretaux, J. F., 2008, Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. *Surv. Geophys.* 29, 247_269.
- Cazenave, A., Bonnefond, P. and DoMinh, K., 1997, Caspian Sea level from Topex/Poseidon altimetry: level now falling. *Geophys. Res. Lett.* 24, 881_884.
- Davis, C. H., 1995, Growth of the Greenland ice sheet: A performance assessment of altimeter retracking algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(5), 1108-1116.
- Davis, C. H., 1997, A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(4), 974-979.
- Domenghetti, A., Tarpanelli, A., Brocca, L., Barbetta, S., Moramarco, T., Castellarin, A. and Brath, A., 2014, The use of remote sensing-derived water surface data for hydraulic model calibration. *Remote Sens. Environ.* 149, 130_141.
- EUMETSAT, 2017, Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook, EUMETSAT.
- Frappart, F., Calmant, S., Cauhope, M., Seyler, F. and Cazenave, A., 2006, Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sens. Environ.* 100, 252_264.
- Ganguly, D., Chander, S., Desai, S. and Chauhan, P., 2015., A subwaveform-based retracker for multiplex waveforms: a case study over Ukai dam/reservoir. *Marine Geodesy* 38(sup1), 581-596.
- Guo, J., Gao, Y., Hwang, C. and Sun, J., 2010, A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans. *Science China Earth Sciences* 53(4), 610-616.
- Jain, M., Andersen, O. B., Dall, J. and Stenseng, L., 2015, Sea surface height determination in the Arctic using Cryosat-2 SAR data from primary peak empirical retrackers. *Advances in Space Research* 55(1), 40-50.
- Jinyum, G., Cheiway, H., Xiaotao, C. and Yuting L., 2006, Improved threshold retracker for satellite altimeter waveform retracking over coastal sea. *Progress in Natural Science* 16(7), 732-738.
- Koblinsky, C. J., Clarke, R. T., Brenner, A. C. and Frey, H., 1993, Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resour. Res.* 29 (6), 1839_1848.
- Kouraev, A.V., Zakharova, E. A., Samain, O., Mognard, N.M. and Cazenave, A., 2004. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992_2002). *Remote Sens. Environ.* 93, 238_245.
- Leon, J.G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M.-P., Cauhopé, M., Frappart, F., Filizola, N. and Fraizy, P., 2006, Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. *J. Hydrol.* 328, 481_496.
- Martin, T. V., Zwally, H. J., Brenner A. C. and Bindshadler, R. A., 1983, Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 88(C3), 1608-1616.
- Mercier, F., Cazenave, A. and Maheu, C., 2002, Interannual lake level fluctuations (1993_1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean_atmosphere interactions over the Indian ocean. *Glob. Planet. Change* 32, 141_163.
- Morris, C. S. and Gill, S. K., 1994, Variation of Great Lakes waters from geosat altimetry. *Water Resour. Res.* 30, 1009_1017.
- Nielsen, K., Stenseng, L., Andersen, O.B. and Knudsen, P., 2017, The Performance and Potentials of the CryoSat-2 SAR and SARIn Modes for Lake Level Estimation. *Water*, 2017. 9(6), 374.
- Roohi, S., 2017, Performance evaluation of different satellite radar altimetry missions for monitoring inland water bodies, in Institute of Geodesy. University of Stuttgart. p. 141.
- Santos da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G. and Mansur, W.J., 2010. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sens. Environ.* 114, 2160_2181.
- Schneider, R., Tarpanelli, A., Nielsen, C., Madsen, H. and Bauer-Gottwein, P., 2018, Evaluation of multi-mode Cryosat-2 altimetry data over the Po River against in situ data and a hydrodynamic model. *Adv. Water Resour.* 112, 17_26.
- Sulistioadi, Y. B., Tseng, K.-H., Shum, C. K., Hidayat, H., Sumaryono, M., Suhardiman, A., Setiawan, F. and Sunarso, S., 2015, Satellite radar altimetry for monitoring small rivers and lakes in Indonesia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19(1), 341_359.
- Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L. and

- Moramarco, T., 2013, River discharge estimation by using altimetry data and simplified flood routing modeling. *Remote Sens.* 5 (9), 4145_4162.
- Tarpanelli, A., Benveniste, J., 2019, Chapter Eleven - On the potential of altimetry and optical sensors for monitoring and forecasting river discharge and extreme flood events, Editor(s): Viviana Maggioni, Christian Massari, *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment*, Elsevier, P. 267-287, ISBN 9780128148990.
- Tayfehrostami, A., Azmoudeh Ardalan, A. R., Roohi, S. and Pourmina, A. H., 2021, Dams Surface Area Monitoring from VV and VH Polarization of Sentinel-1 Mission SAR Images (Case study: Doroudzan Dam, Shiraz, Iran). *JGST.*, 10(4), 103-116.
- Wingham, D., Rapley, C. and Griffiths, H., 1986, New techniques in satellite altimeter tracking systems. *Proceedings of IGARSS*.
- Yang, Y., C. Hwang, H.-J. Hsu, E. Dongchen and H. Wang, 2012, A subwaveform threshold retracker for ERS-1 altimetry: A case study in the Antarctic Ocean. *Computers & Geosciences* 41, 88-98.
- Yuan, C., Gong, P., Zhang, H., Guo, H. and Pan, B., 2017, Monitoring water level changes from retracked Jason-2 altimetry data: a case study in the Yangtze River, China. *Remote Sensing Letters* 8(5), 399-408.

Retracking Sentinel-3A SAR waveforms to monitor the water level of a small inland water body (Case study: Doroudzan Dam Reservoir, Shiraz, Iran)

Tayfeh Rostami, A.^{1*}, Azmoudeh Ardalani, A. R.², Roohi, Sh.³ and Pourmina, A. H.⁴

1. M.Sc. Student, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Geodesy, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. Ph.D. Student, Department of Geodesy, College of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 26 April 2021, Accepted: 25 May 2021)

Summary

In inland water bodies, the water level obtained from the Level-2 data of the altimetry missions is not often correct. Therefore, to correct the water level measured in these areas, it is necessary to retrack the return waveforms. In this study, data from level-2 and level-1 SRAL altimeter of Sentinel-3A mission, measured in SAR mode, in the period from March 2016 to November 2019 to monitor the water level of Doroudzan Dam, has been used. The threshold retracking algorithm with different thresholds has also been used to retrack the waveforms in the level one data. The results showed that the OCOG retracker in L-2 data with an RMSE value of 38.23 cm and a correlation of 99.23% with in situ gauge data compared to other retrackers in L-2 data from Doroudzan dam has higher accuracy in estimating the time series of the water level. The Ocean retracker also has results close to those of the OCOG retracker, indicating that these two retrackers perform well in restoring water levels. After obtaining the water level time series from the retrackers in the L-2 data and selecting the optimal level two retracker, the return waveforms from the L-1 data were first retracked using the threshold algorithm. Then the time series of the water level for different thresholds were obtained and compared with in situ gauge data, which showed that the threshold of 60% with a value of RMSE 37.73 cm and a correlation of 99.30% improved %1.3 in accuracies and increase of %0.07 correlation with in situ gauge data has been optimized for the time series of water level obtained from L-2 retracker. Also, the results showed that, especially in the period from 2017 to 2018, the difference in water levels results from the retracking of the return waveforms with the optimal threshold algorithm (60%) with in situ gauge data less than the optimal L-2 retracker (OCOG). The average water level of Doroudzan Dam from the threshold of 60% was analyzed. Results showed the highest growth in water level with 4.09 m from March 6 to April 2, 2019, which corresponds to usually rainy months. The most significant decrease in the water level with 2.80 meters occurred from April 29, 2019, to May 26, 2019, which are usually low rainfall months. The results also showed that during the study period a slight increase in the water level of Doroudzan Dam was observed. Due to the hard, challenging shape, and topography of Doroudzan Dam and its confused waveforms, therefore, in the above study area, it is not possible to expect high accuracy from both the retrackers in the L-2 data and the results of the waveform retracking. Therefore, the proximity of RMSE results and correlation goes back to the shape and topography of the Doroudzan Dam reservoir. The results of this study show high suitability of the Sentinel-3 mission in monitoring the water level from inland water bodies, which is still a challenging area for satellite altimetry to monitor. Indeed, for a better understanding of the performance of this mission, more samples need to be analyzed.

Keywords: Satellite Altimetry, Sentinel-3, Waveforms Retracking, Water Level, Doroudzan Dam.

* Corresponding author:

ar.tayfehostami@ut.ac.ir