

(OPEN ACCESS)

Monitoring time series of reservoir water surface area changes using remote sensing approaches

Hamed Feiz Abady¹, Khalil Ghorbani^{*2}, Abdolreza Zahiri³

1. M.Sc. Student in Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hamedfz1370@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zahiri@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 02.15.2024
Revised: 04.08.2024
Accepted: 04.14.2024

Keywords:
DAHITI,
Landsat satellite,
Water indicators,
Water surface area

ABSTRACT

Background and Objectives: In recent years, monitoring of water resources and modeling the Earth's water cycle has become a more important issue. Dam reservoirs are considered as one of the most important sources of water supplies, and estimating their water surface area is necessary for many hydraulic and hydrodynamic subjects. Estimating the water surface area is crucial for flood routing, diffusion and transport of pollutants, and modeling of reservoir Thermal Stratification. Due to the development of remote sensing and the improvement of the quality of satellite images, it is possible to derive valuable information about the trend of water area's changes and evaluate them in a long-term time series. In this research, a precise method based on remote sensing has been presented with the purpose of calculating the water surface area at any water level of reservoirs and lakes.

Materials and Methods: Monthly images of the Landsat-8 satellite were downloaded from April 2013 to September 2023 for the Zujar dam reservoir located in Spain with longitude -5.2318 °W and latitude 38.9295 °N from the archives of the United States Geological Survey (USGS) site. In order to validate the results of this study, the Database of Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI) has been used, including the hydrological data of the lake and reservoirs of different regions from 1992. After radiometric correction, by combining five water indices MNDWI, NWI, AWEIsh, AWEInsh and TCwet, a threshold between water mask and land mask was detected for each monthly image which included the gaps in data caused by shades, clouds, cavities, ice, etc. To determine the status of the pixels, the status of water, land, or gap is determined. Using an identification threshold, monthly images were classified as land-water masks that included the gap in the data. To fill these gaps, a long-term water probability graph was computed and each gap pixel in the land-water mask was compared with its value in long-term probability. With the iteration method in different water probabilities and using an equation that minimized the area between the monthly water area and the long-term water probability, the area of the data gaps was filled for each monthly image. Finally, a ten-year time series of water surface area

was formed. To validate the research results, the surface water hydrological time series database (DAHITI), which includes hydrological information of lakes and reservoirs of dams in different regions since 1992, has been used.

Results: The water surface area values calculated in a ten-year period showed that the largest water area of the Zujar dam reservoir was at 351.2 m water level corresponding to April 2013, and the lowest water area at 316.1 m water level corresponding to September 2023, equal to 140.3 and 17.8 Km², respectively. Investigations showed that the water surface area of the reservoir had a continuous downward trend in the last decade and climate change can be one of the most important reasons. The comparison between the obtained results with the measurements of the database showed that the largest difference in the calculation of the water surface area was in July 2016, at the water level of 344.4 m, equal to 4.3 Km² (3.6%), and the average error in the ten-year period was about 2.5%.

Conclusion: Although the water surface area of the reservoir at each level can be calculated with the help of the initial area-elevation curve of the reservoir, this curve changes over time due to various reasons, such as the deposition of sediment by floods. Therefore, water surface area has a dynamic behavior and its time series variations should be considered. The proposed method in this study based on remote sensing was able to estimate the water surface area of the dam reservoirs in a long-term time series of ten years with high accuracy by separating water and land areas.

Cite this article: Feiz Abady, Hamed, Ghorbani, Khalil, Zahiri, Abdolreza. 2025. Monitoring time series of reservoir water surface area changes using remote sensing approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 55-75.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22198.3713

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پایش سری زمانی تغییرات سطح آب مخزن سد با استفاده از رهیافت‌های سنجش‌ازدور

حامد فیض‌آبادی^۱ (id)، خلیل قربانی^{۲*} (id)، عبدالرضا ظهیری^۳ (id)

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hamedfz1370@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@gau.ac.ir
۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zahiri@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: در سال‌های اخیر نظارت بر منابع آبی و مدل‌سازی چرخه آب زمین اهمیت بیش‌تری یافته است. مخازن سدها از مهم‌ترین منابع تأمین آب محسوب می‌شوند که تخمین مساحت پهنه آب آن‌ها در بسیاری از مباحث هیدرولیکی و هیدرودینامیکی ضروری است. روندیابی و مدیریت سیلاب، شبیه‌سازی پخش و انتقال مواد آلاینده، و نیز مدل‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد از مباحث مهمی هستند که نیازمند اطلاع از مساحت پهنه آبی می‌باشند. با توجه به توسعه علم سنجش‌ازدور و بهبود روزافزون کیفیت تصویربرداری ماهواره‌های مختلف می‌توان با کم‌ترین هزینه اطلاعات ارزشمندی از روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی به دست آورد و آن‌ها را در سری‌های زمانی بلندمدت ارزیابی کرد. در این پژوهش یک روش دقیق بر مبنای سنجش‌ازدور با هدف محاسبه سطح آب مخازن سدها و دریاچه‌ها در تراز سطح آب دلخواه ارائه شده است.
تاریخ دریافت: ۰۲/۱۱/۲۶ تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۱/۲۶	مواد و روش‌ها: تصاویر ماهانه ماهواره Landsat-8 از آوریل ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۲۳ برای مخزن سد زوجار در کشور اسپانیا واقع در طول جغرافیایی $5/2318^{\circ}W$ و عرض جغرافیایی $38/9295^{\circ}N$ از آرشیو سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) دانلود شد و پس از انجام تصحیحات رادیومتریکی تصاویر، با استفاده از ترکیب پنج شاخص آبی MNDWI، NWI، AWEI _{sh} ، AWEI _{nsh} و TC _{wet} یک آستانه تشخیص بین مناطق آب و خشکی برای هر تصویر ماهانه که شامل شکاف داده‌ها (ابهام در وضعیت آب یا خشک بودن پیکسل) به دلیل وجود سایه، ابر، حفره، یخ و غیره بود به‌دست آمد تا مشخص کند وضعیت پیکسل‌ها آب، خشکی یا شکاف می‌باشد. با استفاده از آستانه تشخیص به‌دست آمده تصاویر ماهانه به صورت
واژه‌های کلیدی: شاخص‌های آبی، ماهواره Landsat، مساحت پهنه آبی، DAHITI	

پهنه‌های آب- خشکی که شامل شکاف در داده‌ها بودند طبقه‌بندی شدند. برای پر کردن این شکاف‌ها یک پهنه احتمال آب بلندمدت که در آن وضعیت هر پیکسل شکاف در ترازهای سطح آب مختلف ماهانه با وضعیت بلندمدت (ده ساله) خود مقایسه شود محاسبه شد. با استفاده از روش تکرار در احتمالات آب مختلف و رابطه‌ای که فاصله مساحت پهنه آب ماهانه و مساحت پهنه آب بلندمدت را به حداقل برساند مساحت‌های حاصل از شکاف داده‌ها برای هر تصویر ماهانه پر شدند و در نهایت یک سری زمانی ده‌ساله مساحت سطح آب مخزن تشکیل شد. برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش از پایگاه داده سری‌های زمانی هیدرولوژیکی آب‌های سطحی (DAHITI) که شامل اطلاعات هیدرولوژیکی دریاچه‌ها و مخازن سدهای مناطق مختلف از سال ۱۹۹۲ می‌باشد استفاده شده است.

یافته‌ها: مساحت‌های سطح آب محاسبه‌شده مخزن سد زوجار در بازه ده‌ساله نشان داد که بیش‌ترین مساحت سطح آب در آوریل ۲۰۱۳ و در تراز سطح آب ۳۵۱/۲ متر برابر با ۱۴۰/۳ کیلومترمربع و کم‌ترین مساحت سطح آب در سپتامبر ۲۰۲۳ و در تراز سطح آب ۳۱۶/۱ متر برابر با ۱۷/۸ کیلومترمربع بوده است. بررسی‌ها نشان داد که مساحت سطح آب مخزن در دهه گذشته به‌طور پیوسته روند نزولی داشته است که تغییرات آب و هوایی و کاهش بارش در منطقه می‌تواند از مهم‌ترین دلایل آن باشد. از مقایسه مساحت سطح آب محاسباتی تصاویر ماهانه در این بازه ده‌ساله با پایگاه داده میانگین خطای محاسبات حدود ۲/۵ درصد به دست آمد. هم‌چنین بیش‌ترین اختلاف محاسبه سطح آب مربوط به جولای ۲۰۱۶ و در تراز سطح آب ۳۴۴/۴ متر حدود ۴/۳ کیلومترمربع (۳/۶ درصد) بوده است.

نتیجه‌گیری: اگرچه مساحت سطح آب مخزن در هر تراز را می‌توان به کمک منحنی اولیه سطح- ارتفاع مخزن محاسبه نمود اما این منحنی در طول زمان به دلایل مختلف مثل ته‌نشینی رسوبات توسط سیلاب‌ها تغییر می‌کند. بنابراین مساحت پهنه آبی رفتاری دینامیکی داشته و باید تغییرات زمانی آن در نظر گرفته شود. روش ارائه‌شده بر مبنای سنجش‌ازدور با دقت بالایی قابلیت تفکیک پهنه‌های آب- خشکی و برآورد مساحت سطح آب مخزن سد را در سری زمانی بلندمدت دارد.

استناد: فیض‌آبادی، حامد، قربانی، خلیل، ظهیری، عبدالرضا (۱۴۰۴). پایش سری زمانی تغییرات سطح آب مخزن سد با استفاده از رهیافت‌های سنجش‌ازدور. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۲)، ۷۵-۵۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22198.3713



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در سال‌های اخیر نظارت بر منابع آبی و مدل‌سازی چرخه آب زمین اهمیت بیش‌تری یافته است. دریاچه‌ها و مخازن سدها از مهم‌ترین منابع آب مورد استفاده برای مصارف گوناگون می‌باشند. تعداد سدهای ساخته‌شده در جهان در سال‌های اخیر برای مصارفی مثل کشاورزی و تولید برق افزایش یافته است که این امر می‌تواند باعث کمبود آب در کشوری مثل ایران شده و در نهایت ممکن است به بحران‌های سیاسی ختم شود (۱). علاوه بر این تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در محل برای نظارت بر منابع آبی در دهه‌های اخیر کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند عدم وجود داده‌ها یا در دسترس نبودن آن‌ها باشد. برای مثال طبق گزارش‌های مرکز داده‌های رواناب جهانی (GRDC) تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی رودخانه‌ها بین سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ از ۷۹۰۰ به ۶۰۰ کاهش یافته است (۲). سنجش‌ازدور می‌تواند با شناسایی توده‌های آبی در جهت مطالعه و نظارت بر سیلاب‌ها (۳) و کمی‌سازی آب دریاچه‌ها و مخازن سدها (۴، ۵) مورد استفاده قرار گیرد. اولین تصاویر سنجش‌ازدور در سال ۱۹۷۰ میلادی به وسیله ماهواره Landsat-1 برای ترسیم پستی و بلندی‌های سطح زمین و تراز سطح آب‌های آزاد ثبت شد (۶). از آن زمان تاکنون ماهواره‌های مختلفی مثل Landsat-8، Sentinel-2 و MODIS با حسگرهای بهبودیافته در مدار قرار گرفته‌اند که به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا مجموعه‌ای از داده‌های مربوط به مساحت پهنه‌های آبی و تراز سطح آب در نواحی مختلف را در سری‌های زمانی (با دوره بیش از ۳۰ سال) برای مخازن سدها و دریاچه‌ها ایجاد کنند (۷، ۸).

سری‌های زمانی تغییرات مساحت پهنه‌های آبی باعث افزایش آگاهی در مورد دینامیک دریاچه‌ها و مخازن می‌شوند که کاربردهای مختلفی مثل روندیابی

سیلاب‌ها، شبیه‌سازی پخش و انتقال مواد آلاینده و نیز مدل‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخازن سدها دارند (۹). هدف اصلی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی انواع پوشش‌های زمین در دسته‌هایی مانند آب، پوشش گیاهی، یخ، خشکی و غیره است. در این زمینه یکی از رایج‌ترین روش‌ها، طبقه‌بندی پهنه‌های آب-خشکی بر پایه شاخص‌های محاسبه شده از باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای است. در چند دهه گذشته بسیاری از شاخص‌های آب مانند شاخص اصلاح‌شده آب تفاضلی نرمال‌شده (MNDWI) (۱۰)، شاخص آب جدید (NWI) (۱۱)، شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق بدون سایه (AWEI_{nsh}) (۱۲)، شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق سایه‌دار (AWEI_{sh}) (۱۲) و شاخص Tasseled Cap for Wetness (TC_{wet}) (۱۳) در انجام اصلاحات طیفی، ترکیب‌ها و روش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از چالش‌های استفاده از این شاخص‌ها طبقه‌بندی پهنه‌های آب-خشکی است که براساس آن می‌توان در سری‌های زمانی مختلف مساحت پهنه‌های آبی را محاسبه کرد. با محاسبه مساحت پهنه‌های آبی در ترازهای آب مشخص، می‌توان حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد را نیز تخمین زد. یو فانگ و همکاران (۲۰۱۹) با ادغام داده‌های آب‌های سطحی جهانی و مدل‌های ترازابی دیجیتال (STRM) که هر دو در پلتفرم Google Earth Engine و با وضوح ۳۰ متر در دسترس هستند به بررسی تغییرات حجم آب ۷۶۱ دریاچه و مخزن در سرتاسر چین از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج افزایش جزئی حجم آب به میزان ۱/۷ گیگا تن سالانه طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵، کاهش قابل توجه ۲۰/۶ گیگا تن سالانه طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ و افزایش قابل توجه ۲۱/۳ در سال طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ را نشان داد که روند افزایشی عمدتاً مربوط به دریاچه‌ها و مخازن در فلات

آب مخازن حدود ۵/۲ درصد و دامنه تغییرات سطح آب دریاچه‌های طبیعی ۱/۹ درصد است که نشان داد تغییرات سطح پهنه‌های آبی مصنوعی به میزان قابل توجهی بیش‌تر از تغییرات سطح پهنه‌های آب طبیعی می‌باشد. بررسی‌های فصلی بر روی پیکره‌های آبی با مساحت کوچک‌تر از ۱۰ کیلومتر مربع نشان داد که تغییر سطح آب آن‌ها به میزان قابل توجهی بیش‌تر از پیکره‌های بزرگ‌تر از ۱۰ کیلومتر مربع است که این تغییرات در مقایسه با سطح آب کل پیکره‌های آبی دنیا حدود ۲۰ درصد بود (۱۷). اگرچه مساحت سطح آب مخزن در هر تراز را می‌توان به کمک منحنی اولیه سطح-ارتفاع مخزن محاسبه نمود اما این منحنی در طول زمان به دلایل مختلف مثل ته‌نشینی رسوبات مختلف توسط سیلاب‌ها تغییر می‌کند. بنابراین مساحت پهنه آبی رفتاری دینامیکی داشته و باید تغییرات زمانی آن در نظر گرفته شود. در این پژوهش با استفاده از یک روش جدید که تغییرات دینامیکی را لحاظ کند به بازسازی شکاف داده‌ها ناشی از حفره‌ها، ابرها، سایه‌ها یا یخ در تخمین مساحت پیکره‌های آبی با استفاده از بررسی منطقه مورد مطالعه در کوتاه‌مدت (ماهانه) و بلندمدت (ده ساله) پرداخته می‌شود. در مرحله اول پهنه‌های آب-خشکی شامل شکاف داده‌ها با استفاده از ترکیب پنج شاخص آبی $MNDWI$ ، NWI ، $AWEI_{sh}$ ، $AWEI_{nsh}$ و TC_{wet} و ایجاد یک آستانه تشخیص به دست می‌آیند و در مرحله دوم از داده‌های ده‌ساله (سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳) برای ایجاد یک پهنه احتمال آب بلندمدت^۳ استفاده می‌شود تا شکاف موجود در داده‌ها را پر کند و در نهایت یک سری زمانی مساحت پهنه آبی محاسبه می‌شود.

تبت و روند کاهشی مربوط منطقه دریاچه شمال و شمال‌غرب بود (۱۴). شوکه و همکاران (۲۰۲۰) با ایجاد یک مدل هیپسومتری براساس الگوریتم Strahler اصلاح‌شده از ترکیب تراز سطح آب و مساحت‌های متناظر با آن، به محاسبه تغییرات حجم بین حداقل و حداکثر مساحت پهنه آبی مشاهده‌شده پرداختند و در نهایت با ترسیم منحنی‌های حجم-سطح-ارتفاع بر روی ۲۸ دریاچه و مخزن سد در ایالت تگزاس به مدل بهبودیافته‌ای برای تخمین سری‌های زمانی تغییرات حجم آب مخزن دست یافتند که خطای نسبی این تغییرات را حدود ۸/۳ درصد محاسبه کردند (۱۵). یولیانتو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های ماهواره Landsat-8 و پلتفرم GEE روش بهبودیافته‌ای برای استخراج خودکار مناطق آب و خشکی با استفاده از شاخص AWEI ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش SBA در دریاچه توبا واقع در استان سوماترای کشور اندونزی به یک آستانه تشخیص خودکار مناطق آبی رسیدند. آستانه محاسبه‌شده برای شاخص AWEI با روش SBA برابر ۰/۲۳- و دقت ۹۹/۴ درصد و آستانه نرمال برای شاخص AWEI برابر با ۰/۰۰ با دقت ۹۷/۴ درصد گزارش شد که نتایج به دست آمده ۲ درصد بهبود دقت در محاسبات را نشان داد (۱۶). بونما و همکاران (۲۰۲۲) برای تعیین سری زمانی تغییرات مساحت بیش از ۱۵۰۰۰ پیکره آبی در جهان در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ از داده‌های ماهواره Sentinel-1 SAR در پلتفرم GEE استفاده کردند و با استفاده از روش طبقه‌بندی آستانه پراکندگی پیشین^۱ توانستند پیکسل‌های آب-خشکی را جداسازی کنند. تمرکز این پژوهش بر تغییرات مساحت پیکره‌های آبی و تشخیص طبیعی یا مصنوعی بودن آن‌ها بود. نتایج این پژوهش نشان داد که دامنه تغییرات مساحت سطح

2- Data gaps

3- Long-term water probability

1- Backscatter thresholding approach

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: سد بتنی- وزنی زوجار با طول جغرافیایی $5/2318^{\circ}W$ و عرض جغرافیایی $38/9295^{\circ}N$ در سال ۱۹۶۴ در مسیر رودخانه زوجار که یکی از شاخه‌های فرعی رودخانه گادیانا^۱ در منطقه اکسترمادورا^۲ اسپانیا می‌باشد ساخته شد (شکل ۱). شیب رودخانه در بالادست سد زوجار ۰/۰۵ می‌باشد. در زمان بهره‌برداری سد حداکثر ظرفیت ذخیره آب مخزن و حداکثر مساحت پهنه آبی در تراز سطح آب ۳۵۲ متر به ترتیب ۳/۲۳ میلیارد مترمکعب و ۱۴۵/۴۹ کیلومترمربع گزارش شده است. طول و عرض تاج سد به ترتیب ۵۸۰ متر و ۱۳ متر و تاج آن در تراز ۳۵۵/۴۵ متر قرار گرفته است (۱۸).

داده‌های مورد استفاده: مجموعه لندست توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) اداره می‌شود و توانست اولین تصاویر خود را به وسیله ماهواره Landsat-1 در سال ۱۹۷۲ ثبت کند. تمام ماهواره‌های لندست دارای مدار چرخشی همسان با خورشید با زاویه $98/2^{\circ}$ در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری سطح زمین می‌باشند. در ادامه تداوم ماموریت ناسا Landsat-8 با وضوح تصویر ۳۰ متر و با تفکیک زمانی ثبت تصاویر هر ۱۶ روز یکبار در سال ۲۰۱۳ در مدار خود قرار گرفت که شامل تصویرساز عملیاتی (OLI) و حسگر با سنسور مادون قرمز حرارتی (TIRS) می‌باشد (۱۹). تصاویر ماهواره Landsat-8 به صورت رایگان در آرشیو سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) موجود می‌باشند که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

داده‌های مخزن سد: برای مناطق دورافتاده که ایستگاه‌های اندازه‌گیری در دسترس نیستند، داده‌های

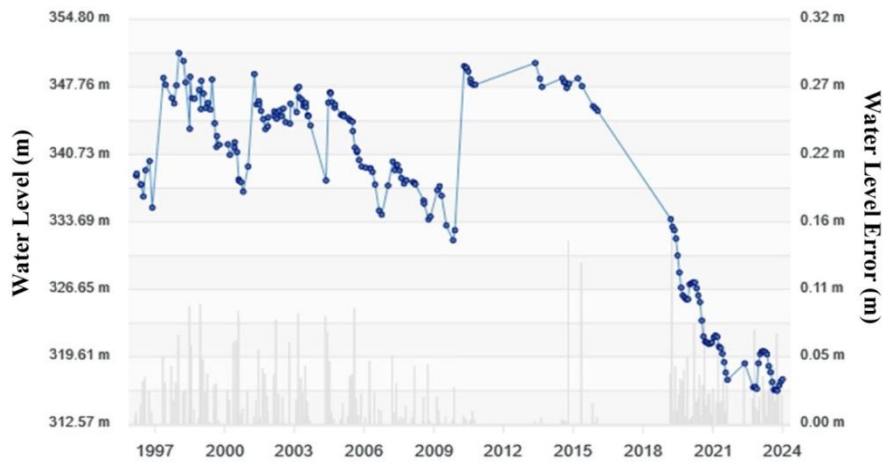
اندازه‌گیری ماهواره‌ای منبعی معتبر به شمار می‌آیند که توانایی آن‌ها برای نظارت بر تغییرات آب‌های سطحی در سال‌های گذشته ثابت شده است و اطلاعات سری‌های زمانی تراز سطح آب پهنه‌های آبی در مناطق مختلف از سال ۱۹۹۲ در دسترس می‌باشند (۲۰، ۲۱). در این مطالعه سری‌های زمانی تراز سطح آب و مساحت پهنه‌آبی از پایگاه داده‌های هیدرولوژیکی آب‌های سطحی (DAHITI) به نشانی <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/> که در آرشیو مؤسسه تحقیقات ژئودتیک دانشگاه فنی مونیخ آلمان (DGF-TUM) قرار دارد برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است. این اطلاعات به کمک ماهواره‌های ERS-2 (۲۰۱۱-۱۹۹۵)، Envisat (۲۰۱۳-۲۰۰۱) و SARAL (از سال ۲۰۱۳) که دارای مداری با تکرار چرخش ۳۵ روز یکبار هستند ثبت شده است. همچنین از ماهواره‌های Jason-1 (۲۰۱۳-۲۰۰۱)، Jason-2 (از سال ۲۰۰۸) و Jason-3 (از سال ۲۰۱۳) که دارای مداری با تکرار چرخش ۱۰ روز یکبار هستند برای تخمین سری‌های زمانی تراز سطح آب استفاده شده است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب داده‌های تراز سطح آب و مساحت‌های اندازه‌گیری شده توسط پایگاه داده را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

1- Guadiana
2- Extremadura



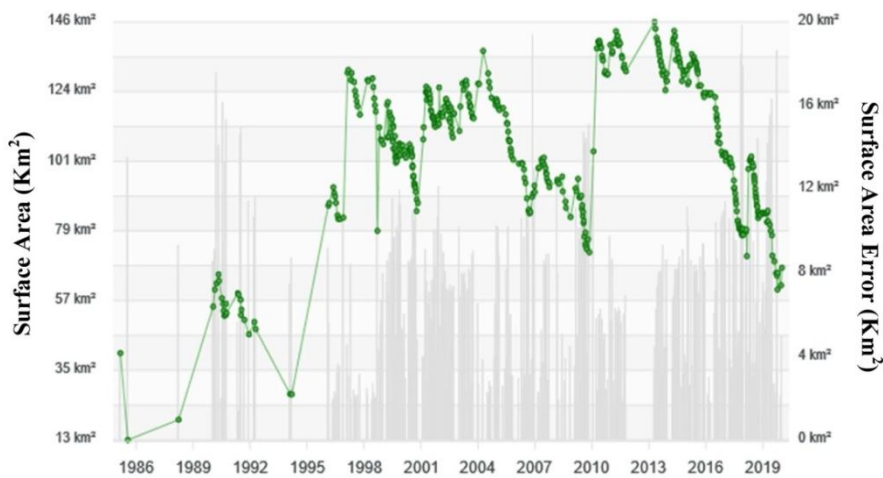
شکل ۱- منطقه مطالعاتی (مخزن سد زوجار).

Figure 1. Study Area (Zujar Dam Reservoir).



شکل ۲- نمودار سری زمانی تراز سطح آب مخزن سد زوجار (متر).

Figure 2. Time series of water level variations in Zujar reservoir dam (m).

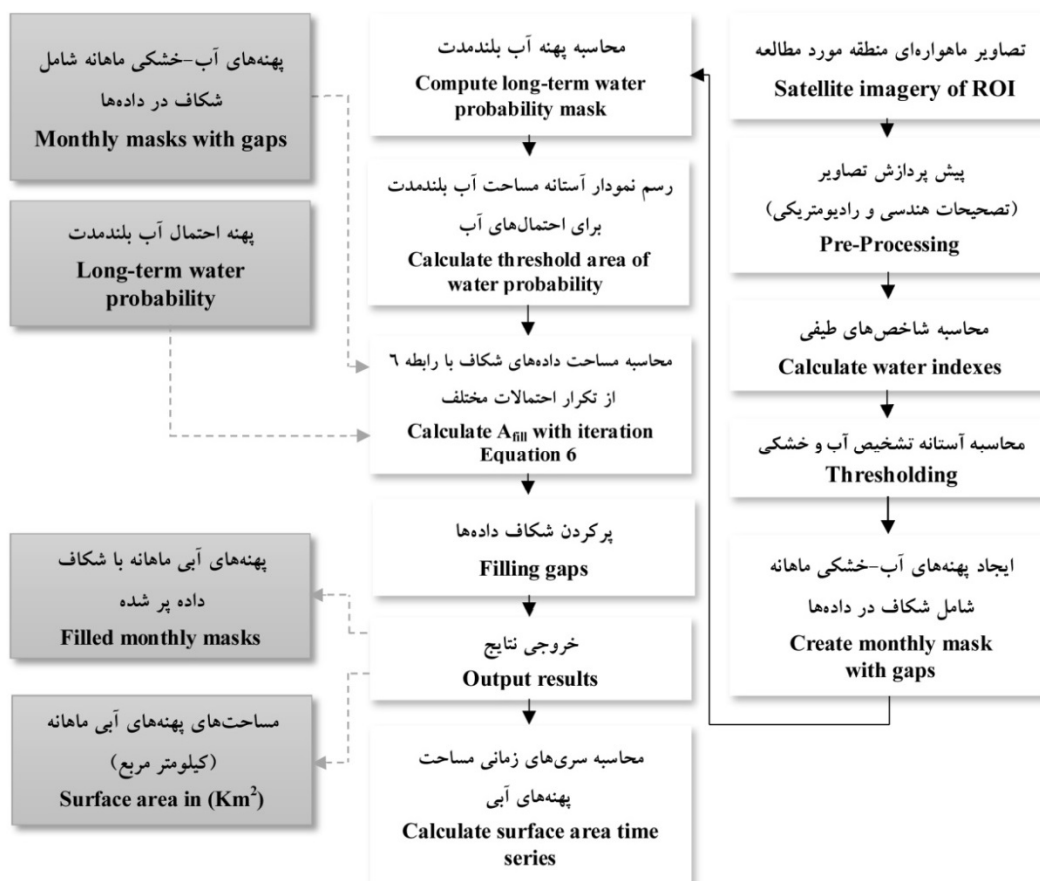


شکل ۳- نمودار سری زمانی مساحت پهنه آبی مخزن سد زوجار (کیلومترمربع).

Figure 3. Time series of surface water area variations in Zujar reservoir dam (Km²).

شکاف داده‌ای تقسیم می‌شوند و این شکاف‌ها پس از بررسی رفتار بلندمدت نقاط مورد نظر پر می‌شوند. براساس تمام پهنه‌های موجود آب- خشکی بین آوریل ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۲۳ یک پهنه احتمال آب بلندمدت (با استفاده از داده‌های ماهانه) تشکیل می‌شود. به کمک پهنه احتمال آب بلندمدت و در یک فرآیند تکرار شکاف‌های موجود در داده‌ها پر می‌شود و در نهایت براساس تمام پهنه‌های آب- خشکی پر شده ماهانه، یک سری زمانی تغییرات مساحت پهنه آب تشکیل می‌گردد. شکل ۴ فلوجارت مراحل انجام این روش را نشان می‌دهد.

روش انجام تحقیق: پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای و مشخص کردن مرز محیط مخزن با پیرامون آن (تشکیل منطقه ROI) پیش‌پردازش ماهانه تصاویر Landsat-8 شامل پهنه‌های آب- خشکی به همراه شکاف داده‌ها ناشی از ابر، سایه، یخ و غیره آغاز می‌شود تا در فرآیند تشخیص نوع پوشش (آب یا خشکی) استفاده شوند. با انجام پیش‌پردازش تصاویر شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریکی پنج شاخص آبی از باندهای طیفی استخراج می‌شوند که با ترکیب آن‌ها یک آستانه تشخیص بین مناطق آب و خشکی محاسبه می‌شود. با استفاده از آستانه تشخیص به دست آمده نقاط مختلف مخزن به سه دسته آب، خشکی و



شکل ۴- فلوجارت مراحل انجام روش (کادر سفید) و داده‌های محاسباتی (کادر خاکستری).

Figure 4. Flowchart of processing steps (White box) and resulting data sets (Gray) box).

سد زوجار استفاده شد که به‌طور مختصر شرح داده شده‌اند:

- شاخص اصلاح‌شده آب تفاضلی نرمال‌شده (MNDWI)
- شاخص آب جدید (NWI)
- شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق بدون سایه (AWEI_{nsh})
- شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق سایه‌دار (AWEI_{sh})
- شاخص Tasseled Cap for Wetness (TC_{Wet})

شاخص MNDWI بهبودیافته شاخص NDWI می‌باشد (۲۲) که در آن باند (SWIR1) جایگزین باند (NIR) شده است و بازه تغییرات آن بین -۱ تا +۱ می‌باشد. عدد صفر می‌تواند آستانه مناسبی برای تعیین مرز بین آب و خشکی باشد ولی همیشه بهترین آستانه نیست. فرم ریاضی این شاخص با رابطه ۱ بیان شده است:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (1)$$

این شاخص را نشان می‌دهد:

$$NWI = \frac{Blue - (NIR + SWIR1 + SWIR2)}{Blue + (NIR + SWIR1 + SWIR2)} \quad (2)$$

رابطه‌های قبلی به جای نسبت بین باندها از اختلاف وزنی آن‌ها طبق رابطه ۳ استفاده شده است (۱۲):

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (Green - SWIR1) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR2) \quad (3)$$

الف. محاسبه مساحت پهنه آب- خشکی ماهانه شامل شکاف داده‌ها: با استفاده از موقعیت جغرافیایی منطقه موردنظر تصاویر ماهانه L2C2 (Level 2 Collection 2) ماهواره Landsat-8 برای مخزن سد زوجار بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ دانلود شد و در نرم‌افزار ENVI 5.6 مورد تصحیحات هندسی و رادیومتریکی قرار گرفت. پس از پیش‌پردازش تصاویر، مقادیر باندهای آبی (Blue)، سبز (Green)، قرمز (Red)، مادون قرمز نزدیک (NIR)، مادون قرمز کوتاه ۱ (SWIR1) و مادون قرمز کوتاه ۲ (SWIR2) برای محاسبه شاخص‌های طیفی استفاده شد.

در سال‌های گذشته شاخص‌های آبی بسیاری برای تشخیص پیکره‌های آبی معرفی شده‌اند اما هیچ شاخص قطعی و بهینه‌ای برای استفاده در تمام مناطق جغرافیایی وجود ندارد. برای مثال در نزدیکی سواحل شاخص‌های آبی حساسیت متفاوتی را نشان می‌دهند. برای استفاده از خصوصیات شاخص‌های مختلف در این پژوهش از ترکیب پنج شاخص آبی برای مخزن

شاخص NWI از ترکیب باندهای مادون قرمز و باند آبی تشکیل شده است (۱۱). رابطه ۲ فرم ریاضی

شاخص AWEI_{nsh} برای به حداکثر رساندن توانایی تفکیک بین مناطق آب و مناطق تیره کوچک مانند حفره‌ها استفاده شده است که بر خلاف

اضافه شده و وزن شاخص‌ها تغییر پیدا کرده است (۱۲). فرم ریاضی این شاخص در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (4)$$

(۲۳) که در این روش از نوع شاخص مناطق مرطوب برای تشخیص پهنه آب‌های سطحی طبق رابطه ۵ استفاده شده است:

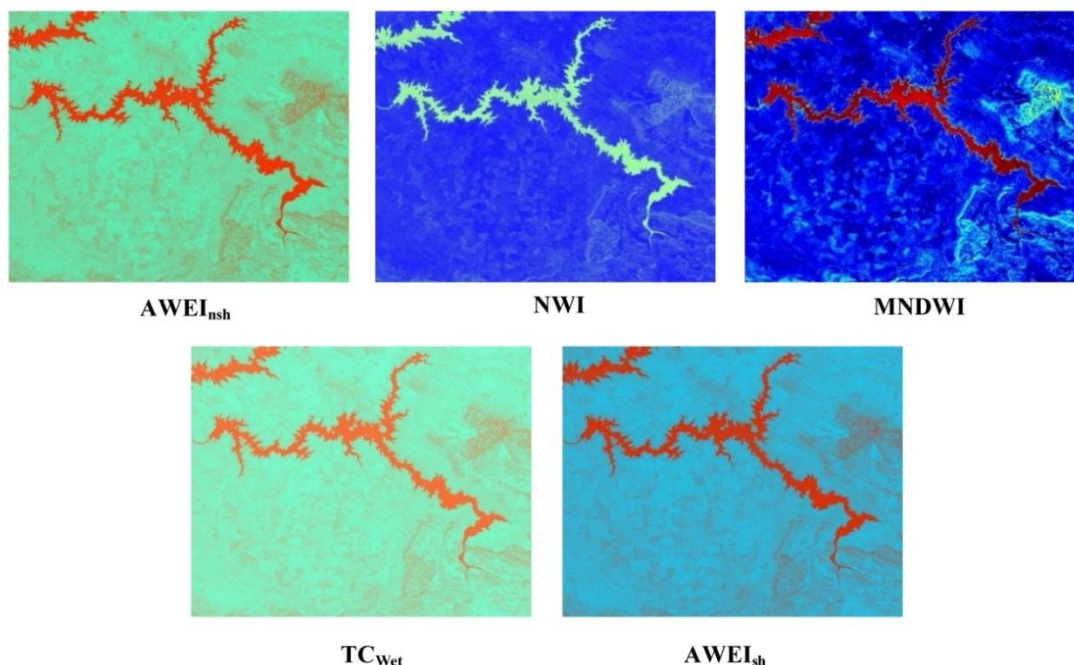
$$TC_{wet} = 0.1509 \times Blue + 0.1973 \times Green + 0.3279 \times Red + 0.3406 \times NIR - 0.7112 \times SWIR1 - 0.4572 \times SWIR2 \quad (5)$$

(SWIR2) استفاده شد که در شکل ۵ نتایج آن برای مخزن سد زوجار در جولای ۲۰۱۸ نشان داده شده است.

شاخص $AWEI_{sh}$ برای مناطق سایه‌دار شبیه شاخص $AWEI_{nsh}$ عمل می‌کند با این تفاوت که برای مناطق تیره وسیع مثل سایه در دره‌ها بهتر عمل می‌کند و علاوه بر باندهای قبلی باند آبی هم به آن

شاخص Tasseled Cap Wetness (TC_{wet}) با استفاده از ۶ باند طیفی ذکر شده و وزن دادن به هر کدام محاسبه شده است که شامل سه نوع مختلف روشنایی، پوشش گیاهی و مناطق مرطوب می‌باشد

برای محاسبه شاخص‌های طیفی از باندهای انعکاسی طیف مرئی (Blue, Green, Red) و باندهای انعکاسی طیف مادون قرمز (NIR , $SWIR1$,

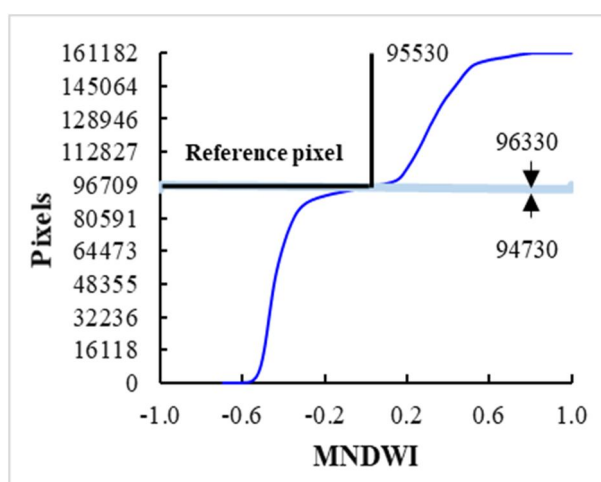


شکل ۵- شاخص‌های استفاده شده برای آشکارسازی پهنه آب- خشکی برای مخزن سد زوجار سال ۲۰۱۸.

Figure 5. The indicators used for land-water mask in Zujar dam reservoir in 2018.

داده‌ها (۱۶۰۰ تا) به صورت -0.05 تا $+0.05$ درصد نسبت به پیکسل مرجع به عنوان محدوده اطمینان انتخاب شدند که پیکسل شماره ۹۴۷۳۰ به عنوان حد پایین و پیکسل شماره ۹۶۳۳۰ به عنوان حد بالایی در نمودار تجمعی مشخص شد. شکل ۶ این روند را برای شاخص MNDWI در جولای ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.

پس از محاسبه شاخص‌ها برای هر پیکسل تصویر ماهانه، نمودار تجمعی پیکسل‌ها برای هر شاخص ترسیم شد و داده‌ها از کم‌ترین تا بیش‌ترین مقدار به‌دست آمده مرتب شدند. به عنوان یک آستانه اولیه، عدد صفر در شاخص MNDWI برای تفکیک بین آب و خشکی در نظر گرفته شد و پیکسلی که مقدار آن برابر صفر بود به عنوان پیکسل اولیه مرجع انتخاب شد (پیکسل شماره ۹۵۵۳۰). یک درصد از تعداد کل



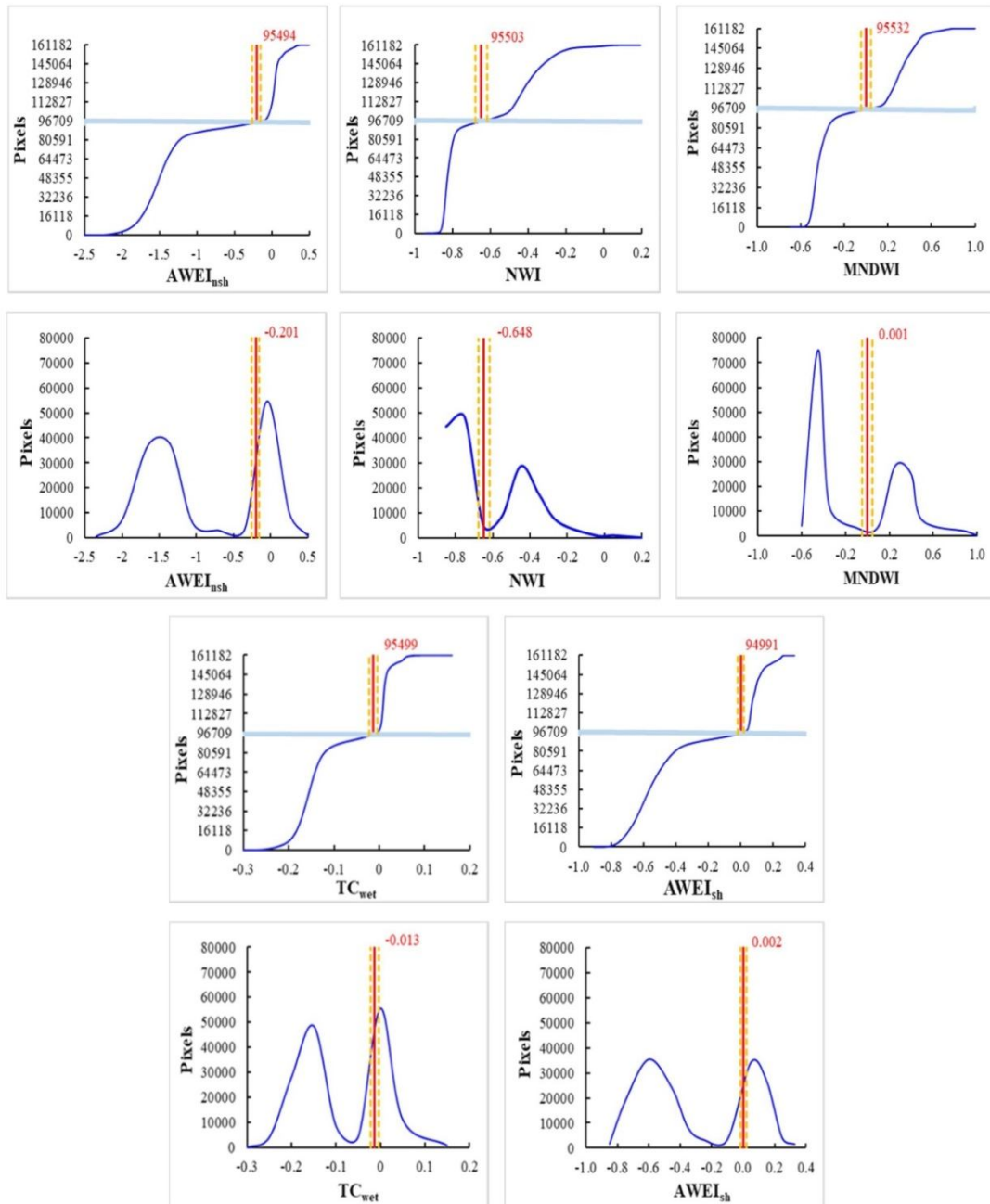
شکل ۶- نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها برای شاخص MNDWI در جولای ۲۰۲۰.
Figure 6. Data cumulative histogram for MNDWI index in July 2020.

پیکسل مرجع نهایی در نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها را برای هر شاخص در جولای ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بر اساس آستانه مرجع نهایی به دست آمده برای پنج شاخص و ترکیب آن‌ها فرآیند تفکیک پهنه‌های آب و خشکی شامل شکاف در داده‌ها صورت گرفت. در نمودار فراوانی تجمعی هر شاخص به پیکسل‌های کوچک‌تر از آستانه عدد صفر به عنوان خشکی و به پیکسل‌های بزرگ‌تر از آستانه عدد یک به عنوان آب اختصاص داده شد. برای هر پیکسل مقادیر هر پنج شاخص به‌دست آمده با هم جمع شد و مقداری متغیر بین صفر تا پنج برای پیکسل‌های مختلف به‌دست آمد. پیکسل‌هایی که مقادیر چهار یا پنج دارند

به دلیل توزیع یکنواخت داده‌های آب و خشکی در دو طرف پیکسل مرجع، حد بالا و پایین مشخص شده در محدوده اطمینان بر نمودار فراوانی تجمعی همه شاخص‌ها اعمال شد و با مقدار هر شاخص در آن نمودار تقاطع داده شد. مقادیر شاخص متناظر با این حدود مجدداً به نمودار فراوانی هر شاخص انتقال یافتند (محدوده خط‌چین زرد رنگ در نمودارهای فراوانی شکل ۷) تا در این محدوده آستانه نهایی بین آب و خشکی انتخاب شود. با محاسبه میانگین داده‌ها در این محدوده و انتقال آن به نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها پیکسل مرجع نهایی برای هر شاخص انتخاب شد. شکل ۷ آستانه مرجع نهایی در نمودار فراوانی و

آب- خشکی ماهانه قرار می‌گیرند. جدول ۱
حالت‌های مختلف ترکیب مقادیر پنج شاخص را برای
هر پیکسل نشان داده است.

به عنوان آب، پیکسل‌هایی که مقادیر صفر یا یک
دارند به عنوان خشکی و پیکسل‌هایی که مقادیر دو
یا سه دارند به عنوان شکاف در داده‌ها در پهنه



شکل ۷- آستانه مرجع نهایی در نمودار فراوانی و پیکسل مرجع نهایی در نمودار تجمعی فراوانی داده‌ها برای هر شاخص،

جولای ۲۰۲۰.

Figure 7. The final reference threshold and reference pixel in the frequency and the cumulative histogram, July 2020.

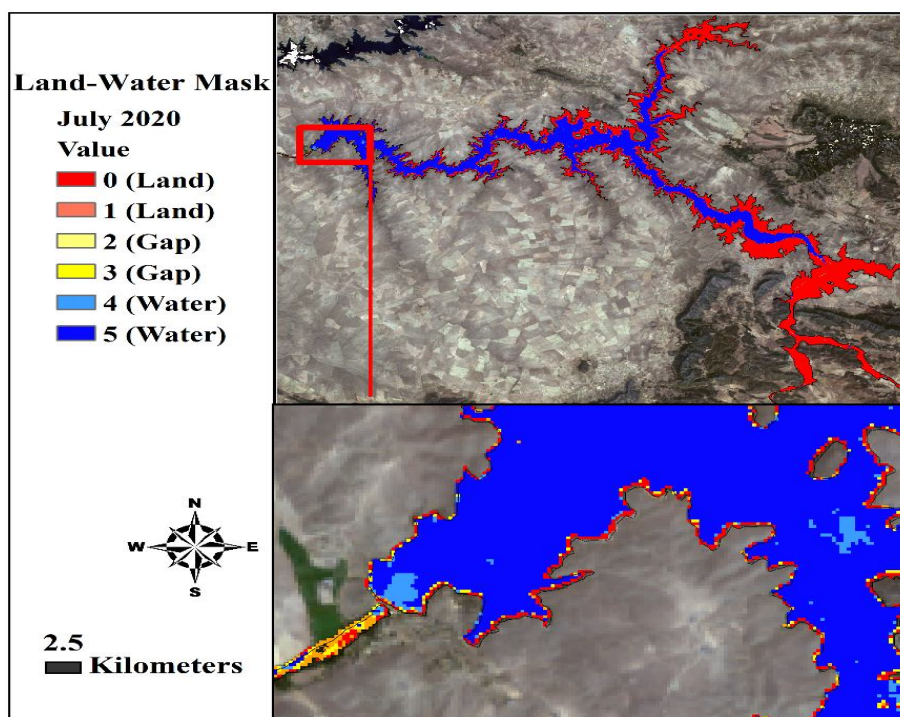
جدول ۱- وضعیت پیکسل در پهنه آب- خشکی از ترکیب داده‌های پنج شاخص آبی.

Table 1. Final land-water mask based on 5 water indexes.

5	4	3	2	1	0	تعداد پیکسل‌های آب Water pixels
آب Water	آب Water	شکاف Gap	شکاف Gap	خشکی Land	خشکی Land	وضعیت پیکسل ماهانه Monthly pixel's status

پیکسل‌ها در پنج وضعیت مختلفی که در جدول ۲ گفته شد نشان داده شده است. نقاط آبی (۴ یا ۵) و قرمز (۰ یا ۱) به ترتیب نشان‌دهنده آب و خشکی و نقاط زرد رنگ (۲ یا ۳) نشان‌دهنده شکاف در داده‌ها می‌باشند. بیش‌ترین شکاف داده‌ها در مرز بین آب و خشکی که عمق آب بسیار کم می‌باشد قرار دارند.

برای مخزن سد زوجار در جولای ۲۰۲۰ از تعداد ۱۶۱۱۸۲ پیکسل بررسی شده ۶۵۰۷۸ پیکسل معادل بیش از ۴۰ درصد داده‌ها وضعیت آب، ۹۴۹۸۱ پیکسل معادل بیش از ۵۸ درصد داده‌ها وضعیت خشکی و ۱۱۲۳ پیکسل معادل کم‌تر از ۱ درصد داده‌ها وضعیت شکاف را نشان دادند. در شکل ۸ موقعیت مکانی این



شکل ۸- پهنه آب- خشکی ماهانه شامل شکاف داده‌ها با استفاده از ترکیب پنج شاخص آبی، جولای ۲۰۲۰.

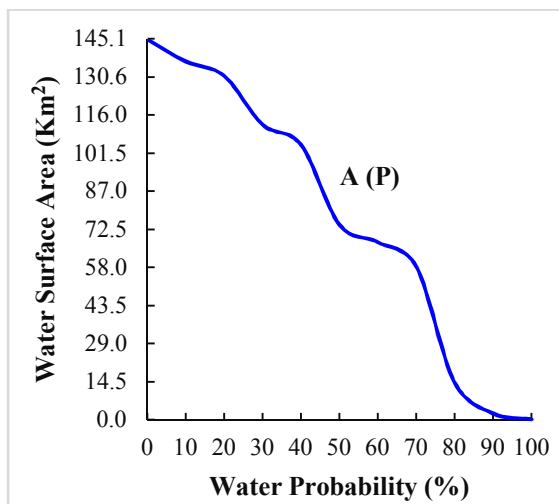
Figure 8. Monthly Land-Water mask with data gaps using the combination of five Water indexes, July 2020.

مخزن سد زوجار تهیه و از آن‌ها برای رسم نمودار مساحت پهنه آب نسبت به احتمال آب استفاده شد. منظور از احتمال آب برای هر پیکسل مشخص یعنی اگر آن پیکسل در بازه بلندمدت (ده‌ساله) بررسی شود

ب. ایجاد پهنه احتمال آب بلندمدت: برای پر کردن شکاف داده‌های ماهانه از یک پهنه احتمال آب بلندمدت استفاده شد. بر این اساس در یک بازه ده‌ساله از آوریل ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۲۳ تصاویر ماهانه

حداقل سطح آب برای پیکسل‌های با احتمال آب بالاتر از احتمال (P) در بازه بلندمدت چقدر بوده است. شکل ۹ نمودار مساحت پهنه آب نسبت به احتمال آب را برای مخزن سد زوجار در بازه بلندمدت (ده‌ساله) نشان داده است.

از ترکیب پنج شاخص ذکر شده وضعیت چند درصد از تعداد بررسی‌ها مساوی با عدد چهار یا پنج می‌شود، یا به عبارتی چند درصد از بررسی‌ها نشان می‌دهد آن پیکسل آب بوده است. مساحت متناظر با هر احتمال آب (P) در این نمودار بیان می‌کند که مساحت

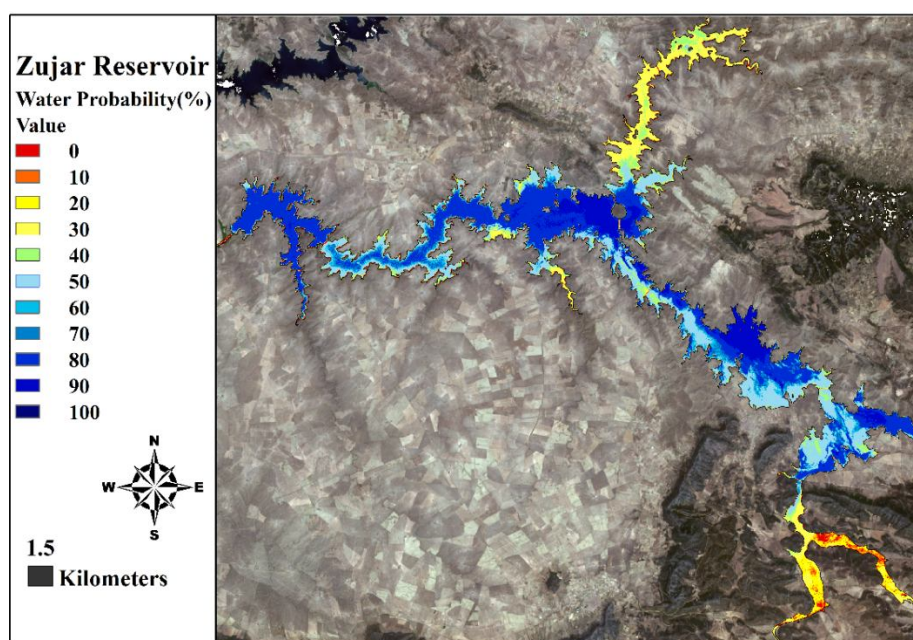


شکل ۹- رابطه بین احتمال وجود آب و مساحت پهنه آب در مخزن.

Figure 9. Dependency between water probability and water surface area.

احتمال‌های آب بالاتر بود. در نهایت این مساحت‌ها نسبت به احتمال آب ترسیم شدند. برای مثال وقتی احتمال آب ۳۰ درصد بررسی می‌شود و از روی نمودار A(P) عدد ۱۱۲/۵ کیلومتر مربع برای مساحت پهنه آبی خوانده می‌شود یعنی اگر مساحت پیکسل‌هایی که در بازه بلندمدت فقط در ۳۰ درصد موارد بررسی آب بوده‌اند از مساحت حداکثر سطح آب مخزن کسر شوند باقی‌مانده ۷۰ درصد پیکسل‌ها مساحت حداقلی برابر با ۱۱۲/۵۴ کیلومتر مربع خواهند داشت. شکل ۱۰ توزیع احتمال آب بلندمدت را در مخزن سد زوجار نشان داده است بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ نشان داده است.

برای ترسیم نمودار شکل ۹ وضعیت هر پیکسل در بلندمدت بررسی شد و احتمال آب هر پیکسل محاسبه شد. تعداد پیکسل‌های موجود به دست آمده هر بازه احتمال آب در مساحت هر پیکسل (۹۰۰ مترمربع) ضرب شدند و مساحت به دست آمده در هر احتمال آب به صورت پله‌ای از مساحت محاسبه شده سطح آب در مرحله قبل کسر شد (بدیهی است برای احتمال آب صفر در اولین مرحله مساحت متناظر با آن برابر مساحت تمام پیکسل‌هایی است که احتمال آب در آن‌ها بین صفر تا صد درصد است که بیانگر حداکثر مساحت سطح مخزن در زمان بهره‌برداری می‌باشد). مساحت باقی‌مانده در هر مرحله برابر با مساحت سطح آب حداقل برای پیکسل‌هایی با



شکل ۱۰- پهنه احتمال آب بلندمدت بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳.

Figure 10. Long-term water probability mask until 2013 to 2023.

با مقدار ثابت $A_{initial}$ محاسبه شد. با استفاده از نمودار احتمال آب شکل ۹ و مقادیر $A(P)$ در احتمال‌های آب مختلف مساحت نهایی شکاف در داده‌ها برای هر پهنه آب- خشکی ماهانه (بر حسب کیلومترمربع) با استفاده از روش تکرار و به حداقل رساندن رابطه ۶ محاسبه شد:

$$\text{Min: } |A_{initial} + A_{fill}(P) - A(P)| \quad (6)$$

را از طریق به حداقل رساندن اختلاف مساحت پهنه آب بلندمدت با مساحت پهنه آب ماهانه محاسبه کند. از بین ۱۱۲۳ پیکسل شکاف ماهانه در جولای ۲۰۲۰ برای مخزن سد زوجار ۵۲۴ پیکسل به مساحت ۰/۴۷ کیلومترمربع از تقاطع با پهنه بلندمدت ده ساله آب تشخیص داده شد و ۵۹۹ پیکسل به مساحت ۰/۵۳ کیلومترمربع به پیکسل‌های خشکی اضافه شد.

ج. محاسبه مساحت پهنه آب ماهانه بدون شکاف داده‌ها: برای پر کردن شکاف داده‌های ماهانه از ترکیب اطلاعات به دست آمده در پهنه آب- خشکی ماهانه و پهنه آب بلندمدت استفاده شد. مجموع مساحت پیکسل‌هایی که مقدار آن‌ها در وضعیت پهنه آب- خشکی ماهانه برابر چهار یا پنج بود و در نتیجه آب تشخیص داده شدند به عنوان داده ورودی

در این رابطه، مساحت A_{fill} به صورت تکراری با استفاده از احتمالات مختلف آب محاسبه شد. بر این اساس هر مرحله، احتمال (P) به صورت پیکسلی بر روی پهنه آب بلندمدت اعمال شد و تمام پیکسل‌های با احتمال بالاتر از احتمال (P) حذف شدند. سپس پیکسل‌های آب باقی‌مانده با پیکسل‌های شکاف ماهانه تقاطع داده شدند تا ناحیه A_{fill} به دست آید. رابطه ۶ توانست با دقت بالایی مساحت ناشی از شکاف داده‌ها

نتایج و بحث

با استفاده از روش پیشنهادی برای محاسبه مساحت پهنه آب دریاچه‌ها و مخازن سدها، مساحت سطح آب مخزن سد زوجار به صورت ماهانه در ترازهای سطح آب مختلف از آوریل ۲۰۱۳ تا فوریه ۲۰۲۴ محاسبه شد. در جدول ۳ و شکل ۱۱ روند تغییرات مساحت

سطح آب مخزن در این بازه زمانی بررسی و ارائه شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، از اطلاعات پایگاه داده استفاده شده است. $A_{computed}$ و A_{DAHITI} در جدول ۲ به ترتیب مساحت سطح آب به دست آمده از محاسبات و پایگاه داده می‌باشند.

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری مساحت سطح آب مخزن سد زوجار بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴، بر حسب کیلومتر مربع.

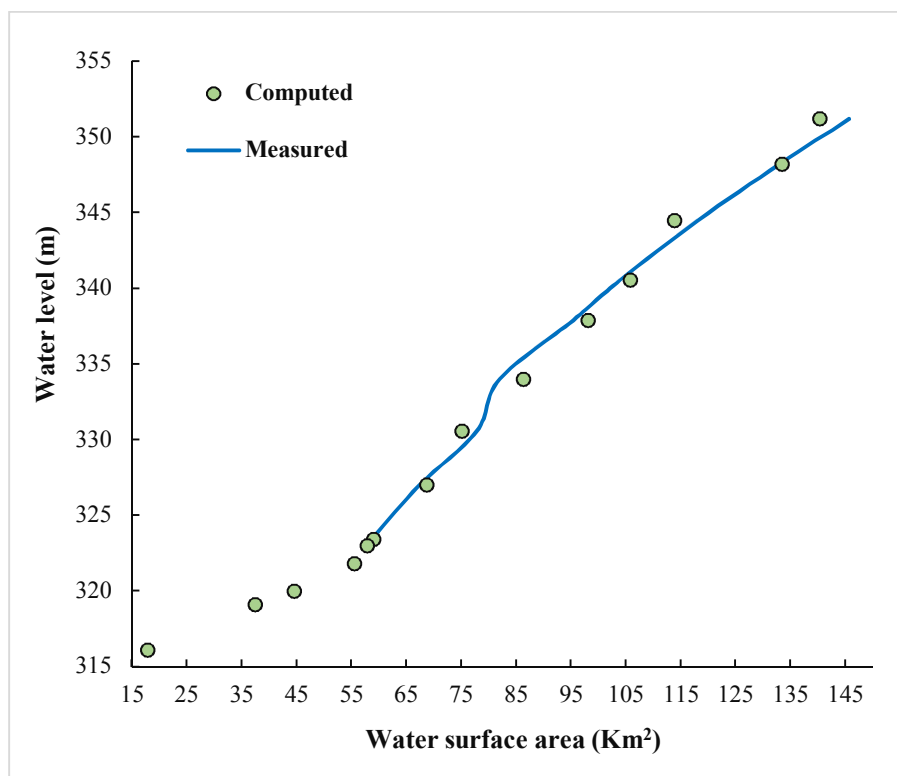
Date	Water level (m)	$A_{initial}$	A_{fill}	A(P)	$A_{computed}$	A_{DAHITI}	Error (%)
Apr 2013	351.2	138.8	1.5	138.3	140.3	145.7	3.7
Aug 2014	348.2	131.1	2.3	132.8	133.4	133.0	0.3
Jul 2016	344.4	112.4	1.4	122.5	113.8	118.1	3.6
Jan 2017	340.5	104.9	0.8	106.7	105.7	104.0	1.6
Jun 2018	337.9	97.7	0.4	101.1	98.1	95.4	2.8
Mar 2019	334.0	83.8	2.5	84.5	86.3	82.0	1.9
Jun 2019	330.5	74.3	0.8	75.5	75.1	77.8	3.4
Jan 2020	327.0	67.8	0.9	68.1	68.7	67.4	1.9
Feb 2021	321.84	54.1	1.4	53.2	55.5	-	-
May 2022	319.1	36.3	1.1	38.2	37.4	-	-
Apr 2023	319.9	42.2	2.3	48.6	44.5	-	-
Sep 2023	316.1	16.2	1.6	14.8	17.8	-	-
Feb 2024	323.0	56.5	1.3	59.1	57.8	-	-

مساحت سطح آب مخزن این سد از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ حدود ۲/۴ درصد محاسبه شد. خطای بسیاری از روش‌های محاسبه سطح آب تا ۱۰ درصد نیز گزارش شده است (۱۵، ۱۶) که بر این اساس مقدار خطای محاسبه شده در این پژوهش با استفاده از روش پیشنهادی قابل قبول می‌باشد. در جدول ۲ برخی مقادیر محاسبه شده مساحت سطح آب برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ نیز آورده شده است که به دلیل عدم وجود اطلاعات پایگاه داده در این بازه زمانی مقادیر خطا در محاسبات با خط تیره نشان داده شده است.

مقایسه مقادیر ستون‌های $A_{computed}$ و $A_{initial}$ در جدول ۲ نشان می‌دهد که ترکیب پنج شاخص آبی برای تعیین آستانه بین مناطق آب و خشکی بدون در نظر گرفتن شکاف داده‌ها نیز می‌تواند دقت قابل‌قبولی برای محاسبه سطح آب ارائه دهد که با به‌کارگیری رابطه ۶ و محاسبه A_{fill} می‌توان آن را تا حد زیادی بهبود بخشید. مطابق شکل ۳ و با توجه به این‌که مقادیر مساحت سطح آب برای مخزن سد زوجار در پایگاه داده تا اول ژانویه ۲۰۲۰ در دسترس می‌باشد، خطای روش پیشنهادی تا این زمان مدنظر قرار گرفت. بر این اساس میانگین خطای محاسبات

تراز و سطح آب مخزن شده است. شکل ۱۱ مساحت‌های سطح آب محاسبه شده در ترازهای مختلف در مقایسه با منحنی سطح-ارتفاع مخزن (پایگاه داده) را نشان می‌دهد.

نتایج محاسبه مساحت سطح آب بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ابتدای ۲۰۲۴ برای مخزن سد زوجار و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط پایگاه داده نشان می‌دهد که در این سال‌ها حجم آب ذخیره شده در مخزن روندی کاهشی داشته و باعث کاهش

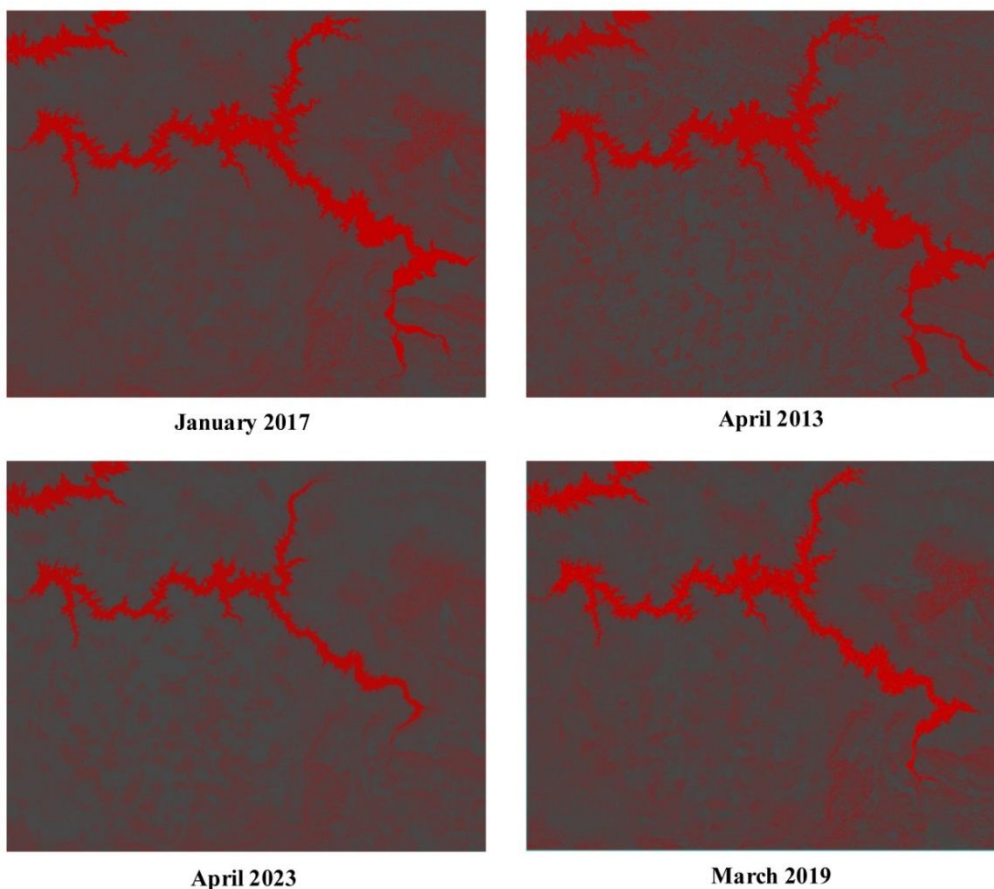


شکل ۱۱- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با منحنی سطح-ارتفاع پایگاه داده.

Figure 11. Comparing the results of the proposed method with the area-elevation curve of DAHITI database.

در زمان کم‌آبی، مناطقی که دارای احتمال آب کم‌تری هستند روند کاهش سطح آب در آنها نسبت به مناطق با احتمال آب بالاتر با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد.

شکل ۱۲ مساحت نهایی سطح آب مخزن و روند کاهشی آن را برای چهار زمان مختلف با استفاده از روشی که بیان شد به خوبی نشان می‌دهد. با مقایسه مساحت‌های نهایی پهنه آب (شکل ۱۲) و پهنه احتمال آب بلندمدت (شکل ۱۰) مشخص می‌شود



شکل ۱۲- مقایسه روند تغییرات مساحت سطح آب مخزن سد زوجار طی بازه ده ساله.

Figure 12. Comparison of the changes in zujar water surface area in a ten-years period.

علاوه بر مخازن سدها می‌تواند در سایر پهنه‌های آبی از جمله دریاچه‌ها و تالاب‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد. دقت در محاسبات، کم‌ترین هزینه اقتصادی و صرفه‌جویی در زمان از مزایای مهم این روش محسوب می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش برگرفته شده از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول می‌باشد که حاصل تحقیقات و پژوهش‌های وی در گروه مهندسی آب

نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج به‌دست آمده با اطلاعات پایگاه داده نشان داد روش پیشنهادی دقت بالایی در محاسبه مساحت پهنه‌های آبی دارد که می‌تواند در مباحث مختلف هیدرولیکی و هیدرودینامیکی مثل روندیابی سیلاب، شبیه‌سازی پخش‌وانتقال مواد آلاینده، تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخازن با انتگرال‌گیری بین کم‌ترین و بیش‌ترین مساحت به‌دست آمده، مقدار تبخیر آب از سطح و غیره مورد استفاده قرار گیرد. این روش می‌تواند در بازه زمانی بلندمدت بدون نیاز به نقشه توپوگرافی کف، در ترازهای سطح آب دلخواه و با استفاده از مقایسه مساحت پهنه آب در دو یا چند زمان مختلف حجم رسوب انباشته‌شده به دلیل وقوع سیلاب‌های متعدد را برآورد کند. روش پیشنهادی

نویسنده دوم: نظارت تحقیق، مشارکت در آنالیزها.
نویسنده سوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، بازبینی
مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این
اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید
همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت
دانشجویی نویسنده اول/ دوم/ سوم ... این مطالعه بوده
است.

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
می‌باشد. بخشی از داده‌های این پژوهش از سایت
مؤسسه تحقیقات ژئودتیک دانشگاه فنی مونیخ آلمان
به نشانی اینترنتی <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>
استخراج شده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این
مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دسترسی به داده‌ها، آماده‌سازی داده‌ها،
انجام محاسبات و مدل‌سازی، تهیه پیش‌نویس مقاله.

منابع

1. Hasan, M., Moody, A., Benninger, L., & Hedlund, H. (2019). How war, drought, and dam management impact water supply in the Tigris and Euphrates Rivers. *Ambio*, 48, 264-79.
2. Schwatke, C., Dettmering, D., & Seitz, F. (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1606.
3. Memon, A. A., Muhammad, S., Rahman, S., & Haq, M. (2015). Flood monitoring and damage assessment using water indices: A case study of Pakistan flood-2012. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 99-106.
4. Amani, M., Salehi, B., Mahdavi, S., & Brisco, B. (2018). Spectral analysis of wetlands using multi-source optical satellite imagery. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 144, 119-36.
5. Condeça, J., Nascimento, J., & Barreiras, N. (2022). Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. *Water Resources Research*, 58 (3), e2021WR030026.
6. Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis*. New York: Oxford University Press.
7. Feng, M., Sexton, J. O., Channan, S., & Townshend, J. R. (2016). A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: First results of a topographic-spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 9(2), 113-33.
8. Liu, S., Wu, Y., Zhang, G., Lin, N., & Liu, Z. (2023). Comparing water indices for landsat data for automated surface water body extraction under complex ground background: a case study in Jilin Province. *Remote Sensing*, 15(6), 1678.
9. Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétaux, J. F. (2019). Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210.
10. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14), 3025-33.

11. Ding, F. (2009). Study on information extraction of water body with a new water index (NWI). *Sci. Surv. Mapp.* 34(4), 155-8.
12. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote sensing of environment.* 140, 23-35.
13. Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976). The tasseled cap--a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In LARS symposia (p. 159).
14. Fang, Y., Li, H., Wan, W., Zhu, S., Wang, Z., Hong, Y., & Wang, H. (2019). Assessment of water storage change in China's lakes and reservoirs over the last three decades. *Remote Sensing.* 11(12), 1467.
15. Schwatke, C., Scherer, D., & Dettmering, D. (2019). Automated extraction of consistent time-variable water surfaces of lakes and reservoirs based on landsat and sentinel-2. *Remote Sensing.* 11(9), 1010.
16. Yulianto, F., Kushardono, D., Budhiman, S., Nugroho, G., Chulafak, G. A., Dewi, E. K., & Pambudi, A. I. (2022). Evaluation of the threshold for an improved surface water extraction index using optical remote sensing data. *The Scientific World Journal.*
17. Bonnema, M., David, C. H., Frasson, R. P., Oaida, C., & Yun, S. H. (2022). The global surface area variations of lakes and reservoirs as seen from satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters.* 49(15), e2022GL098987.
18. Sadki, M., Munier, S., Boone, A., & Ricci, S. (2023). Implementation and sensitivity analysis of the Dam-Reservoir Operation model (DROP v1. 0) over Spain. *Geoscientific Model Development.* 16(2), 427-48.
19. Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote sensing of environment.* 122, 11-21.
20. Dettmering, D., Schwatke, C., Boergens, E., & Seitz, F. (2016). Potential of ENVISAT radar altimetry for water level monitoring in the Pantanal wetland. *Remote Sensing.* 8(7), 596.
21. Crétaux, J. F., Arsen, A., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M. C., Nino, F., Del Rio, R. A., Cazenave, A., & Maisongrande, P. (2011). SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in space research.* 47(9), 1497-507.
22. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing.* 17(7), 1425-32.
23. Crist, E. P. (1985). A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote sensing of Environment.* 17(3), 301-6.

