

Estimation of stored Water Volume in reservoir dams using satellite images and multi-variable linear regression model

Hamed Feiz Abady¹, Abdolreza Zahiri^{*2}, Khalil Ghorbani³

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, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zahiri@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 01.29.2024
Revised: 03.12.2024
Accepted: 04.06.2024

Keywords:
DAHITI database,
Multivariate linear regression,
Satellite imagery,
Volume of stored water,
Water depth estimation,
Zujar Dam

ABSTRACT

Background and Objectives: Water resources have always been a critical issue in human life. Reservoirs, as one of the key water sources, require an accurate assessment of their stored water volume for optimal utilization and planned management. Traditional methods for determining water volume, relying on water surface elevation and the volume-depth curve, often necessitate costly and time-consuming corrections due to factors such as floods. This research proposes a new approach to estimating the volume of water stored in a dam reservoir using the relationship between satellite images and water depth, aiming to enhance water resource management efficiency and cost-effectiveness.

Materials and Methods: To estimate the stored water volume in the Zujar dam reservoir (with a maximum storage capacity of 3.2 billion cubic meters) using remote sensing based on the water depth estimation, Landsat8 OLI satellite images were downloaded. After applying radiometric corrections, bands and spectral indices related to different pixels of the image were extracted. Due to the huge input data matrix and the time-consuming nature of multivariate linear regression modeling, a code was developed in Matlab software. The new dataset was then introduced to the Minitab software for linear regression equation fitting. Measured water depths from the DAHITI database were considered as dependent variables, while bands and spectral indices were selected as independent variables for the multivariate linear regression.

Results: The results obtained from the water depth equation at three different time intervals (2013, 2019, and 2020) showed that the minimum and maximum root mean square error (RMSE) values in depth calculation were 1.00 and 1.35 meters, respectively, with an average of 1.21 meters. Moreover, the minimum and maximum errors in estimating water stored volume were 3.88% and 14.85%, respectively, with an average of 9.25% for three dates that said. Considering that observed water depths during this period ranged from 16.5 to 39.5 meters, the results indicate acceptable accuracy. Analyses revealed that the normalized difference water index (NDWI) and near-infrared (NIR) band from the spectral indices of satellite imagery had the highest significant correlation with water depth, with coefficients of determination of 0.94 and 0.85, respectively.

Conclusion: The obtained results suggest that a linear regression relationship can be established between measured water depth and extracted spectral bands from satellite images for depths up to approximately 40 meters. This not only ensures accuracy in water depth estimation but also provides acceptable precision in estimating the volume of water stored in the reservoir. Improving and enhancing this approach could enable long-term volume estimation of reservoirs, contributing to better water resource management.

Cite this article: Feiz Abady, Hamed, Zahiri, Abdolreza, Ghorbani, Khalil. 2025. Estimation of stored Water Volume in reservoir dams using satellite images and multi-variable linear regression model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (4), 159-178.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22147.3708

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن سدها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۰۲/۱۱/۰۹ تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۱/۱۸</p> <p>واژه‌های کلیدی: پایگاه داده DAHITI، تصاویر ماهواره‌ای، حجم ذخیره آب، رگرسیون خطی چندمتغیره، سد زوجار، عمق‌سنجی آب</p>	<p>سابقه و هدف: منابع آب همواره به عنوان یکی از مسائل حیاتی زندگی بشر مطرح بوده است. یکی از مهم‌ترین منابع تامین آب، مخازن سدها می‌باشند که اطلاع از مقدار آب ذخیره شده در آن‌ها دارای اهمیت می‌باشد و برآورد دقیق‌تر آن برای استفاده بهینه و برنامه‌ریزی شده از این ذخایر باارزش، امری ضروری است. روش معمول برای تعیین حجم آب ذخیره شده در مخازن، استفاده از تراز سطح آب (اشل) و منحنی حجم-ارتفاع مخزن است. تغییر منحنی حجم-ارتفاع مخزن بر اثر عواملی مثل سیلاب‌ها باعث می‌شود که استفاده مجدد از آن نیازمند تصحیح منحنی اولیه باشد که با صرف هزینه و زمان زیاد همراه است. در این پژوهش یک روش جدید برای تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد با استفاده از ارتباط بین تصاویر ماهواره‌ای و عمق آب ارائه شده است تا علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌ها بتوان مدیریت منابع آبی را بهبود بخشید.</p> <p>مواد و روش‌ها: به منظور تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن سد با استفاده از عمق‌سنجی آب به روش سنجش از دور، ابتدا تصاویر ماهواره Landsat8 OLI مربوط به مخزن سد زوجار (با حداکثر ظرفیت ذخیره ۳/۲ میلیارد مترمکعب) واقع در کشور اسپانیا دانلود و پس از اعمال تصحیحات رادیومتریکی، باندها و شاخص‌های طیفی مربوط به پیکسل‌های مختلف تصویر استخراج شد. به دلیل حجم بسیار بالای ماتریس داده‌های ورودی، مدل‌سازی و استخراج رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره مسئله‌ای زمانبر و طولانی است. برای کاهش تعداد داده‌ها و افزایش سرعت انجام محاسبات، یک کد در محیط نرم‌افزار Matlab نوشته شد و سپس داده‌های جدید برای مدل‌سازی به روش رگرسیون خطی به نرم‌افزار Minitab معرفی شدند. عمق‌های آب واقعی تهیه شده از پایگاه داده DAHITI به‌عنوان متغیرهای ورودی وابسته و باندها و</p>

شاخص‌های طیفی به‌عنوان متغیرهای ورودی مستقل برای برازش رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شدند.

یافته‌ها: نتایج حاصل از رابطه عمق‌سنجی آب در سه زمان مختلف با فاصله زمانی مناسب (سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار RMSE در محاسبه عمق آب به ترتیب ۱/۰۰ و ۱/۳۵ متر و میانگین آن ۱/۲ متر می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین و بیش‌ترین خطای تخمین حجم آب به ترتیب ۳/۸۸ و ۱۴/۸۵ درصد و میانگین آن برای سه زمان مورد بررسی ۹/۲۵ درصد به‌دست آمد. با توجه به این‌که در طول این مدت (از سال ۲۰۱۳ تا سال ۲۰۲۰)، کم‌ترین و بیش‌ترین عمق آب مشاهداتی به ترتیب ۱۶/۵ و ۳۹/۵ متر می‌باشند نتایج به‌دست آمده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. بررسی‌ها نشان داد که در عمق‌سنجی ماهواره‌ای از میان متغیرهای ورودی شاخص طیفی آب تفاضلی نرمال‌شده NDWI و باند مادون قرمز نزدیک NIR به‌ترتیب با ضرائب تبیین ۰/۹۴ و ۰/۸۵ بیش‌ترین ارتباط معنادار را با تغییرات عمق آب دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده نشان داد که می‌توان بین عمق آب واقعی و باندهای طیفی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای تا اعماق حدود ۴۰ متر رابطه‌ای به شکل رگرسیون خطی چندمتغیره نوشت که علاوه بر دقت در عمق‌سنجی آب از دقت قابل‌قبولی در تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن نیز برخوردار باشد تا با بهبود و ارتقا آن بتوان حجم آب مخازن را در بازه‌های زمانی طولانی برآورد کرد.

استناد: فیض‌آبادی، حامد، ظهیری، عبدالرضا، قربانی، خلیل (۱۴۰۳). تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن سدها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رگرسیون خطی چندمتغیره. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۱۷۸-۱۵۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22147.3708



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

منابع آب همواره به‌عنوان یکی از مسائل حیاتی زندگی بشر مطرح بوده‌است. یکی از مهم‌ترین سامانه‌های منابع آب، مخازن سدها می‌باشند که به دلایل مختلفی مثل تولید انرژی برق‌آبی، ذخیره‌سازی و تأمین آب برای کشاورزی، شرب و صنعت، کنترل سیلاب و ایجاد مکان‌های تفریحی از جمله ماهیگیری، شنا و کایاک‌سواری دارای اهمیت زیادی هستند. فقط ۰/۱۳ درصد از حجم کل آب‌های جهان در دریاچه‌ها و مخازن سدها ذخیره می‌شوند که اغلب تحت‌تأثیر تغییرات آب‌وهوایی قرار دارند (۱). در دهه‌های اخیر تعداد سیلاب‌های گزارش‌شده در بسیاری از کشورها به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است که این امر سبب شده تغییرات آب‌وهوایی در رسانه‌ها، جوامع و به‌ویژه در بین فعالان و مبتکران این حوزه موردتوجه ویژه قرار گیرد، هم‌زمان تأثیر فعالیت‌های انسانی مثل ساخت سدها بر آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است. در بدترین حالت ممکن، کمبود آب ناشی از تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به بحران‌های سیاسی و جنگ شود و خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر جوامع تحمیل کند که جلوگیری از آن مستلزم مدیریت پایدار منابع آب در کشورها می‌باشد. بنابراین نظارت مستقل بر منابع آب‌های داخلی هر کشوری امری ضروری است. در سال‌های اخیر مسائل محیط زیستی، کاهش کیفیت آب و کمبود برق در شبکه توزیع انرژی که به موجب خشکسالی‌های بی‌سابقه رخ داده‌است و نیز طغیان رودخانه‌ها و وقوع سیلاب‌ها باعث آشکارتر شدن اهمیت مدیریت صحیح سدها در ایران شده است. برای استفاده بهینه و مدیریت مناسب این منابع آبی مهم همواره لازم است که در شرایط مختلف زمانی، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد معلوم باشد. یکی از روش‌های مرسوم برای برآورد حجم

آب در مخازن، استفاده از منحنی حجم-ارتفاع سد است که در زمان ساخت سد و به کمک نقشه‌برداری تهیه می‌گردد. در طی مدت بهره‌برداری از سد، به‌تدریج رسوب‌گذاری در مخزن اتفاق افتاده که منحنی حجم-ارتفاع اولیه را تغییر می‌دهد (۲). به همین دلیل باید در فواصل زمانی مختلف، عملیات هیدروگرافی انجام شود. طبق اطلاعات مرکز داده‌های رواناب جهانی، عملیات هیدروگرافی مخازن سدها از سال ۱۹۸۰ تاکنون به‌طور پیوسته و به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه روندی کاهشی داشته است (۳). پرهزینه بودن، زمان‌بر بودن و ایمنی از دلایل کاهش اندازه‌گیری‌ها در محل می‌باشد. از طرفی با توجه به این‌که مدیریت و پایش سدها در شرایط حساس کنونی نیازمند اطلاعات به‌روز، کم‌هزینه و با قابلیت دسترسی آسان می‌باشد، به‌کارگیری روش‌های جدید امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری است. از دهه ۱۹۷۰ میلادی علم سنجش‌ازدور داده‌های ارزشمندی را برای نظارت بر چرخه آب جهانی و تغییرات آن فراهم کرده است. اولین بار عمق‌سنجی ماهواره‌ای در سال ۱۹۹۰ برای نظارت بر تراز سطح آب دریاها و تغییرات آن‌ها استفاده شد و بیش از دو دهه ارزش و کارایی خود را اثبات کرد. در دهه‌های گذشته ماهواره‌های مختلفی برای تصویربرداری در مدار خود قرار گرفته و شروع به ارائه تصاویر با وضوح بالا و تولید مجموعه‌ای از داده‌ها برای استخراج اطلاعات کرده‌اند که با گذشت زمان، ضمن ارتقاء کیفیت تصویربرداری‌ها، خطاهای آن‌ها نیز رو به کاهش است. همین امر سبب توجه بیش‌ازپیش پژوهش‌گران مختلف به تصاویر ماهواره‌ای شده است تا به‌عنوان روشی نوین برای کاربرد در زمینه‌های متنوع مورد استفاده قرار گیرند. از موارد کاربرد تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به پایش تغییرات کاربری اراضی (۴)، به‌هنگام‌سازی نقشه‌های بزرگ‌مقیاس (۵)،

یافتند که خطای نسبی این تغییرات در حدود ۸/۳ درصد به دست آمد (۳). Quang و همکاران (۲۰۲۱) با هدف مدیریت پایدار منابع آبی و مقابله با خطرات زیست‌محیطی در استان کوانگ‌نام ویتنام به بررسی تراز سطح آب و مساحت پهنه آبی مخازن سدهای Giang و Sonh Tranh پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat8 OLI/TIR و شاخص‌های MNDWI و NDWI به شبیه‌سازی مساحت پهنه آبی در ترازهای مختلف سد پرداخته و به کمک آن، منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن سد را استخراج کردند (۱۷). Gourgouletis و همکاران (۲۰۲۲) به منظور تخمین تراز سطح آب، مساحت گستره آبی و نیز تغییرات حجم آب در مخازن سدها، روش جدیدی را بر مبنای مشاهدات در محل و قابلیت داده‌های سنجش‌ازدور توسعه دادند. آنها این روش را در مخزن Yliki در کشور یونان با استفاده از شاخص NDWI و تصاویر ماهواره Sentinel 2 ارزیابی کردند که مطابق نتایج، خطای این روش در محاسبه تغییرات حجم آب مخزن ۳/۸۶ درصد گزارش شد (۱۸). Yao و همکاران (۲۰۲۲) برای محاسبه نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها، هشت سد را به عنوان منطقه مطالعاتی در ایالات متحده آمریکا انتخاب کرده و با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel 2 مساحت پهنه آب را به ازاء تمام ترازهای سطح آب در محدوده حداکثر و حداقل برآورد نمودند. سپس با انتگرال‌گیری از مساحت‌های به دست آمده بین دو تراز سطح آب، حجم ذخیره آب را محاسبه نمودند. آن‌ها با مقایسه حجم ذخیره به دست آمده نسبت به حجم اولیه مخزن در زمان بهره‌برداری برای یک تراز ثابت، به سرعت رسوب‌گذاری با میزان خطای ۰/۰۵ درصد در سال دست یافتند (۱۹). با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص می‌شود که برای محاسبه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد در تراز

امور مطالعاتی و آموزش علم جغرافیا (۶)، پایش اثرات محیط‌زیستی عناصر سنگین (۷)، مطالعه و بررسی هیدرولوژی آب‌های سطحی (۸)، بررسی شوری و دمای سطح آب (۹)، بررسی تغییرات کیفیت آب (۱۰، ۱۱) و بررسی رسوبات معلق در آب‌های سطحی (۱۲) اشاره کرد. همچنین مطالعات مختلفی در زمینه محاسبه عمق آب دریاها و دریاچه‌ها در مناطق کم‌عمق و نیز تخمین حجم ذخیره آب در مخازن سدها انجام شده است (۱۳، ۱۴). محمدخانلو و همکاران (۲۰۱۹) عمق آب در سواحل دریای عمان را با استفاده از ماهواره Sentinel 2 و به کمک مدل‌های رگرسیون خطی چندباندی و استامپ برآورد نمودند. پس از اجرای مدل رگرسیون خطی، مقادیر عمق آب در محدوده ۲۰-۰ متر با دقت مناسبی محاسبه گردید و مدل ارتفاعی هندسه بستر دریا استخراج شد (۱۵). کریمی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat OLI، مناطقی از سواحل دریای خزر (حداصل نیروگاه نکا تا بندر امیرآباد در استان مازندران) را عمق‌سنجی نمودند. به این منظور با اندازه‌گیری بیش از ۲۷۰۰ نقطه در محدوده عمق آب ۱۱-۲ متر، رابطه‌ای بر مبنای رگرسیون خطی چندمتغیره بین عمق آب و باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای و نیز شاخص طیفی استخراج نمودند که میانگین خطای این محاسبات حدود ۷/۶ درصد به دست آمد (۱۶). Schwatke و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و ایجاد یک مدل هیپسومتری بر اساس الگوریتم Strahler اصلاح شده از ترکیب تراز سطح آب و مساحت‌های متناظر با آن، محاسبه تغییرات حجم بین حداقل و حداکثر مساحت پهنه آبی و در نهایت با ترسیم منحنی‌های حجم-سطح-ارتفاع بر روی ۲۸ دریاچه و مخزن سد در ایالت تگزاس به مدل بهبود یافته‌ای برای تخمین سری‌های زمانی تغییرات حجم آب مخزن دست

اکسترمادورا^۲ اسپانیا ساخته شد. این سد از نوع بتنی- وزنی با ۸ ساحل، ارتفاع ۶۰/۵ متر از کف و طول تاج ۳۵۰ متر می‌باشد. مخزن سد زوجار متعلق به حوضه رودخانه گادیانا^۳ می‌باشد که در طول جغرافیایی $38^{\circ}49'29''N$ و $5^{\circ}23'18''W$ واقع شده است. حداکثر و حداقل تراز سطح آب مخزن این سد در محدوده زمانی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۳ به ترتیب ۳۱۶/۰۹ و ۳۵۱/۲۸ متر بوده است. حداکثر ظرفیت ذخیره مخزن در زمان بهره‌برداری در تراز سطح آب ۳۵۲ متر حدود ۳/۲ میلیارد مترمکعب گزارش شده است (۲۰).

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مخزن سد: پایگاه داده DAHITI به نشانی <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/> که از معتبرترین و کامل‌ترین مجموعه داده‌های هیدرولوژیکی با سری‌های زمانی مختلف شامل تراز سطح آب، منحنی‌های حجم-ارتفاع، نقشه‌های توپوگرافی مخازن سدها و ... در اکثر مناطق جهان است، به‌عنوان مرجع داده‌های ورودی منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. از این پایگاه برای مخزن موردنظر، داده‌های تراز سطح آب مخزن سد در بازه زمانی ۱۹۹۷-۲۰۲۴ (شکل ۲)، داده‌های حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد در بازه زمانی ۱۹۸۶-۲۰۲۰ (شکل ۳) و نیز نقشه توپوگرافی مخزن به‌روز شده در سال ۲۰۱۹ (شکل ۵) استخراج شد (۲۱).

دلخواه، تاکنون اغلب از روش محاسبه مساحت پهنه آب در ترازهای مختلف و انتگرال‌گیری بین این مساحت‌ها استفاده شده است. انجام این فرآیند نیازمند استفاده از تعداد بسیار زیادی تصویر ماهواره‌ای است. همچنین به‌علت عدم وقوع ترازهای پایین سطح آب در یک مدت زمان مشخص و یا به‌دلیل محدودیت در کاهش تراز سطح آب (مثل مخزن سد دز که دارای یک تراز حداقل سطح آب معادل تراز آبگیر نیروگاه است)، ممکن است تهیه تصاویر ماهواره‌ای متناظر با این ترازها دشوار یا غیرممکن باشد. به همین دلیل در این مطالعه از روشی جدید و ساده‌تر برای تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخازن سدها بدون محدودیت مذکور استفاده شده است که با توسعه آن در آینده می‌توان به نتایج بهتری دست‌یافت. در روش پیشنهادی، با استفاده از یک تصویر ماهواره‌ای در تراز سطح آب دلخواه، حجم آب به کمک عمق‌سنجی مخزن محاسبه خواهد شد. به این منظور باید بین باندهای مختلف تصویر ماهواره‌ای و عمق واقعی آب در نقاط مختلف مخزن سد رابطه‌ای معنادار استخراج شود. دقت نتایج این روش برای یک مخزن سد در کشور اسپانیا و در زمان‌های کم‌آبی و پرآبی مخزن ارزیابی شده است. دلیل انتخاب این مخزن در دسترس بودن اطلاعاتی مانند تراز سطح آب، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن و نقشه توپوگرافی به‌روز مخزن در پایگاه داده جهت مقایسه نتایج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

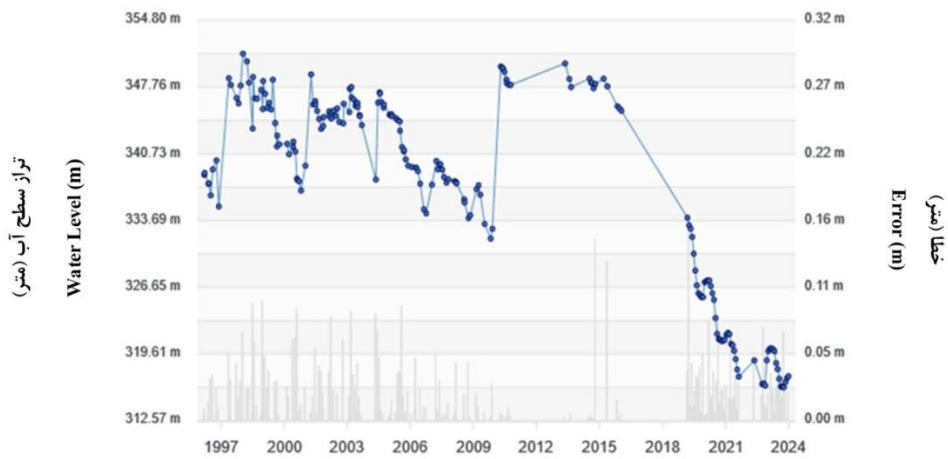
به‌منظور انجام عملیات عمق‌سنجی، مخزن سد زوجار^۱ در کشور اسپانیا به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید (شکل ۱). این سد در سال ۱۹۶۴ بر بستر رودخانه زوجار واقع در استان باداخوز

2- Badajoz Extremadura
3- Guadiana

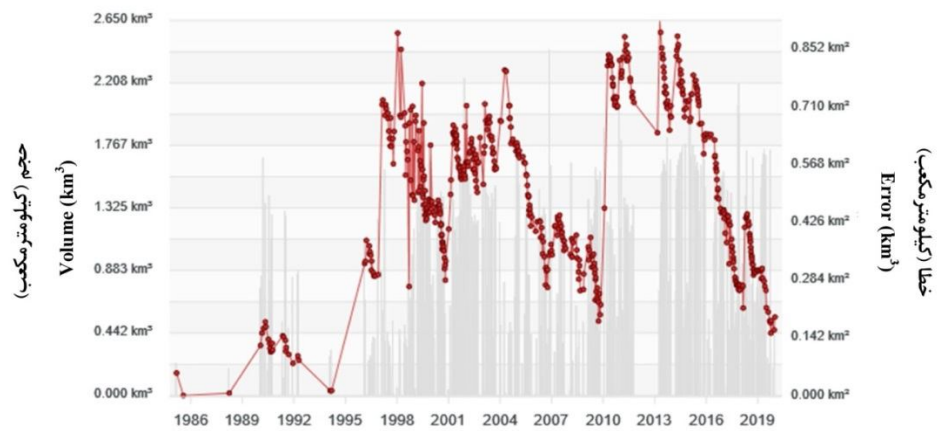
1- Zujar



شکل ۱- منطقه مطالعاتی (مخزن سد زوجار).
Figure 1. Study Area (Zujar Dam Reservoir).



شکل ۲- نمودار سری زمانی تراز سطح آب (متر).
Figure 2. Time Series of Water Level Variations (m).



شکل ۳- نمودار سری زمانی تغییرات حجم آب مخزن (کیلومتر مکعب).
Figure 3. Time Series of Water Volume Variations (km³).

گرفته‌است، تصاویر خود را در ۱۱ باند مختلف، تفکیک مکانی ۳۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روز یکبار ثبت و ارائه می‌کند. تصاویر از سایت <https://earthexplorer.usgs.gov/> شامل تصحیحات اتمسفری قابل استخراج می‌باشند (شکل ۴).

تصاویر ماهواره‌ای: برای انجام عملیات عمق‌سنجی آب مخزن سد منطقه مطالعاتی، تصاویر ماهواره Landsat8 OLI به دلیل وضوح بالای تصاویر و نیز قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب انتخاب شدند (۲۲). این ماهواره که از سال ۲۰۱۳ در مدار قرار



شکل ۴- تصویر استخراج شده محدوده مطالعاتی از ماهواره Landsat8 OLI.

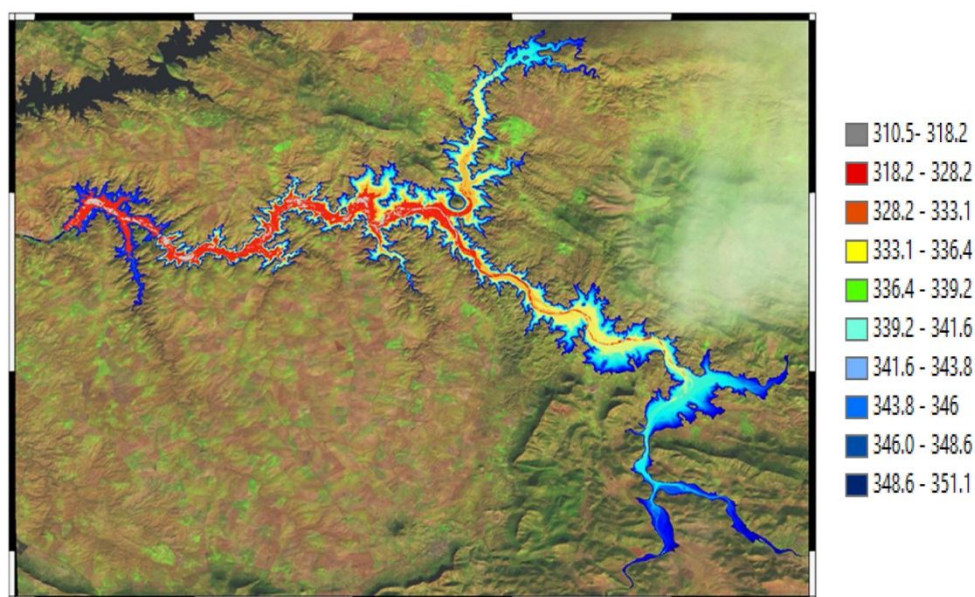
Figure 4. Landsat8 OLI Satellite Image of the Study Area.

روش انجام تحقیق: سنجنده‌های سنجنش‌ازدور از نظر منبع انرژی به دودسته تقسیم می‌گردند. دسته اول خود منبع انرژی هستند که به آن‌ها سنجنده فعال می‌گویند و به سه دسته رادار، لیدار و سونار تقسیم می‌شوند. دسته دوم سنجنده‌های غیرفعال هستند که منبع انرژی آن‌ها نور خورشید بوده و به دو دسته نوری و حرارتی تقسیم می‌گردند. در این مطالعه از تصاویر نوری استفاده شده است که شامل طیف مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز میانی می‌باشند. در این سیستم، ماهواره تابش منعکس شده از سطح اجسام را که ناشی از تابش نور خورشید است، توسط سنجنده‌های خود دریافت نموده و سپس به صورت

فایل تصویری ذخیره و ارسال می‌کند. با توجه به این‌که عوارض و پدیده‌ها دارای قدرت جذب و پخش متفاوتی در طول‌موج‌های مختلف هستند، بنابراین می‌توان اهداف را براساس میزان انرژی که به سمت سنجنده گسیل می‌کنند، شناسایی و تفکیک کرد (۲۳). هنگامی که نور خورشید به آب درون مخزن می‌رسد، مقداری از انرژی آن توسط آب جذب‌شده، مقداری عبور کرده و مقداری نیز به صورت بازتابی متشکل از باندهای مختلف که دارای انرژی‌های متفاوت هستند، به سمت سنجنده بازمی‌گردد (۲۴) که نهایتاً به صورت تصویر ذخیره می‌شود. برای یافتن رابطه‌ای معنادار بین باندهای مختلف تصویر

می‌باشد که در آن کم‌ترین و بیش‌ترین تراز کف مخزن به ترتیب ۳۱۰/۵۲ و ۳۵۱/۱۱ متر گزارش شده است (شکل ۵). در ادامه، مراحل انجام روش پیشنهادی برای تصویر مربوط به تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ شرح داده می‌شود و همین مراحل برای دو تصویر دیگر نیز عیناً تکرار خواهد شد که فقط به ذکر نتایج آن‌ها اکتفا شده است. با توجه به تراز سطح آب در تاریخ مذکور، مقادیر واقعی عمق آب از اختلاف تراز سطح آب و تراز کف مخزن در هر نقطه یا پیکسل دلخواه محاسبه شدند. بر این اساس، بیش‌ترین عمق آب در این مخزن حدود ۳۹/۴۲ متر به دست آمد.

ماهواره‌ای و عمق واقعی آب در نقاط مختلف مخزن سد، با بررسی اطلاعات پایگاه داده DAHITI سه تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳، ۱۹ مارس ۲۰۱۹ و ۱ ژانویه ۲۰۲۰ که داده‌های تراز سطح آب آن‌ها به ترتیب برابر با ۳۵۰، ۳۳۴/۰۲ و ۳۲۷/۱۳ متر و حجم آب آن‌ها به ترتیب حدود ۲/۵، ۰/۸۲ و ۰/۴۸ میلیارد مترمکعب گزارش شده است، انتخاب شدند. این تصاویر، علاوه بر فاصله زمانی مناسب از نظر تغییرات عمق آب نیز بازه مناسبی را پوشش می‌دهند. نقشه رستری توپوگرافی کف مخزن نیز از پایگاه داده DAHITI دانلود شد که شامل ۱۴۵۰۶۳۸ پیکسل ۱۰×۱۰ متر



شکل ۵- تغییرات ارتفاعی (توپوگرافی) کف مخزن (متر).

Figure 5. The Bathymetry Map of Zujar Reservoir.

فایل رستری توپوگرافی مخزن منطبق گردید تا در نهایت ۱۶۱۱۸۲ پیکسل ۳۰×۳۰ متر حاصل شود. با استفاده از باندهای طیفی استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای شاخص‌های طیفی (روابط ۱ تا ۷) شامل شاخص آب تفاضلی نرمال شده NDWI (۲۵)، شاخص نسبت آبی WRI (۲۶)، شاخص آب تفاضلی نرمال شده اصلاح شده MNDWI (۲۷)، شاخص

تصویر ماهواره‌ای پس از دریافت از پایگاه USGS در نرم‌افزار ENVI به صورت یک Layer شامل باندهای ۱ تا ۷ (مرئی و مادون قرمز) و نیز باند حرارتی ساخته شد و پس از تصحیح رادیومتریکی، با روش Dark Subtract مورد تصحیح اتمسفری نیز قرار گرفت. سپس با تصحیح هندسی، هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای بر پیکسل متناظر مکانی خود در

Tasseled Cap Wetness (۳۰) و هم‌چنین برخی نسبت‌های پرکاربرد باندها از جمله B4/B2، B5/B4، B3/B2، B567 و B6×B10 محاسبه شدند (۳۱).

نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI (۲۸)، شاخص استخراج آبی خودکار برای مناطق سایه‌دار AWEIsh (۲۹)، شاخص استخراج آبی خودکار برای مناطق بدون سایه AWEInsh (۲۹) و شاخص

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad (۱)$$

$$WRI = \frac{\text{Green} + \text{Red}}{\text{NIR} + \text{SWIR}_1} \quad (۲)$$

$$MNDWI = \frac{\text{Green} - \text{SWIR}_1}{\text{Green} + \text{SWIR}_1} \quad (۳)$$

$$NDVI = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (۴)$$

$$AWEI_{sh} = \text{Blue} + 2.5 \times \text{Green} - 1.5 \times (\text{NIR} + \text{SWIR}_1) - 0.25 \times \text{SWIR}_2 \quad (۵)$$

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (\text{Green} - \text{SWIR}_1) - (0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR}_2) \quad (۶)$$

$$TC_{wet} = 0.1509 \times \text{Blue} + 0.1973 \times \text{Green} + 0.3279 \times \text{Red} + 0.3406 \times \text{NIR} - 0.7112 \times \text{SWIR}_1 - 0.4572 \times \text{SWIR}_2 \quad (۷)$$

به‌میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد، بدون این‌که دقت چندانی از دست رود. با اجرای این کد با فواصل دلخواه ۰/۰۵ متری، تعداد داده‌ها از ۱۶۱۱۸۲ ردیف به ۷۸۹ ردیف کاهش یافت. در گام بعدی، داده‌های مدل‌سازی به‌صورت تصادفی به دو بخش داده آموزش (۷۰ درصد) و داده آزمون (۳۰ درصد) تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای انجام شد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار متغیرهای ورودی در بخش داده‌های آموزش قرار گرفته و داده‌های بخش آزمون در محدوده بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر متغیرها پراکنده باشند. بعد از انجام این مرحله، با استفاده از

به‌دلیل حجم بسیار بالای ماتریس داده‌های ورودی (شامل ۱۶۱۱۸۲ سطر و ۲۰ ستون شامل باندها، شاخص‌ها و نسبت‌های طیفی) و خروجی (عمق‌های آب محاسباتی)، مدل‌سازی و استخراج رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره مسأله‌ای زمانبر و طولانی است. برای کاهش تعداد داده‌ها و افزایش سرعت انجام محاسبات، یک کد در محیط نرم‌افزار Matlab برنامه‌نویسی شد تا با میانگین‌گیری از عمق‌های آب در فواصل دلخواه (مثلاً ۰/۰۵ یا ۰/۱ متری) و به تبع آن میانگین‌گیری از سایر مقادیر متناظر با عمق آب در ستون‌های مختلف (ورودی‌ها)، حجم دو ماتریس

هر نقطه از مخزن سد برای داده‌های بخش آزمون، مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت حجم آب ذخیره شده در مخزن سد از رابطه ۸ محاسبه گردید که V حجم آب، n تعداد پیکسل‌ها، i معرف یک پیکسل، D عمق آب و عدد ۹۰۰ بیانگر مساحت هر پیکسل به مترمربع می‌باشد.

$$V = 900 \times \sum_{i=1}^{i=n} (D_i) \quad (8)$$

تیبین ۰/۷۹ و باند ساحلی با ضریب تبیین ۰/۶۷ می‌باشد و به‌جز باند حرارتی که بعد از عمق ۲۳ متر سیر نزولی می‌گیرد سایر باندها با افزایش عمق، با کاهش بازتابندگی روبرو می‌شوند. همچنین شاخص‌های طیفی NDVI، MNDWI، WRI، NDWI بیش‌ترین همبستگی و رابطه معنادار را نسبت به تغییرات عمق آب نشان می‌دهند. با توجه به این‌که ضرایب تبیین شاخص‌های طیفی به‌صورت قابل‌توجهی از ضرایب تبیین باندها بزرگ‌تر می‌باشند می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه ممکن است برخی شرایط محیطی مانند دما، கடورت آب، ریزگردها و سایر عوامل بر کیفیت و کمیت مقادیر باندهای دریافتی اثرگذار باشند اما این اثرات نامطلوب بر شاخص‌های طیفی که از نسبت‌های میان باندها به‌دست می‌آیند کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان برای افزایش دقت در رابطه عمق‌سنجی آب با اطمینان بیش‌تری از آن‌ها استفاده کرد. نسبت‌های انتخاب‌شده بین باندها نیز نتایج قابل‌قبولی را نشان می‌دهند. مشابه آنچه در بررسی شاخص‌ها بیان شد به‌نظر می‌رسد که نسبت‌های ساده‌ای که بین باندها برقرار می‌شود نیز تأثیرپذیری کم‌تری در مقابل شرایط نامطلوب محیطی از خود نشان می‌دهند. طبق این نتایج نسبت باند مادون‌قرمز نزدیک به باند قرمز (B5/B4) و همچنین مجموع باندهای مادون‌قرمز نزدیک، مادون‌قرمز کوتاه ۱ و مادون‌قرمز کوتاه ۲ (B567) بیش‌ترین ضریب تبیین

نرم‌افزار Minitab مدل‌سازی رگرسیون خطی چندمتغیره برای داده‌های آموزش به روش گام‌به‌گام انجام شد و بهترین رابطه که در آن عمق آب به عنوان متغیر وابسته و باندها و شاخص‌های طیفی به عنوان متغیرهای مستقل می‌باشند، برازش داده شد. با استخراج این رابطه، کارایی آن در برآورد عمق آب در

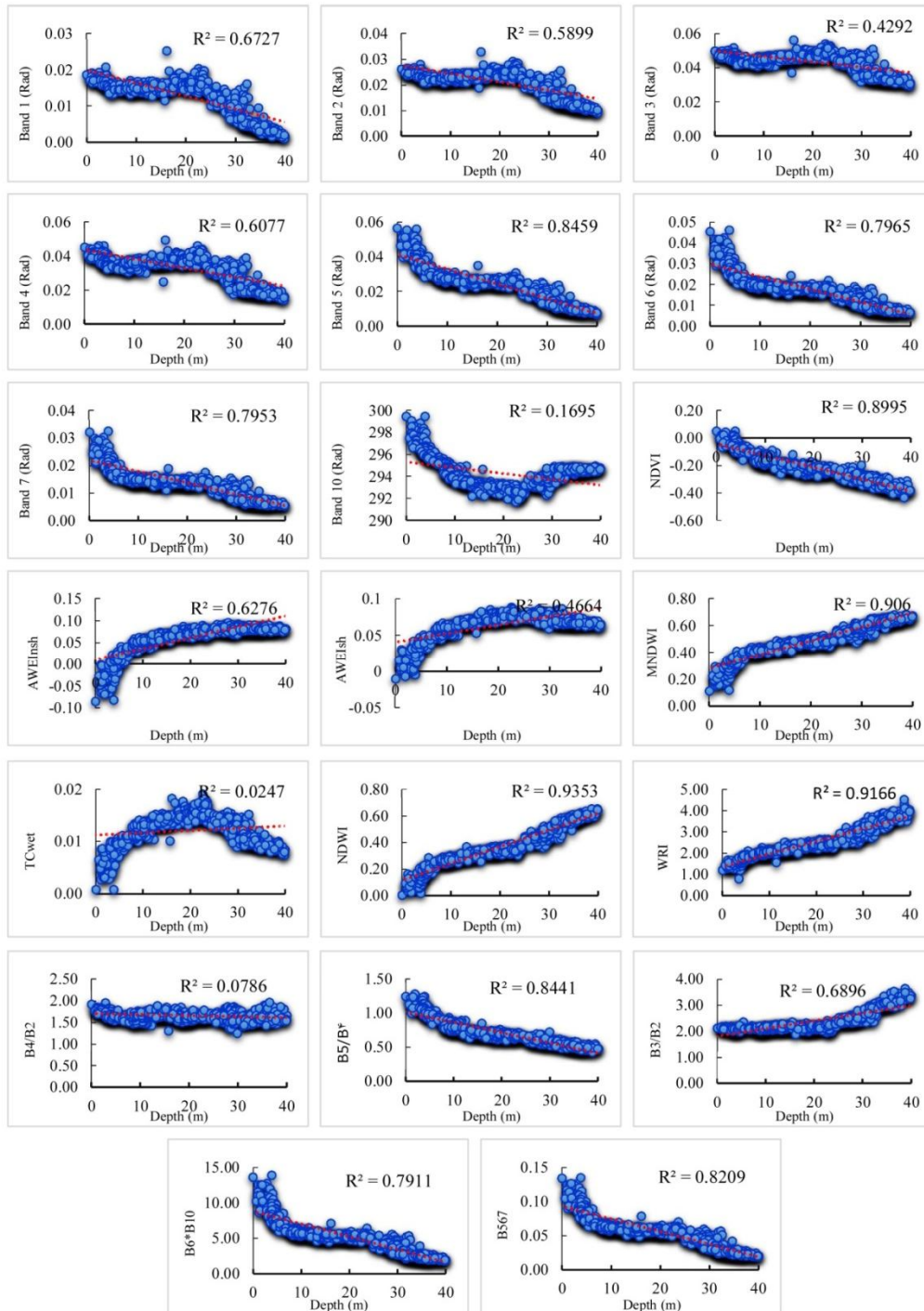
نتایج و بحث

در این بخش نتایج عمق‌سنجی آب مخزن سد زوجار برای تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ ارائه شده و برای دو تاریخ دیگر به ذکر نتایج اکتفا شده است.

الف) بررسی رفتار متغیرهای ورودی نسبت به تغییرات عمق آب: در شکل ۶ نمودار تغییرات هر کدام از متغیرهای ورودی نسبت به تغییرات عمق آب به‌صورت جداگانه ترسیم شده است. مطابق نتایج بدست آمده از بین باندهای مرئی شامل باندهای ۱ تا ۴، باند ۱ (ساحلی) بیش‌ترین ضریب تبیین و رابطه معنادار را با تغییرات عمق دارد که با افزایش عمق آب بازتابندگی آن کاهش می‌یابد. پس از آن به‌ترتیب باندهای ۴ و ۲ (قرمز و آبی) ضرایب تبیین بیش‌تری را نسبت به تغییرات عمق آب دارند و باند ۳ (سبز) نیز کم‌ترین همبستگی و معناداری را نشان می‌دهد. از میان باندهای مادون‌قرمز باندهای ۵، ۶ و ۷ (باندهای مادون‌قرمز نزدیک، مادون‌قرمز کوتاه ۱ و مادون‌قرمز کوتاه ۲) به‌ترتیب دارای بیش‌ترین ضرایب تبیین و معناداری می‌باشند. باند حرارتی بعد از عمق ۲۳ متر تغییر رفتار داده و با افزایش عمق آب سیر صعودی به خود می‌گیرد که در نتیجه در آب‌های عمیق‌تر همبستگی پایین‌تری از خود نشان می‌دهد. بنابراین از میان باندها بیش‌ترین ارتباط معنادار با عمق آب به‌ترتیب متعلق به باند مادون‌قرمز نزدیک با ضریب تبیین ۰/۸۴، باند مادون‌قرمز کوتاه ۱ و ۲ با ضریب

صورت گرفته مشخص شد کدام باند، شاخص و نسبت‌های طیفی می‌توانند در برآزش بهترین رابطه رگرسیونی که عمق آب را با دقت بیشتری برآورد کند تأثیرگذارتر باشند.

($0/82$ ، $0/84$) و ارتباط معنادار را با تغییرات عمق نشان می‌دهند و نسبت باند قرمز به آبی ($B4/B2$) با ضریب تبیین $0/07$ به هیچ عنوان نسبت مناسبی برای بررسی تغییرات عمق آب نیست. با بررسی‌های



شکل ۶- روند تغییرات متغیرهای ورودی نسبت به تغییرات عمق آب واقعی.

Figure 6. The trend of changes in input variables related to the measured Water Depth.

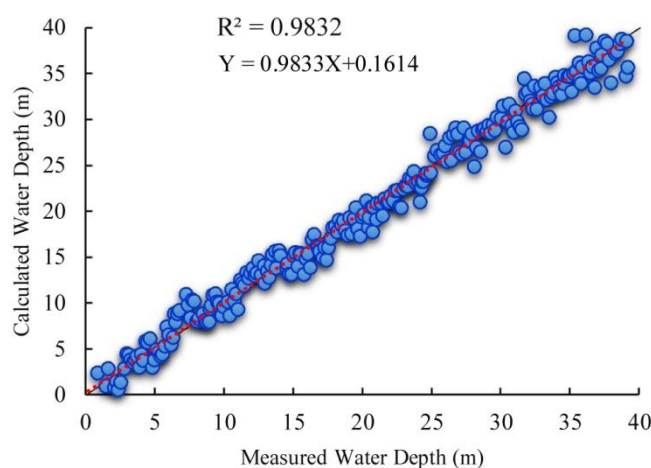
نماینده عمق‌های اولیه بودند به عدد ۷۸۹ کاهش یافت. سپس ۷۰ درصد از این عمق‌ها به صورت تصادفی و با پراکندگی مناسب برای مدل‌سازی رگرسیون خطی به نرم‌افزار Minitab معرفی شدند. در این مرحله از تمام متغیرهای مستقل برای اجرای این عملیات استفاده شد و با استفاده از روش گام‌به‌گام که بر اساس کم‌ترین خطای استاندارد عمل می‌کند رابطه ۹ که شامل ۱۴ متغیر وابسته است به دست آمد:

$$D = 1070.1 - 3024 B1 - 19439 B3 - 7835 B4 + 29088 B7 - 3.769 B10 + 57.4 MNDWI - 2.602 WRI + 4170 AWEI_{nsh} + 19511 TC_{wet} + 16.81 B3/B2 - 24.25 B4/B2 - 29.05 B5/B4 + 106.3 B6 \times B10 - 4186 B567 \quad (9)$$

شده‌اند. مطابق شکل ۷ بین عمق‌های آب محاسباتی و واقعی در بازه عمق صفر تا ۳۹/۴۲ متر رابطه‌ای معنادار با ضریب تبیین بالای ۰/۹۸ وجود دارد که انطباق بالایی بر نیم‌ساز ۴۵ درجه نشان می‌دهد. مقدار RMSE آن نیز حدود ۱/۳۵ متر به دست آمد که برای تغییرات عمق آب حدود ۴۰ متر نتیجه قابل قبولی می‌باشد.

ب) مدل‌سازی رگرسیون خطی چندمتغیره: برای برآزش رابطه رگرسیونی خطی مناسبی که بتواند عمق آب را با دقت بیشتری محاسبه کند علاوه بر متغیرهای ورودی، عمق‌های واقعی آب به عنوان متغیر وابسته مورد استفاده قرار گرفت که محدوده تغییرات آن‌ها از صفر تا ۳۹/۴۲ متر و تعداد آن‌ها ۱۶۰۱۰۸ بود. با اجرای کد میانگین‌گیری از عمق‌ها و با انتخاب فاصله ۰/۰۵ متر برای دسته‌ها، عمق‌های آب جدید که

رابطه ۹ بر روی ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها به‌عنوان داده آزمایش اعمال شد که نمودارهای مقایسه عمق آب محاسباتی نسبت به عمق آب واقعی در شکل ۷، هیستوگرام فراوانی خطای عمق آب محاسباتی در محدوده داده‌های آزمون در شکل ۸ و هم‌چنین نمودار پراکندگی خطای عمق آب محاسباتی در بازه تغییرات عمق آب واقعی در شکل ۹ ارائه

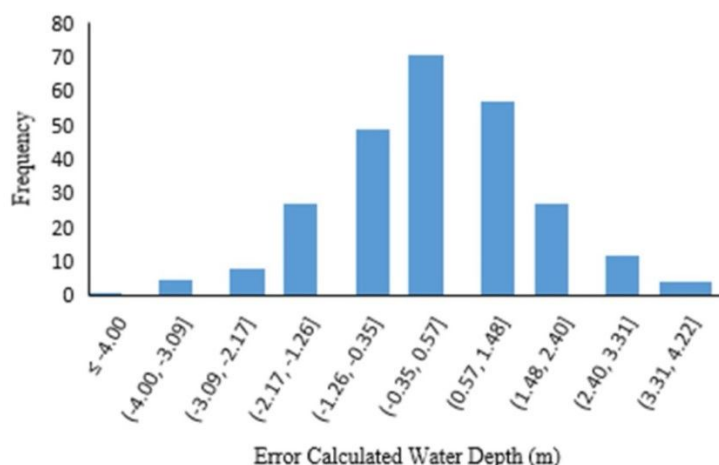


شکل ۷- نمودار پراکندگی عمق آب محاسباتی در مقابل عمق واقعی برای داده‌های آزمون (رابطه ۹).

Figure 7. Scatter Plot of Calculated Water Depth Versus Measured Depth for Test Data (Eq. 9).

محدوده ۱/۲۶- تا ۱/۴۸ متر متمرکز بوده و میانگین اختلاف مقادیر مثبت و منفی ۰/۱۶ متر می‌باشد.

هیستوگرام فراوانی شکل ۸ نشان می‌دهد که از نظر تعداد داده‌ها، بیش‌ترین خطای عمق آب محاسباتی در

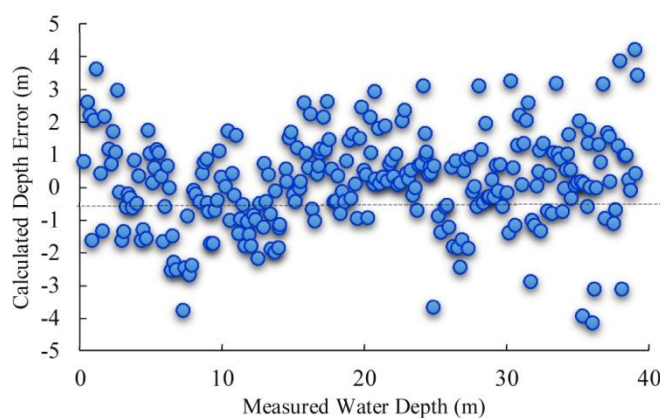


شکل ۸- هیستوگرام فراوانی خطای عمق آب محاسباتی.

Figure 8. Histogram of the frequency of calculated water depth error.

خطاها و همچنین خطاهای حداکثر و حداقل به دست آمده از رابطه ۹ در بازه تغییرات عمق آب بین کم‌ترین و بیش‌ترین عمق تقریباً یکسان می‌باشند.

مطابق نمودار پراکنندگی خطای مدل‌سازی عمق آب در محدوده داده‌های آزمون در شکل ۹، خطای محاسبات لزوماً با افزایش یا کاهش عمق آب تغییرات قابل‌توجهی نشان نمی‌دهد. بر این اساس پراکنندگی



شکل ۹- نمودار پراکنندگی خطای عمق آب محاسباتی.

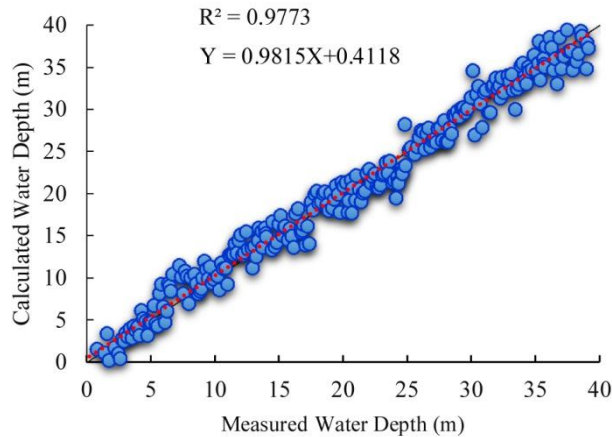
Figure 9. Scatter Plot of Calculated Water Depth Error.

B5/B4 که بیش‌ترین همبستگی را نسبت به تغییرات عمق آب نشان دادند انتخاب شدند و مراحل قبل برای مدل‌سازی عمق آب تکرار شد. رابطه ۱۰ رابطه اصلاح‌شده عمق‌سنجی آب با ۶ متغیر وابسته شامل ۳ باند اصلی و ۳ شاخص طیفی با ضریب تبیین ۰/۹۷ و مقدار RMSE برابر با ۱/۵۸ را نشان می‌دهد.

اگرچه رابطه به دست آمده برای عمق‌سنجی آب نتایج قابل‌قبولی را ارائه می‌دهد اما به منظور سادگی محاسبات و با توجه به بررسی‌های قبلی رفتار متغیرهای ورودی و شناسایی متغیرهای اثرگذار، می‌توان به رابطه‌ای با پارامترهای ورودی کم‌تر دست یافت. به این منظور باندهای ۵، ۶ و ۷، شاخص‌های NDWI، MNDWI، WRI و NDVI و نسبت

$$D = -109.22 + 1032 B5 - 4651 B6 + 7720 B7 + 96.56 NDVI + 171.1 NDWI + 82.1 MNDWI \quad (10)$$

شکل ۱۰ نمودار پراکندگی عمق آب محاسباتی نسبت به عمق آب واقعی را برای رابطه ۱۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی عمق آب محاسباتی در مقابل عمق واقعی برای داده‌های آزمون (رابطه ۱۰).

Figure 10. Scatter Plot of Calculated Water Depth Versus Measured Depth for Test Data (Eq. 10).

رابطه‌ای ساده و مناسب دست یافت که در آن از باندها و شاخص‌های طیفی که با تغییرات عمق آب رفتار پایدارتری نشان می‌دهند استفاده نمود. مراحل فوق برای تصاویر ماهواره‌ای مخزن سد زوجار برای سال‌های ۲۰۱۹ (با تراز سطح آب ۳۳۴/۰۲ متر) و ۲۰۲۰ (با تراز سطح آب ۳۲۷/۱۳ متر) تکرار شده که نتایج مدل‌سازی در جدول ۱ خلاصه شده است.

نتایج به دست آمده از رابطه ۱۰ نشان داد که از نظر تعداد داده‌ها، بیش‌ترین خطای عمق آب محاسباتی در محدوده ۲/۴۴- تا ۱/۴۳ متر متمرکز بوده و میانگین اختلاف مقادیر مثبت و منفی به ۰/۰۴ متر رسید؛ همچنین حداکثر خطای مثبت از مقدار ۴/۶۹ متر در رابطه ۹ به ۵/۱۲ متر افزایش و حداکثر خطای منفی از مقدار ۴/۲۲- به ۴/۱۲- متر کاهش یافت. نتایجی که برای معادلات ۹ و ۱۰ ارائه شدند نشان داد که می‌توان با صرف نظر کردن از خطای ناچیز محاسباتی به

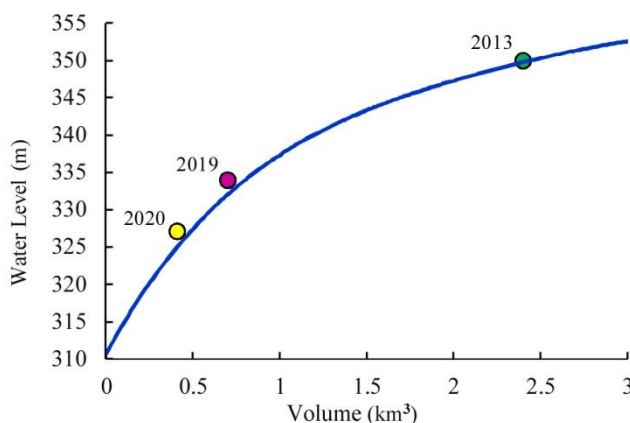
جدول ۱- نتایج عمق‌سنجی آب به روش رگرسیون خطی برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰.

Table 1. The results of estimating water depth using linear regression for 2019 and 2020.

بیش‌ترین خطای منفی (متر)	بیش‌ترین خطای مثبت (متر)	میانگین خطا (متر)	تراکم فراوانی	ریشه میانگین مربعات خطا (متر)	ضریب تبیین (R ²)	تاریخ
Minimum negative error (m)	Maximum positive error (m)	Average error (m)	Frequency	RMSE (m)	Coefficient of determination (R ²)	Date
3.54	3.45	0.11	-1.05 < F < 0.6	1.26	0.96	2019.03.19
2.22	1.64	-0.22	-1.32 < F < 0.47	1.00	0.95	2020.01.01

همچنین ناچیز بودن حجم رسوب ورودی به مخزن نسبت به حجم آب ذخیره شده در آن (۳۱)، تغییرات تراز کف مخزن (توپوگرافی) ناچیز فرض شده است. پس از محاسبه عمق‌های آب در نقاط مختلف مخزن، حجم آب ذخیره شده در مخزن با استفاده از رابطه ۱ از مجموع حاصل ضرب عمق محاسباتی هر بازه در تعداد پیکسل‌های آن در مساحت هر پیکسل (که برابر ۹۰۰ مترمربع است) به دست آمد. نتایج به دست آمده از برآورد حجم آب ذخیره شده در مخزن در مقایسه با نمودار حجم-ارتفاع آن (استخراج شده از پایگاه داده) برای سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در شکل ۱۱ ارائه شده است.

ج) تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن: مطابق نمودارهای تراز سطح آب (شکل ۲) و تغییرات حجم آب ذخیره شده مخزن (شکل ۳) در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ تراز سطح آب و حجم مخزن به صورت پیوسته روندی کاهشی را طی کرده است. طبق گزارش پایگاه داده تراز سطح آب مخزن در تاریخ ۲۰۱۳/۰۵/۱۳ برابر با ۳۵۰ متر و حجم آن در حدود ۲/۵ میلیارد مترمکعب، در تاریخ ۲۰۱۹/۰۳/۱۹ به ترتیب ۳۳۴/۰۲ متر و ۰/۷۷ میلیارد مترمکعب و نهایتاً در تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۰۱ به ترتیب ۳۲۷/۱۳ متر و ۰/۴۸ میلیارد مترمکعب برآورد شده‌اند. با توجه به آمار و اطلاعات بیان شده و عدم گزارش سیلاب در این بازه زمانی و



شکل ۱۱- مقایسه منحنی حجم-ارتفاع مخزن با حجم آب محاسباتی در سه زمان مختلف.

Figure 11. Comparison of the Volume Diagram with Calculated Volumes in Three Different Times.

(۱۶) نشان داد که می‌توان رابطه‌ای با دقت و همبستگی بالا برای عمق‌های آب تا ۴۰ متر بین مقادیر باندها و شاخص‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای و تغییرات عمق آب برقرار کرد که بیش از این تا عمق آب ۱۱ متر برای دریاها صورت گرفته بود. همچنین مقادیر حاصل از تخمین حجم آب مخزن سد زوجار نشان داد که روش ارائه شده با میانگین خطای کم‌تر از ۱۰ درصد در مقایسه با روش‌های صورت گرفته (۳، ۱۸) از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

حجم‌های آب محاسباتی در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۲/۴۰۲، ۰/۷۰۰ و ۰/۴۰۸ میلیارد مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر گزارش شده در پایگاه داده خطای مطلق آن‌ها به ترتیب ۳/۸۸، ۹/۰۱ و ۱۴/۸۵ درصد و خطای نسبی به ترتیب ۹۸، ۷۰ و ۷۲ میلیون مترمکعب به دست آمدند. خطای مطلق در سال‌های مختلف به‌ازای افزایش تراز سطح آب دارای روندی کاهشی است. نتایج به دست آمده در مقایسه با پژوهش‌های مشابه در زمینه عمق‌سنجی آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

نتیجه‌گیری کلی

با محاسبه حجم آب مخزن سد در یک تراز سطح آب مشخص و مقایسه آن با حجم آب به‌دست آمده از منحنی اولیه حجم-ارتفاع در همان تراز، حجم رسوب‌گذاری در مخزن سد در یک دوره زمانی مشخص را برآورد نمود. هم‌چنین می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از وقوع یک سیل کوچک یا بزرگ، حجم رسوبات ورودی به مخزن سد بر اثر سیلاب را تا حدودی محاسبه نمود. نکته مهم و اساسی در این ارتباط، کارایی رابطه نهایی مدل‌سازی عمق آب بر اساس مشخصات تصاویر ماهواره‌ای است که آیا با گذشت زمان و بر اثر تغییرات دمایی، زاویه تابش خورشید و نیز تغییرات در کدورت آب مخزن، کماکان دارای دقت قابل‌قبولی خواهد بود؟ پاسخ به این سوال و سوالات مشابه دیگر نیازمند بررسی‌های گسترده‌تری در زمینه قابلیت و توانمندی‌های تصاویر ماهواره‌ای در تعداد بیش‌تری از مخازن سدها می‌باشد.

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 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.

در این پژوهش، راهکار ساده‌ای مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای برای عمق‌سنجی آب مخازن سدها و نیز تخمین حجم آب ذخیره‌شده در هر تراز سطح آب دلخواه در مخزن سد معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. برخلاف روش‌های کنونی تخمین حجم آب در مخازن سدها که بر اساس تعیین مساحت پهنه آبی مخزن به کمک تعداد قابل‌توجهی از تصاویر ماهواره‌ای در ترازهای مختلف سطح آب انجام می‌شوند، در روش پیشنهادی فقط از یک تصویر ماهواره‌ای متناظر با تراز سطح آب موردنظر استفاده شده و به کمک مدل‌سازی عمق آب در هر نقطه از مخزن سد براساس مشخصات تصاویر ماهواره‌ای (مقادیر باندها و شاخص‌های طیفی)، حجم آب ذخیره‌شده محاسبه می‌شود. اجرای روش پیشنهادی در مخزن سد زوجار در کشور اسپانیا نشان داد که نتایج روش مذکور مطابقت مناسبی با مقادیر مشاهداتی دارند. بر اساس این نتایج، عمق‌های آب محاسباتی در دو مرحله آموزش و آزمون مدل به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۹۸ به‌دست آمدند. نتایج مدل‌سازی رگرسیون خطی نشان داد که برای محاسبه عمق آب، پارامترهای (NDWI، MNDWI، NDVI، B5، B6 و B7) به‌عنوان متغیرهای ورودی نسبت به سایر متغیرها دارای اهمیت بسیار بیش‌تری بوده و به‌عنوان رابطه نهایی پیشنهاد شد. هم‌چنین مشخص شد که محاسبات حجم آب مخزن سد زوجار به‌ازای ۳ تراز سطح آب مختلف با خطای میانگین ۹/۲۵ درصد دارای دقت مناسب و قابل‌قبولی است. این نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند مسیری جدید و قابل‌توسعه و با کم‌ترین هزینه برای مدیریت مخازن سدها باشد و حتی در آینده به‌کمک این روش بتوان

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.

تعارض منافع

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

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دسترسی به داده‌ها، آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات و مدل‌سازی، تهیه پیش‌نویس مقاله
نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، بازبینی مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده سوم: نظارت تحقیق، مشارکت در آنالیزها

منابع

- 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.
- Garg, A. A., Shawul, A. A., & Chakma, S. (2020). Assessment of sedimentation and useful life of Tehri reservoir using integrated approaches of hydrodynamic modelling, satellite remote sensing and empirical curves. *Curr. Sci.* 118 (411), 411-420.
- 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.
- Rasouli, A. A., Zarrinbakhsh, M., & Shafiee, M. (2009). Application of satellite images for land use change detection and environmental impact assessment. *Watershed management research*, 21 (1), 1-11. <https://sid.ir/paper/395396/en>.
- Motkan, A. A., Sohrabi Nia, M., Sadeghian, S., & Ma'navi, D. (2009). Applications of high-resolution satellite images in updating large-scale maps: A case study using IKONOS image of Urmia. *Environmental Sciences*, 6 (4), 171-182. <https://sid.ir/paper/117678/en>.
- Eghbali, L., Laffi, & Heidari. (2009). The importance of remote sensing in geographical studies and education. *Geographical land*, 5 (4), 107-115.
- Salehi, R., Qaragozlou, & Yousefi Far. (2021). Investigating environmental and medical effects of heavy metals using remote sensing technology and geochemistry (Case Study: Palang Valley Region and Dali Mine in Markazi Province). *Environmental science and technology journal*, 22 (11), 47-59.
- Schultz, G. A., & Engman, E. T. (Eds.). (2012). Remote sensing in hydrology and water management. Springer Science and Business Media.
- Shahri, S., Sayadi, & Yousefi. (2021). Monitoring chlorophyll-a, organic carbon, salinity, and Surface water temperature in sistan and Baluchestan coasts using remote sensing data. *Journal of remote sensing and GIS in natural resources*, 12 (4), 119-134.
- Itchie, J. C., Zimba, P. V., & Everitt, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 69 (6), 695-704.
- Reif, M. K. (2011). Remote sensing for inland water quality monitoring: A US Army Corps of Engineers Perspective.
- Oxford, M. (1976). Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 42, 1539-1545.
- Crétau, J. F., & Birkett, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*. 338 (14-15), 1098-1112.

14. 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.
15. Mohammadkhanlou, H., Modiri, M., Khosali, E., & Enayati, H. (2019). Bathymetric mapping of coastal areas using sentinel-2 satellite images (Case study: Salalah Port, Oman). *Geographical information*, 28 (109), 25-35. <https://sid.ir/paper/253283/en>.
16. Karimi, N., Bahreinimotlagh, M., Farokhnia, A., Roozbahani, R., & Hashemi, S. M. B. (2021). Extraction of caspian sea coastline bathymetry map using satellite data. *Journal of Marine Engineering*, 17 (34), 1-11.
17. Quang, D. N., Linh, N. K., Tam, H. S., & Viet, N. T. (2021). Remote sensing applications for reservoir water level monitoring, sustainable water surface management, and environmental risks in Quang Nam province, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 12 (7), 3045-3063.
18. Gourgouletis, N., Bariamis, G., Anagnostou, M. N., & Baltas, E. (2022). Estimating reservoir storage variations by combining Sentinel-2 and 3 measurements in the Yliki Reservoir, Greece. *Remote Sensing*, 14 (8), 1860.
19. Yao, F., Minear, J. T., Rajagopalan, B., Wang, C., Yang, K., & Livneh, B. (2023). Estimating Reservoir Sedimentation Rates and Storage Capacity Losses Using High-Resolution Sentinel-2 Satellite and Water Level Data. *Geophysical Research Letters*, 50 (16), e2023GL103524.
20. 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), 427-448.
21. Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 (10), 4345-4364.
22. Singh, A., Seitz, F., & Schwatke, C. (2013). Application of multi-sensor satellite data to observe water storage variations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6 (3), 1502-1508.
23. Ottinger, M., & Kuenzer, C. (2020). Spaceborne L-band synthetic aperture radar data for geoscientific analyses in coastal land applications: a review. *Remote Sensing*, 12 (14), 2228.
24. Ma, S., Zhou, Y., Gowda, P. H., Dong, J., Zhang, G., Kakani, V. G., Wagle, P., Chen, L., Flynn, K. C., & Jiang, W. (2019). Application of the water-related spectral reflectance indices: A review. *Ecological indicators*, 98, 68-79.
25. 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), 1425-1432.
26. Jacobson, C. (1995). Word Recognition Index (WRI) as a quick screening marker of dyslexia. *The Irish Journal of Psychology*, 16 (3), 260-266.
27. 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), 3025-3033.
28. Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62 (3), 241-252.
29. 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.
30. Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976). January. The tasselled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In LARS symposia (p. 159).
31. Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 18 (8), 2580.