



Estimation of sedimentation rate and storage capacity of reservoir dams using satellite imagery

Hamed Feiz Abady¹ | Abdolreza Zahiri² | Khalil Ghorbani³

1. Water Engineerin Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
E-mail: Hamedfz1370@gmail.com
2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azahiri@gau.ac.ir
3. Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
E-mail: ghorbani.khalil@ gau.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May, 2, 2024

Revised: June, 4, 2024

Accepted: June, 10, 2024

Published online: Sep. 2024

Keywords:

Landsat 8 OLI,
MNDWI Index,
Reservoir Dam,
Sedimentation Rate,
Storage Capacity.

ABSTRACT

Reservoirs are very important for storing rainwater and floods, and water shortage management. In nearly all reservoirs, storage capacity is steadily lost due to trapping and accumulation of sediment. Sediment deposition in water reservoirs has major implications for storage capacity, reservoir lifetime and water quality. The present study aimed to evaluate the temporal dynamics of water stored and sedimentation rate in a reservoir using remote sensing data. For this purpose, the study was carried out in O. H. Ivie reservoir located in the America country. The techniques used to carry out this study have been pre-processing of Landsat 8 images, modeling and identifying water pixels using MNDWI index, evaluating reservoir capacity, and compression of results with recent bathymetric survey data to assessment sedimentation rate. According to the results, the average errors of computing the volume of water stored in the reservoir was about 9%. Based on this, the storage capacity of O. H. Ivie reservoir has decreased from 695 million cubic meters at the beginning of operation (1991) to 472 million cubic meters in 2019. The results showed that the lost storage capacity of the reservoir due to sedimentation is about 32% of the original volume and the annual sedimentation rate is 1.4%. Also, by evaluating the obtained results, the average height of sediment deposited in the reservoir between 2004 and 2019 was estimated to be about 9 meters. This research confirmed that remote sensing can estimate storage capacity and sedimentation rate in the reservoir with minimal cost and time.

Cite this article: Feiz Abady, H., Zahiri, A., & Ghorbani, Kh. (2024). Estimation of sedimentation rate and storage capacity of reservoir dams using satellite imagery, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (7), 1047-1062.

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375947.669701>



تخمین نرخ رسوب‌گذاری و ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سدها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

حامد فیض‌آبادی | عبدالرضا ظهیری^۲ | خلیل قربانی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: Hamedfz137@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azahiri@gau.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱

تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

مخزن سد،

ظرفیت ذخیره،

نرخ رسوب‌گذاری،

شاخص MNDWI،

لندست ۸.

مخازن سدها برای ذخیره آب باران و سیلاب‌ها و استفاده در زمان کمبود آب بسیار مهم هستند. در اکثر مخازن ظرفیت ذخیره‌سازی به دلیل تجمع رسوبات پیوسته کاهش می‌یابد. رسوب‌گذاری در مخازن ذخیره آب پیامدهای عمده‌ای بر ظرفیت ذخیره‌سازی، طول عمر و کیفیت آب مخزن دارد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تغییرات زمانی حجم آب ذخیره‌شده در مخزن و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در آن به کمک سنجش از دور انجام شده است. برای این منظور مخزن O. H. Ivie در کشور آمریکا به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این پژوهش شامل مراحل مختلف از جمله پیش‌پردازش تصاویر ماهواره لندست ۸، مدل‌سازی و شناسایی پیکسل‌های آب با استفاده از شاخص MNDWI، تخمین ظرفیت ذخیره مخزن و مقایسه نتایج با داده‌های توپوگرافی جهت ارزیابی نرخ رسوب‌گذاری می‌باشد. طبق نتایج، میانگین خطاهای محاسبه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن حدود ۹ درصد به‌دست آمد. بر این اساس ظرفیت ذخیره مخزن O. H. Ivie از ۶۹۵ میلیون مترمکعب در ابتدای بهره‌برداری (سال ۱۹۹۱) به ۴۷۲ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۹ کاهش یافته است. نتایج نشان داد که ظرفیت از دست‌رفته ذخیره مخزن بر اثر ته‌نشینی رسوبات حدود ۳۲ درصد حجم اولیه و نرخ رسوب‌گذاری سالانه ۱/۴ درصد است. همچنین با ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده میانگین ارتفاع رسوب ته‌نشین شده در مخزن بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹ حدود ۹ متر برآورد شد. این پژوهش تأیید کرد که سنجش‌از‌دور می‌تواند با صرف کمترین هزینه و زمان، تغییرات ظرفیت ذخیره و نرخ رسوب‌گذاری در مخزن را تخمین بزند.

استناد: فیض‌آبادی، حامد؛ ظهیری، عبدالرضا؛ و قربانی، خلیل (۱۴۰۳). تخمین نرخ رسوب‌گذاری و ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سدها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۷)، ۱۰۶۲-۱۰۴۷.

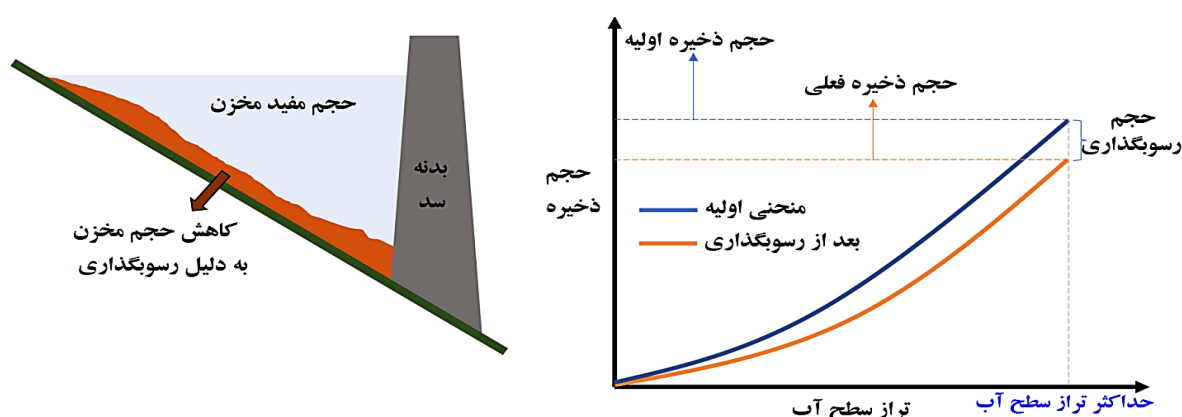
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375947.669701>

مقدمه

تغییرات آب‌وهوایی در سال‌های اخیر، عدم قطعیت تامین آب کافی برای بسیاری از مناطق جهان را افزایش داده است و در نتیجه باعث تأکید بیشتر بر سدسازی برای تأمین آب مصارفی مثل شرب، کشاورزی و صنعت شده است (Nyikadzino & Gwate, 2021). بنابراین امروزه مخازن سدها برای ذخیره آب باران و سیلاب‌ها و استفاده در زمان کمبود آب بسیار مهم هستند. با گذشت زمان و به دلیل فرسایش حوضه و بستر رودخانه‌ها در زمان وقوع سیلاب، رسوبات در مخازن سدها ته‌نشین شده و به تدریج ظرفیت ذخیره، طول عمر و کیفیت آب آن‌ها را کاهش می‌دهند (Gonzalez Rodriguez et al., 2023). طبق گزارش‌ها هر ساله حدود ۰/۵ تا ۱ درصد ظرفیت مخازن سدهای جهان به دلیل رسوب‌گذاری از بین می‌رود که این درصد در کشورهای در حال توسعه به دلیل روش‌های نادرست استفاده از اراضی بیشتر است (Chomba, 2016). فرسایش خاک که ناشی از عدم مدیریت صحیح استفاده از اراضی مثل جنگل‌زدایی، عدم انجام اقدامات آبخیزداری، کشت در اراضی شیب‌دار و نیز در حاشیه رودخانه‌ها و غیره است، از عوامل اصلی رسوب‌گذاری در مخازن سدها می‌باشد (Gonzalez Rodriguez et al., 2023). از بین رفتن ظرفیت مخازن می‌تواند باعث مشکلات متعدد محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی در تمام کشورها و بخصوص در کشورهای در حال توسعه شود. بنابراین مطالعه و ارزیابی منظم ظرفیت مخازن سدها امری ضروری است. روش‌های فعلی تجزیه و تحلیل محاسبات ظرفیت ذخیره مخازن که در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود، پرهزینه و زمان‌بر بوده و تأمین منابع مالی آن در شرایط اقتصادی امروز مقرون به صرفه نیست. تاکنون تخمین ظرفیت ذخیره مخازن و تجزیه و تحلیل رسوب‌گذاری در آنها به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم و با استفاده از کمی‌سازی رسوب انجام شده است (Singh et al., 2023). روش‌های مستقیم شامل عملیات و تکنیک‌های محاسبه هیدروگرافی مخزن می‌باشد که با اندازه‌گیری رسوب و در محل انجام می‌شود. روش‌های غیرمستقیم شامل نمونه‌برداری از خاک و مدل‌سازی فرسایش خاک در مسیر جریان ورودی به مخزن می‌باشد و هیچگونه عملیات مستقیم در مخزن صورت نمی‌گیرد. در سال‌های اخیر سنجش از دور به عنوان یک روش غیرمستقیم برای ارزیابی نرخ رسوب‌گذاری در مخازن مطرح شد که ارزان‌تر بودن آن به عنوان روشی جایگزین اثبات شده است (Droujko et al., 2023). فناوری سنجش از دور با جمع‌آوری داده‌ها در بازه‌های زمانی بلند مدت و دامنه‌های طیفی گسترده در مناطق مختلف جهان، می‌تواند اطلاعات خوبی در مورد موضوعات مختلف از جمله تخمین ظرفیت ذخیره آب مخازن سدها و نرخ رسوب‌گذاری در آنها ارائه دهد (Patni et al., 2017). در سال‌های اخیر ماهواره‌های بسیاری با سنجنده‌های کیفی پیشرفته برای تصویربرداری از پدیده‌های زمینی در مدار خود قرار گرفته‌اند تا باعث شود سنجش از دور بیش از گذشته مورد توجه قرار گیرد. مزیت اصلی تصویربرداری ماهواره‌ای نسبت به روش‌های مرسوم اندازه‌گیری هیدروگرافی مخازن غلبه بر دشواری‌های جمع‌آوری، انتقال و به اشتراک‌گذاری حجم بالایی از داده‌های عمق‌سنجی حاصل از عملیات هیدروگرافی می‌باشد (Wagh & Manekar, 2021). سنجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند تغییرات زمانی مساحت سطح آب مخزن را بین بیشترین و کمترین تراز سطح آب مشاهداتی ارزیابی کند و از این طریق میزان ذخیره آب مخزن را بین این دو تراز تخمین بزند (Schwatke et al., 2020). در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی جهت محاسبه سطح آب گستره‌های آبی ارائه شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روش تفکیک مناطق آب و خشکی با شاخص اصلاح‌شده آب تفاضلی نرمال شده (MNDWI) اشاره کرد. مطابق شکل (۱) با مقایسه ظرفیت ذخیره مخزن در زمان بهره‌برداری با حجم آب اندازه‌گیری شده به روش سنجش از دور می‌توان مقدار رسوب انباشته‌شده داخل مخزن را در طولانی مدت ارزیابی کرد (Yao et al., 2023).



شکل ۱. نمای جانبی مخزن با رسوبات انباشته شده (a)، مقایسه منحنی ارتفاع-حجم اولیه مخزن با ترسیم شده بعد از گذشت زمان (b).

پیشینه پژوهش

نیاکادزینو و گواته در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 OLI به تجزیه و تحلیل رسوب‌گذاری مخزن سد چسا^۱ واقع در حوضه آبریز مازووا^۲ کشور زیمباوه پرداختند (Nyikadzino & Gwate, 2021). آن‌ها برای تفکیک مناطق آب و خشکی و محاسبه مساحت سطوح آب در ترازهای مختلف از شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDWI) استفاده کردند. طبق گزارش آن‌ها ظرفیت ذخیره مخزن بین سال‌های ۱۹۹۱ (زمان بهره‌برداری) تا ۲۰۱۷ از مقدار ۱۱۵۰۰۰۰ میلیون مترمکعب به ۳۷۴۵۳۵ هزار مترمکعب کاهش یافته است. نیاکادزینو و گواته اضافه می‌کند نرخ رسوب‌گذاری مخزن سد چسا در بازه زمانی مورد مطالعه سالانه ۲/۷ درصد می‌باشد و پیش‌بینی می‌کند این مخزن تا سال ۲۰۲۸ پر از رسوب می‌شود. در سال ۲۰۲۲ تسفایه و همکاران به کمک سنجش از دور و نرم‌افزار GIS به مطالعه تغییرات دینامیکی آب ذخیره‌شده در مخازن سدهای کوگا^۳، شینا^۴ و سلمکو^۵ واقع در حوضه آبریز نیل آبی کشور اتیوپی پرداختند. برای این منظور آن‌ها با پیش‌پردازش تصاویر ماهواره Landsat و شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیکسل‌های آب، تغییرات ظرفیت ذخیره مخازن مورد مطالعه را به کمک شاخص (NDWI) مورد ارزیابی قرار دادند (Tesfaye et al., 2022). نتایج مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ نشان داد که ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن کوگا از ۸۳/۱۰ میلیون مترمکعب به ۸۱/۱۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است که نرخ رسوب‌گذاری سالانه آن ۰/۳۳ درصد بدست آمد. طبق نتایج برای مخازن شینا و سلمکو تلفات ذخیره‌سازی ناشی از رسوب‌گذاری به ترتیب ۲/۵۳ و ۲/۱۳ درصد محاسبه شد. تسفایه و همکاران می‌افزاید بر اساس نتایج بدست آمده میانگین نرخ رسوب‌گذاری در مخازن مورد مطالعه از میانگین نرخ جهانی سالانه حدود ۱ درصد بیشتر است. فام داک و همکاران در سال ۲۰۲۲ با هدف محاسبه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن تاکمو^۶ ویتنام جنوبی به بررسی تغییرات مساحت سطح آب مخزن در سری‌های زمانی مختلف پرداختند (Pham-Duc et al., 2022). آن‌ها با استفاده از ماهواره‌های Sentinel 1 و Sentinel 2 تغییرات مساحت پهنه آب و با استفاده از ماهواره Jason 3 ترازهای سطح آب مخزن را محاسبه کردند. طبق نتایج بدست آمده بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ کمترین و بیشترین مساحت سطح آب مخزن به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۰۰ کیلومترمربع و کمترین و بیشترین تراز سطح آب مخزن به ترتیب حدود ۲۰۲ و ۲۱۷ متر تخمین زده شد. میانگین ضریب همبستگی محاسبه مساحت پهنه‌آب و محاسبه حجم آب ذخیره مخزن در بازه زمانی مورد مطالعه به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۵ درصد گزارش شد. در سال ۲۰۲۳ یائو و همکاران به کمک تصاویر ماهواره Sentinel 2 و با هدف تخمین نرخ رسوب‌گذاری و تلفات حجم ذخیره مخازن به مطالعه و بررسی هشت مخزن واقع در ایالات متحده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ پرداختند (Yao et al., 2023). برای این منظور آن‌ها نتایج مطالعه خود را با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل و ظرفیت ذخیره مخازن در زمان بهره‌برداری مقایسه کردند. نتایج حاصل، میانگین خطاهای محاسبات عمق‌سنجی و نرخ رسوب‌گذاری سالانه در مخازن را به ترتیب برابر ۴/۰۸ و ۰/۰۵ درصد نشان داد.

با توجه به هزینه‌های فراوان هیدروگرافی مخازن و عملیات اندازه‌گیری میدانی رسوب در سرشاخه‌های ورودی به مخزن سد، در پژوهش حاضر از روشی کم‌هزینه و سریع مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از روش اصلاح‌شده آستانه‌یابی جدید MNDWI که خطاهای سنجنده در ثبت و ارسال داده‌ها را کاهش می‌دهد، مساحت سطوح آب مخزن به کمک تفکیک پهنه‌های آب-خشکی محاسبه شده و سپس با برآورد ظرفیت ذخیره مخزن در زمان‌های مختلف و مقایسه آن با ظرفیت ذخیره در زمان بهره‌برداری، نرخ رسوب‌گذاری در مخزن به دست آمده است. برای این منظور از مخزن O. H. Ivie واقع در کشور آمریکا استفاده شده است. از دلایل انتخاب این مخزن می‌توان به در دسترس بودن اطلاعات اندازه‌گیری شده تراز، مساحت و حجم آب ذخیره‌شده مخزن در پایگاه داده برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش اشاره کرد.

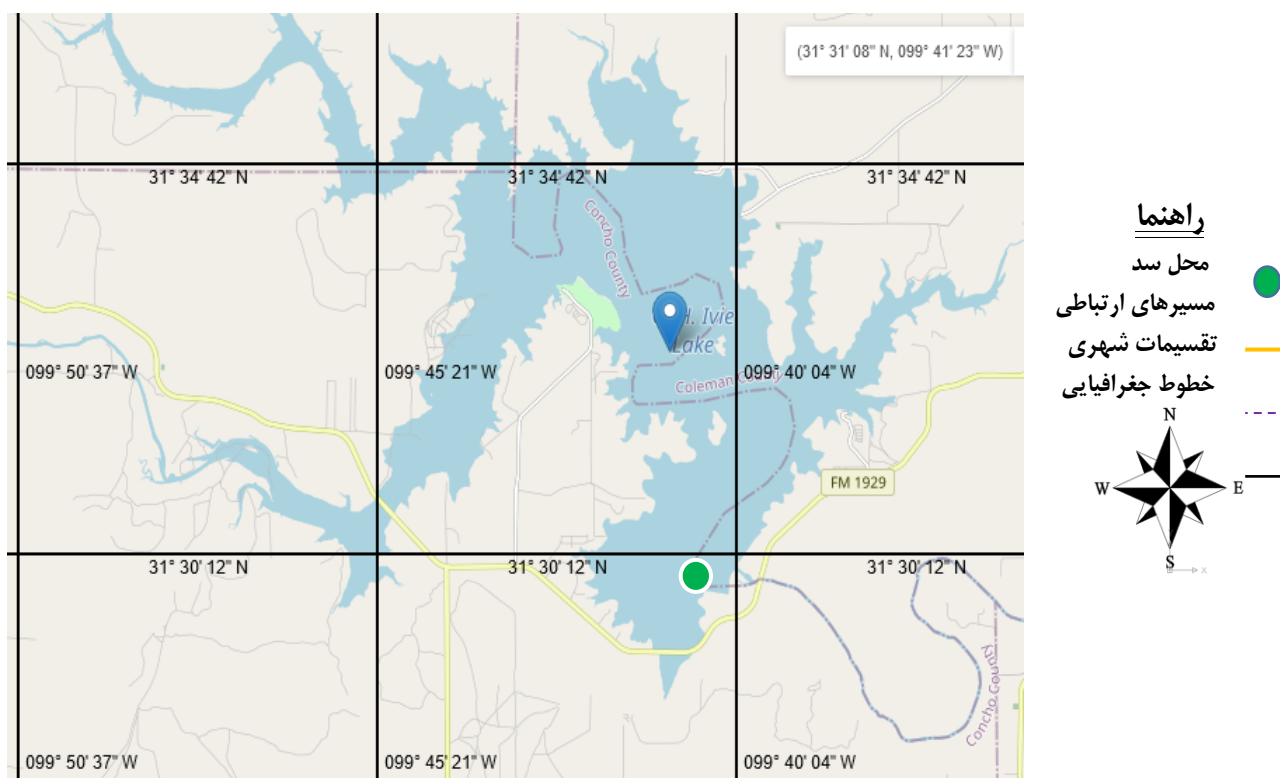
روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

مخزن O. H. Ivie که نام اولیه آن Stacy بوده است در طول جغرافیایی $99^{\circ}41'03''W$ و عرض جغرافیایی $31^{\circ}32'23''N$ واقع شده

1 Chesa
2 Mazowe
3 Koga
4 Shina
5 Selamko
6 Thac Mo

است. این مخزن بین شهرهای کلمان^۱، کنکو^۲ و رانلز^۳ در غرب ایالت تگزاس آمریکا و حدود ۲۶ کیلومتر پایین‌تر از محل تلاقی رودخانه‌های کلرادو^۴ و کنکو قرار دارد (Mueller, 2016). ساخت سد سیمون^۵ با هدف تامین آب منطقه و اهداف تفریحی در سال ۱۹۸۷ با مجوز کمیسیون آب ایالت تگزاس بر روی این مخزن آغاز شد و در ۱۵ مارس ۱۹۹۰ به پایان رسید. این سد دارای طولی معادل ۴/۸ کیلومتر و حداکثر ارتفاع ۴۵/۱۱ متر می‌باشد. طبق گزارش سایت رسمی مرکز داده‌های آب ایالت تگزاس^۶ آگیری از سد سیمون از ابتدای سال ۱۹۹۱ شروع شد. طبق گزارش این سایت مخزن O. H. Ivie دارای حداکثر ظرفیت ذخیره آب ۶۹۵ میلیون مترمکعب در حداکثر تراز سطح آب (۴۷۳ متر) می‌باشد. شکل ۲ موقعیت سد و مخزن مورد مطالعه را نشان داده است.



شکل ۲. موقعیت سد سیمون و مخزن O. H. Ivie

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مخزن سد

برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش از پایگاه داده گروه علوم و حفاظت آب ایالت تگزاس (TWDB)^۷ تحت نظر موسسه توسعه علوم آب این ایالت استفاده شد. این پایگاه شامل اطلاعات سری‌های زمانی تراز سطح آب، منحنی‌های ارتفاع-حجم، و داده‌های هیدروگرافی برای بیش از ۱۲۰ دریاچه و مخزن در سرتاسر ایالت تگزاس می‌باشد. اطلاعات تراز سطح آب از زمان بهره‌برداری (۲۲ سپتامبر ۱۹۹۰) به صورت روزانه و منحنی ارتفاع-حجم مخزن مورد مطالعه (هیدروگرافی شده در سال ۲۰۰۴) بر روی پایگاه داده در دسترس عموم قرار دارد. همچنین از پایگاه داده‌های هیدرولوژیکی آب‌های سطحی^۸ (DAHITI) که تحت نظر موسسه تحقیقات ژئودتیک دانشگاه فنی مونیخ آلمان (DGF-TUM) قرار دارد برای مقایسه نتایج استفاده شده است. این پایگاه شامل اطلاعات سری‌های زمانی تراز سطح، مساحت

1 Coleman

2 Concho

3 Runnels

4 Colorado

5 Simon. W. Freese

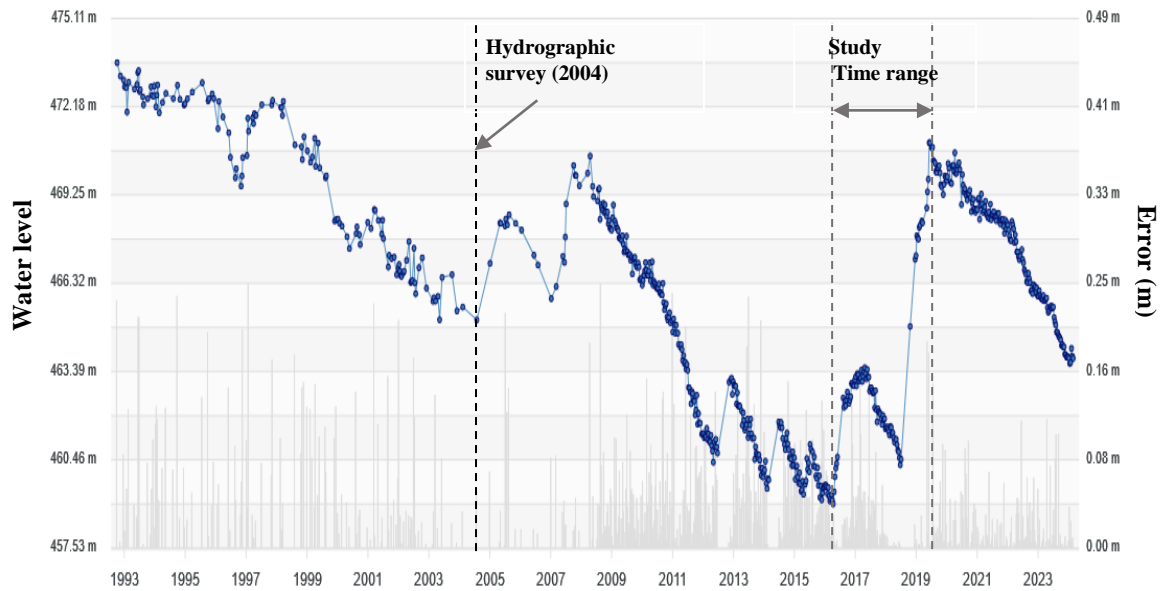
6 <https://www.waterdatafortexas.org/>

7 <http://waterfortexas.twdb.texas.gov/>

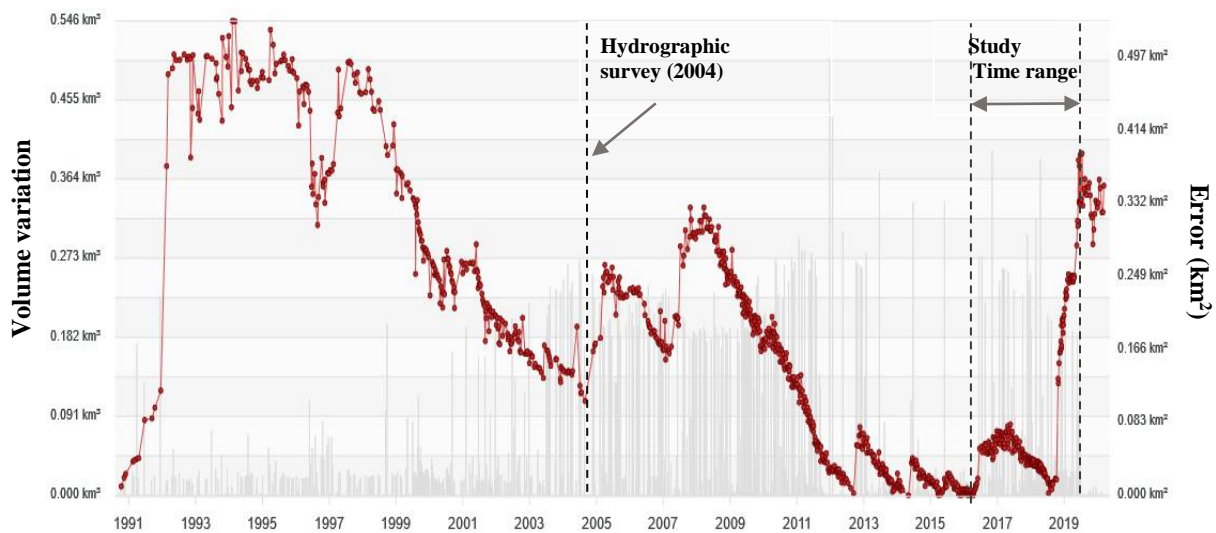
8 <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>



سطح و تغییرات حجم آب مخازن و دریاچه‌ها می‌باشد که به کمک سنجش‌ازدور و با استفاده از ماهواره‌هایی مثل ERS-2 (۲۰۱۱-۱۹۹۵)، Envisat (۲۰۱۳-۲۰۰۱) و SARAL (از سال ۲۰۱۳) ثبت شده است (Schwatke et al., 2019). شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای تغییرات سری زمانی تراز سطح آب و حجم آب ذخیره‌شده در مخزن O. H. Ivie را که از پایگاه داده‌های DAHITI دانلود شده است نشان می‌دهند.



شکل ۳. داده‌های سری زمانی تراز سطح آب مخزن O. H. Ivie

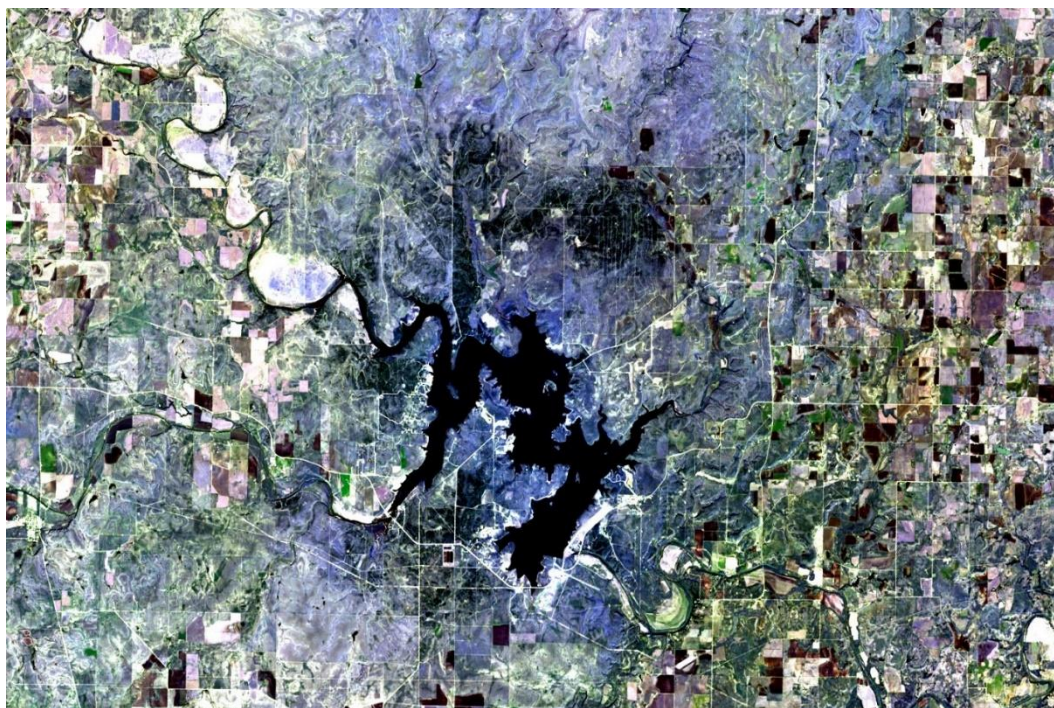


شکل ۴. داده‌های سری زمانی تغییرات حجم آب مخزن O. H. Ivie

تصاویر ماهواره‌ای

مجموعه‌های لندست توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) اداره می‌شود که اولین تصاویر خود را به وسیله ماهواره Landsat 1 در سال ۱۹۷۲ ثبت کرد. ماهواره‌های لندست دارای مدار چرخشی همسان با خورشید با زاویه $98/3^\circ$ می‌باشند و در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین فعالیت می‌کنند. Landsat 8 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و تفکیک زمانی ثبت تصاویر هر ۱۶ روز یکبار در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ وارد مدار فضایی خود شد. این ماهواره شامل تصویرساز عملیاتی (OLI) و سنسور مادون قرمز حرارتی (TIRS) می‌باشد (Sekertekin et al.,

(2018). تصاویر ماهواره Landsat 8 به صورت رایگان در آرشیو سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۱ (USGS) موجود می‌باشند. در این پژوهش از تصاویر Level 2 Collection 2 این ماهواره که به صورت پیش‌فرض مورد تصحیحات اتمسفری قرار گرفته‌اند استفاده شده است (Teixeira Pinto et al., 2020). شکل ۵ نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده به وسیله ماهواره Landsat 8 را برای منطقه مطالعاتی مورد نظر در ۱۰ دسامبر ۲۰۱۸ نشان داده است.



شکل ۵. تصویر ماهواره لندست ۸ برای منطقه مورد مطالعه در ۱۰ دسامبر ۲۰۱۸

روش انجام مطالعه

روش تفکیک و استخراج مناطق آب و خشکی به کمک سنجش‌ازدور مبتنی بر ایجاد یک آستانه تشخیص ناشی از تفاوت در بازتابش نور از سطح پدیده‌ها یکی از پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود. این روش برای استخراج سریع و نظارت بر سطح وسیعی از آب‌های سطحی بسیار مناسب است که توسعه آن در سه مرحله اتفاق افتاده است (Li et al., 2021): روش‌های تک باند، روش‌های دو باند و روش‌های چند باند. روش‌های تک باندی برای شناسایی آب با استفاده از اختلاف بازتاب بین سطح آب و سایر پیکسل‌های تصویر با استفاده از یک باند طیفی تصویر ماهواره‌ای انجام می‌شود. برای مثال تابش مادون قرمز نزدیک (NIR) به شدت توسط آب جذب می‌شود و به شدت توسط پوشش گیاهی یا خاک خشک منعکس می‌شود که برای شناسایی مناطق آب مفید است (McFeeters, 1996). با این حال همیشه یک باند طیفی منفرد نمی‌تواند شاخص خوبی برای تفکیک مناطق آب و خشکی باشد. بنابراین ابتدا شاخص‌های دو باند و پس از آن شاخص تفاضلی آب نرمال شده (NDWI) برای بهبود روش‌های استخراج مناطق آب ارائه شدند (Work & Gilmer, 1976). شاخص NDWI نیز به خوبی نمی‌تواند برخی پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای مثل خاک تیره، مناطق با پوشش گیاهی کم، سایه‌ها و غیره را حذف کند. برای افزایش دقت و بهبود در طبقه‌بندی مناطق آب و خشکی شاخص اصلاح‌شده آب تفاضلی نرمال شده (MNDWI) ارائه شد که اعداد منفی در این شاخص نشان‌دهنده پیکسل‌های خشکی و اعداد مثبت نشان‌دهنده پیکسل‌های آب می‌باشند و باند مادون قرمز کوتاه ۱ (SWIR1) به دلیل بازتاب با شدت بیشتر در مناطق تیره جایگزین باند مادون قرمز نزدیک (NIR) در شاخص NDWI شده است (Xu 2006). با اینکه شاخص MNDWI به تنهایی نمی‌تواند برای مناطق سابه‌دار مثل مناطق شهری با ساختمان‌های مرتفع یا حاشیه کوه‌ها دقت بالایی در تفکیک مناطق آب و خشکی ارائه دهد اما به دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (فاقد مناطق سابه) و همچنین انتخاب تصاویر مورد بررسی در روزهای آفتابی از آن به عنوان روش محاسبه مساحت سطح آب در این پژوهش استفاده شده است. رابطه ۱ شکل ریاضی

1 <https://earthexplorer.usgs.gov/>

این شاخص را بیان می‌کند که در آن از باندهای سبز (Green) و مادون قرمز کوتاه ۱ (SWIR1) که به ترتیب باندهای ۳ و ۶ تصویر ماهواره Landsat 8 می‌باشند استفاده شده است.

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR_1}{GREEN + SWIR_2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

تصاویر مورد نیاز منطقه مورد مطالعه پس از دانلود، در نرم‌افزار ENVI 5.6 مورد تصحیحات رادیومتریکی قرار گرفت و فرمت باندهای آن از DN به Reflectance تغییر پیدا کرد. تصاویر به صورت Layer stack که شامل باندهای Green و SWIR1 بود ساخته شدند و با استفاده از شاخص MNDWI، مناطق آب و خشکی از یکدیگر جدا شدند. شکل ۶ تصویر ماهواره‌ای و تصویر تفکیک شده به وسیله شاخص MNDWI را برای زمان‌های مورد نظر نشان می‌دهد.



a. 2016.02.11



a. 2016.10.17



a. 2018.10.30



b. 2016.02.11



b. 2016.10.17



b. 2018.10.30



a. 2018.12.10



a. 2019.05.19



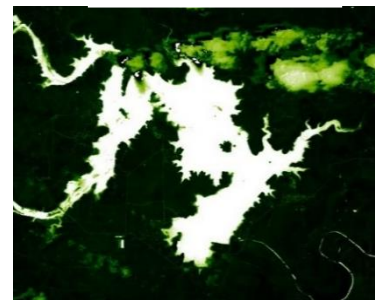
a. 2019.07.22



b. 2018.12.10



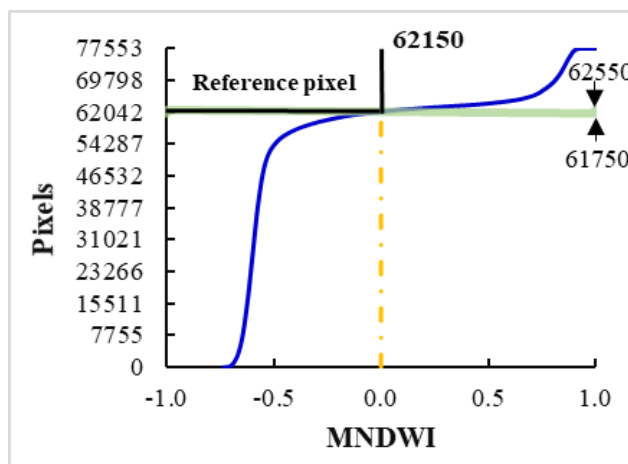
b. 2019.05.19



b. 2019.07.22

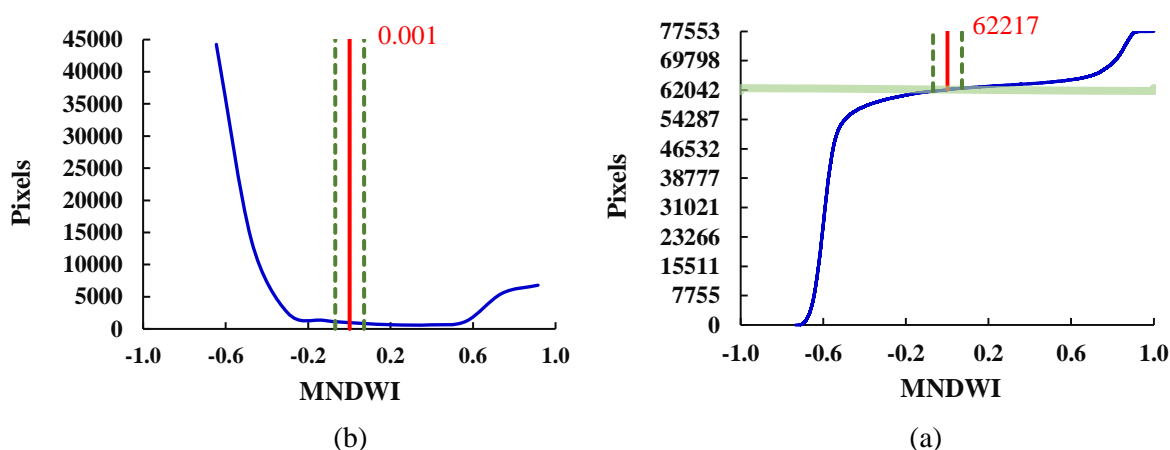
شکل ۶. تصاویر ماهواره‌ای (a)، تصاویر تفکیک مناطق آب با شاخص MNDWI (b) برای زمان‌های مورد مطالعه.

پس از محاسبه شاخص MNDWI یک آستانه تشخیص که بتواند پیکسل‌های آب و خشکی تصاویر مورد مطالعه را تفکیک کند نیاز بود. برای این منظور ابتدا پیکسل‌های هر تصویر در نمودار تجمعی خود از کمترین تا بیشترین مقدار مرتب شدند که هر تصویر شامل ۷۷۵۵۳ پیکسل در محدوده مخزن سد بود. برای شروع عدد صفر به عنوان آستانه تشخیص اولیه هر تصویر انتخاب شد (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها و انتخاب پیکسل آستانه اولیه، ۱۱ فوریه ۲۰۱۶

سپس حدود ۱ درصد از تعداد کل داده‌ها (۸۰۰ پیکسل) برای هر تصویر به صورت -0.5 تا $+0.5$ درصد پیکسل آستانه اولیه (پیکسلی که مقدار آن صفر است) به عنوان محدوده اطمینان برای اصلاح خطاهای احتمالی سنجنده مثل نویزها^۱ انتخاب شدند (Schwatke et al., 2019). پیکسل‌های انتخاب‌شده در محدوده اطمینان به نمودار فراوانی پیکسل‌های هر تصویر منتقل شدند و از مقادیر آن‌ها در نمودار فراوانی میانگین گرفته شد. سپس عدد متناظر با میانگین محاسبه‌شده به نمودار تجمعی داده‌ها انتقال یافت و شماره پیکسل متناظر با آن به عنوان پیکسل نهایی مرجع بین مناطق آب و خشکی در نظر گرفته شد. مقادیر کمتر نسبت به پیکسل مرجع نشان‌دهنده مناطق خشکی و مقادیر بیشتر نسبت به پیکسل مرجع نشان‌دهنده مناطق آب بودند. شکل ۸ نمودارهای فراوانی تجمعی و فراوانی داده‌ها را برای تصویر تفکیک‌شده با شاخص MNDWI در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۶ نشان داده است.



شکل ۸. پیکسل مرجع نهایی در نمودار تجمعی فراوانی (a) و آستانه مرجع نهایی در نمودار فراوانی (b)، ۱۱ فوریه ۲۰۱۶

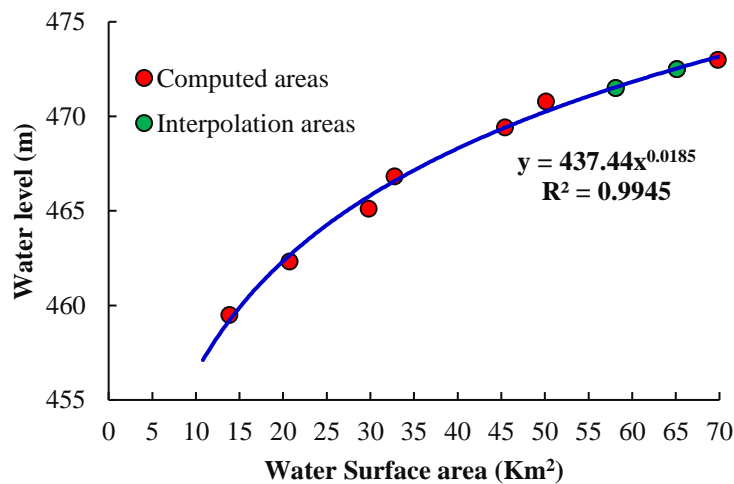
بر اساس شکل‌های ۷ و ۸ ابتدا پیکسل شماره ۶۲۱۵۰ به عنوان پیکسل اولیه مرجع انتخاب شد و حدود ۱ درصد از داده‌ها (۸۰۰ پیکسل) به صورت -400 تا $+400$ نسبت به این پیکسل به عنوان محدوده اطمینان انتخاب شدند (پیکسل شماره ۶۱۷۵۰ تا ۶۲۵۵۰). میانگین پیکسل‌های محدوده اطمینان حدود 0.001 بدست آمد که پیکسل متناظر با آن در نمودار فراوانی تجمعی (پیکسل شماره ۶۲۲۱۷)

به عنوان آستانه نهایی بین مناطق آب و خشکی در نظر گرفته شد. بر این اساس از مجموع ۷۷۵۵۳ پیکسل تصویر، ۱۵۳۳۶ پیکسل نشان‌دهنده مناطق آب و ۶۲۲۱۷ پیکسل نشان‌دهنده مناطق خشکی بدست آمد (مساحت هر پیکسل تصویر ماهواره Landsat 8 برابر ۹۰۰ مترمربع می‌باشد). اطلاعات محاسبه‌شده برای هر تصویر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. محاسبه مساحت سطح آب با استفاده از شاخص MNDWI برای مخزن O. H. Ivie

تاریخ	تراز سطح آب (متر)	پیکسل مرجع نهایی	تعداد پیکسل‌های آب	مساحت سطح آب (کیلومتر مربع)
۲۰۱۶/۰۲/۱۱	۴۵۹/۵۱	۶۲۲۱۷	۱۵۳۳۶	۱۳/۸۰
۲۰۱۶/۱۰/۱۷	۴۶۲/۳۳	۵۴۵۳۶	۲۳۰۱۷	۲۰/۷۱
۲۰۱۸/۱۰/۳۰	۴۶۵/۱۶	۴۴۴۵۶	۳۳۰۹۷	۲۹/۷۹
۲۰۱۸/۱۲/۱۰	۴۶۶/۸۳	۴۱۱۷۸	۳۶۳۷۵	۳۲/۷۴
۲۰۱۹/۰۵/۱۹	۴۶۹/۴۲	۲۷۰۹۴	۵۰۴۵۹	۴۵/۴۱
۲۰۱۹/۰۷/۲۲	۴۷۰/۸۰	۲۱۸۸۶	۵۵۶۶۷	۵۰/۱۰

تاریخ‌های ارائه‌شده در جدول ۱ بر اساس اینکه بتوانند تغییرات تراز سطح آب و حجم ذخیره آب مخزن (منحنی ارتفاع-سطح مخزن) را از کمترین تا بیشترین مقادیر مشاهداتی پوشش دهند و فاصله مناسبی برای درک بهتر نتایج داشته باشند انتخاب شده‌اند. طبق گزارش پایگاه داده DAHITI حجم آب ذخیره‌شده مخزن در ۲ دسامبر ۲۰۱۶ به حدود صفر رسیده است و پس از آن طی روندی صعودی در ۲۲ جولای ۲۰۱۹ حداکثر تراز خود را در سال‌های اخیر ثبت کرده است. برای محاسبه حجم از دست رفته ظرفیت مخزن از ابتدای زمان بهره‌برداری تا ابتدای سال ۲۰۲۰، اختلاف حداکثر ظرفیت ذخیره آب مخزن در زمان بهره‌برداری (در تراز سطح آب ۴۷۳ متر معادل تراز تاج سرریز) با حجم آب ذخیره‌شده مخزن در جولای ۲۰۱۹ محاسبه شد. برای این منظور با استفاده از اطلاعات بدست آمده در جدول ۱ منحنی ارتفاع-سطح مخزن مطابق شکل ۹ ترسیم گردید و به کمک درون‌یابی مقادیر مساحت‌های سطح آب در ترازهای ۴۷۱/۵ و ۴۷۲/۵ متر برای افزایش دقت در نتایج تخمین آب ذخیره‌شده در مخزن محاسبه و به داده‌های جدول ۱ اضافه شد.



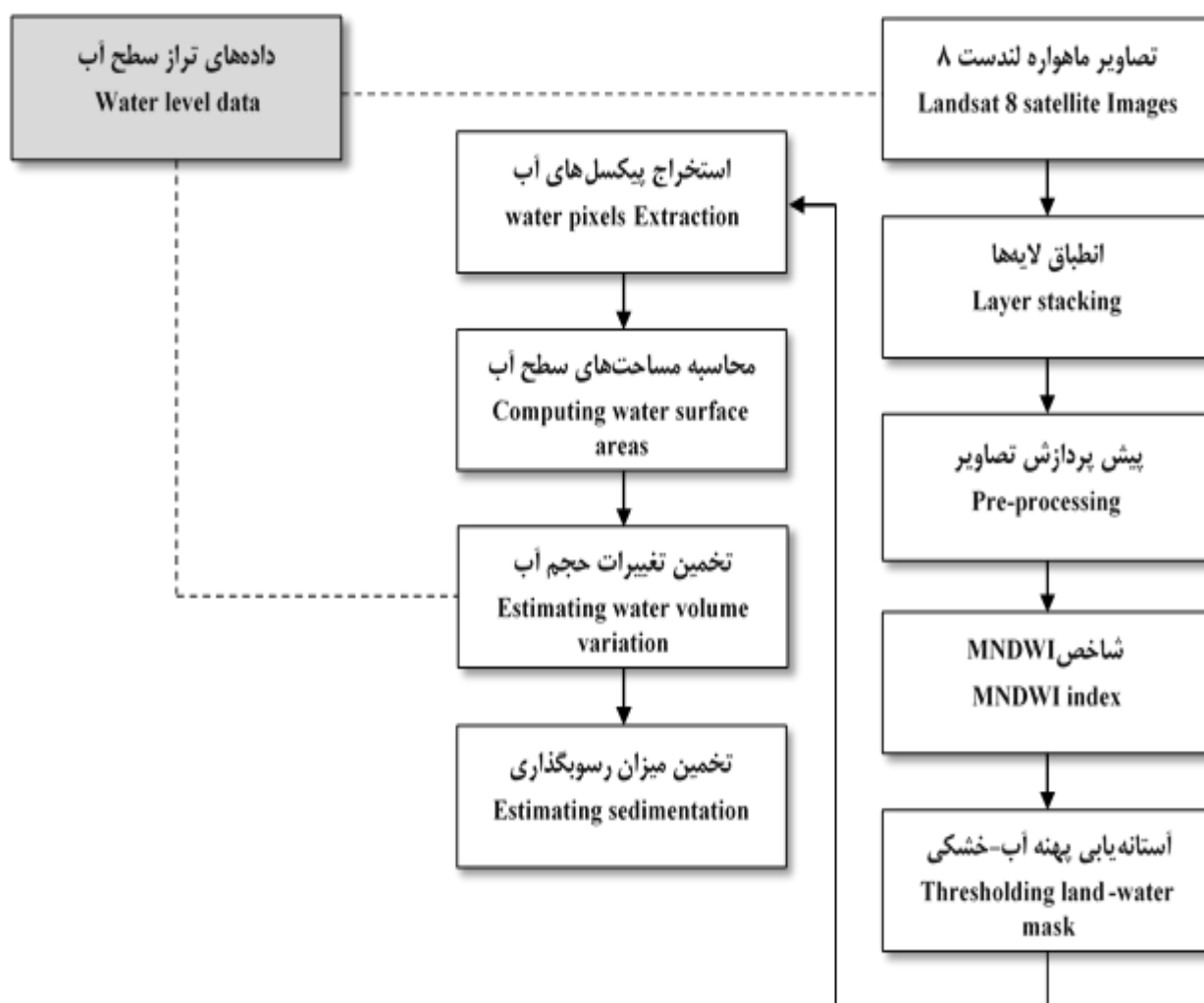
شکل ۹. منحنی ارتفاع-سطح مخزن O. H. Ivie با استفاده از مساحت‌های محاسبه شده بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹.

به منظور عملیات درون‌یابی مقدار مساحت محاسبه‌شده برای تراز حداکثر سطح آب ۴۷۳ متر برابر مجموع مساحت سطح پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای منطبق بر محدوده مخزن سد (۷۷۵۵۳ پیکسل) که معادل ۶۹/۸ کیلومتر مربع می‌باشد در نظر گرفته شد. بر اساس شکل ۹ مقادیر محاسبه‌شده برای ترازهای سطح آب ۴۷۱/۵ و ۴۷۲/۵ متر به ترتیب ۵۸/۱۱ و ۶۸/۱۷ کیلومتر مربع به دست آمد. حجم‌های بین سطوح متوالی ترازهای سطح آب از روش منشوری (Jain et al., 2002) که برای محاسبه حجم آب مخازن ارائه شده است طبق رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{3} \{ (A_1 + A_2) + \sqrt{A_1 \times A_2} \} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن ΔV حجم ذخیره مخزن بین دو تراز متوالی (H_2 و H_1) در دو زمان متفاوت، A_1 و A_2 به ترتیب مساحت پهنه آب در ترازهای H_1 و H_2 ، و ΔH اختلاف تراز سطح آب بین دو تراز متوالی H_1 و H_2 می‌باشد. پس از محاسبه حجم بین ترازهای مختلف آب و به‌دست آوردن حجم نهایی آب ذخیره‌شده در مخزن، نرخ رسوب‌گذاری سالانه (TCL) در یک دوره زمانی مشخص از رابطه ۳ بدست می‌آید (Haregeweyn et al., 2012)، که در آن N تعداد سال‌های دوره موردنظر و V_1 و V_2 به ترتیب ظرفیت ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره می‌باشند:

$$TCL_{(year)} = \frac{1}{N} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$



شکل ۱۰. فلوجارت تخمین میزان رسوب‌گذاری مخزن سد.

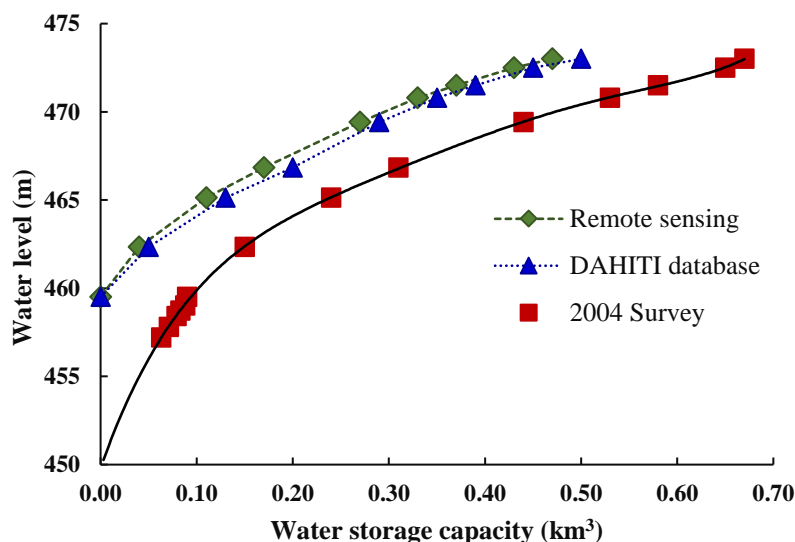
یافته‌های پژوهش

با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۱ و شکل ۹ و جایگذاری آن‌ها در رابطه ۲، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن بین ترازهای متوالی سطح آب برای بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه شد. در جدول ۲ مقادیر حجم‌های آب به‌دست‌آمده توسط روش پیشنهادی ($V_{computed}$)، حجم‌های آب محاسبه‌شده توسط پایگاه داده DAHITI (V_{DAHITI}) و حجم‌های آب محاسبه‌شده توسط پایگاه داده TWDB (V_{TWDB}) استخراج‌شده از منحنی ارتفاع-حجم مخزن O. H. Ivie (به روز شده با عملیات هیدروگرافی در ۳۰ سپتامبر ۲۰۰۴) آمده است.

جدول ۲. نتایج تغییرات حجم‌های محاسبه شده با سنجش از دور در بازه زمانی مورد مطالعه برای مخزن O. H. Ivie.

تاریخ	تراز سطح آب (متر)	مساحت پهنه آب (کیلومتر مربع)	تغییرات حجم (کیلومتر مکعب)	حجم تجمعی (کیلومتر مکعب)	حجم DAHITI (کیلومتر مکعب)	حجم TWDB ₂₀₀₄ (کیلومتر مکعب)
۲۰۱۶/۰۲/۱۱	۴۵۹/۵۱	۱۳/۸۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹
۲۰۱۶/۱۰/۱۷	۴۶۲/۳۳	۲۰/۷۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۵
۲۰۱۸/۱۰/۳۰	۴۶۵/۱۳	۲۹/۷۹	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۲۴
۲۰۱۸/۱۲/۱۰	۴۶۶/۸۳	۳۲/۷۴	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۳۱
۲۰۱۹/۰۵/۱۹	۴۶۹/۴۲	۴۵/۴۱	۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۴۴
۲۰۱۹/۰۷/۲۲	۴۷۰/۸۰	۵۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۵۳
درون یابی	۴۷۱/۵۰	۵۸/۱۱	۰/۰۳	۰/۳۷	-	۰/۵۸
درون یابی	۴۷۲/۵۰	۶۸/۱۷	۰/۰۶	۰/۴۳	-	۰/۶۵
درون یابی	۴۷۳/۰۰	۶۹/۸۰	۰/۰۳	۰/۴۷	-	۰/۶۷

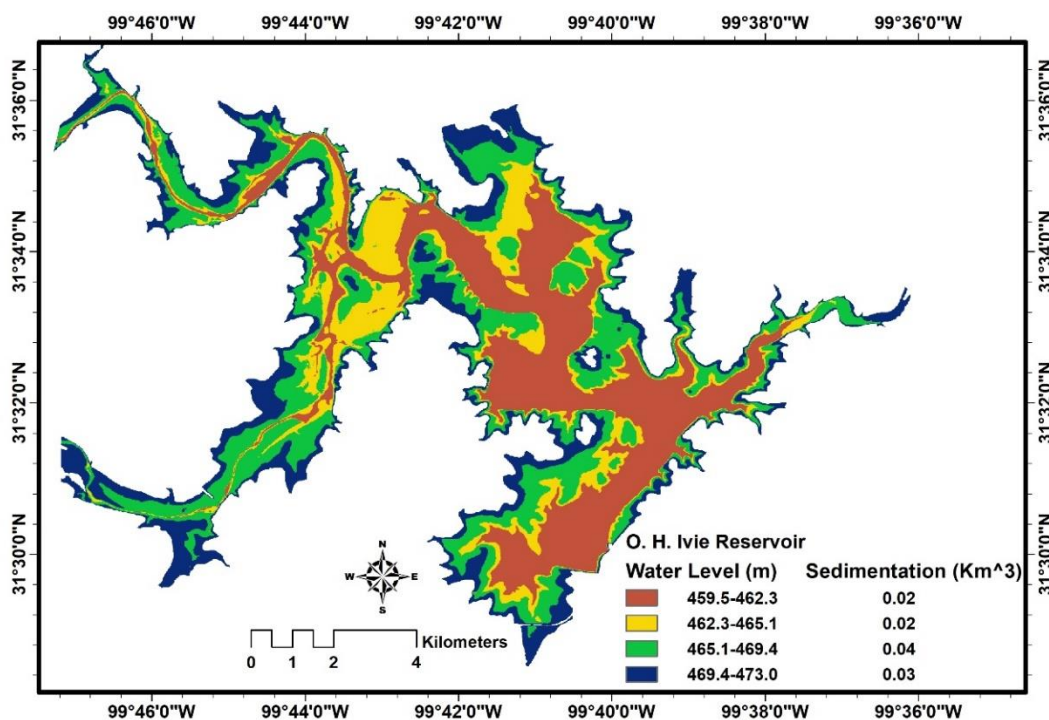
مطابق نتایج بدست آمده از ستون‌های ۵ و ۶ جدول ۲، مقایسه حجم‌های محاسباتی با استفاده از روش پیشنهادی ($V_{computed}$) و حجم‌های پایگاه داده (V_{DAHITI}) نشان می‌دهد که میانگین خطای محاسبه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن و میانگین اختلاف حجم‌های بدست آمده در محدوده ترازهای سطح آب مورد مطالعه به ترتیب حدود ۹ درصد و ۱۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. مقایسه نتایج بدست آمده از ستون‌های ۵ و ۷ جدول ۲ نشان می‌دهد که ظرفیت ذخیره آب گزارش شده توسط پایگاه داده (V_{TWDB}) برای تراز سطح آب ۴۵۹/۵۱ متر حدود ۹۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که مطابق تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات پایگاه داده (V_{DAHITI}) این مقدار به دلیل ته‌نشینی رسوبات به حدود صفر رسیده است. همچنین طبق منحنی ارتفاع-حجم پایگاه داده TWDB برای حداکثر تراز مجاز سطح آب مخزن (۴۷۳ متر) ظرفیت ذخیره آب (V_{TWDB}) حدود ۶۷۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که محاسبات روش پیشنهادی، این ظرفیت ($V_{Computed}$) را حدود ۴۷۲ میلیون مترمکعب تا پایان سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. از مقایسه اختلاف این دو مقدار با ظرفیت زمان بهره‌برداری مخزن، مقدار حجم رسوب انباشته‌شده در بازه زمانی ۲۸ ساله حدود ۲۲۳ میلیون مترمکعب معادل ۳۲ درصد از حجم کل اولیه مخزن برآورد شد که از این مقدار رسوب حدود ۲۵ میلیون مترمکعب بین سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۱ و ۱۹۸ میلیون مترمکعب بین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۴ ته‌نشین شده است. مطابق رابطه ۳، نرخ رسوب‌گذاری سالانه مخزن از دو زمان شروع بهره‌برداری و نیز انجام عملیات هیدروگرافی در مخزن تا پایان سال ۲۰۱۹ به ترتیب ۱/۱۴ و ۲/۰۳ درصد بدست آمد. شکل ۱۱ نمودارهای ارتفاع-حجم مخزن O. H. Ivie را برای نتایج محاسباتی با روش سنجش از دور، داده‌های پایگاه DAHITI و منحنی ارتفاع-حجم پایگاه TWDB نشان داده است.



شکل ۱۱. مقایسه نمودارهای ارتفاع-حجم مخزن O. H. Ivie با استفاده از نتایج سنجش از دور و پایگاه‌های DAHITI و TWDB.

شکل ۱۱ انطباق نتایج بدست آمده به کمک روش سنجش از دور و داده‌های پایگاه DAHITI را به خوبی نشان می‌دهد. در ترازهای

یکسان از مقایسه حجم‌های محاسبه‌شده روش پیشنهادی با منحنی ارتفاع-حجم TWDB مشاهده می‌شود که ظرفیت ذخیره مخزن از کمترین تا بیشترین تراز سطح آب مشاهداتی، به دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد کاهش یافته است و توزیع رسوب بین ترازهای مختلف آب تقریباً یکنواخت بوده است. نتایج برون‌یابی منحنی ارتفاع-حجم TWDB و مقایسه آن با منحنی ارتفاع-حجم روش پیشنهادی نشان داد که در ظرفیت ذخیره صفر، تراز کف مخزن از حدود ۴۵۰ متر به حدود ۴۵۹ متر رسیده است که بر این اساس میانگین ارتفاع رسوب ته‌نشین شده در کف مخزن بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹ حدود ۹ متر بدست آمد. شکل ۱۲ حجم رسوب ته‌نشین شده بین ترازهای سطح آب مخزن O. H. Ivie (مطابق جدول ۲) را از مقایسه اختلاف تغییرات حجم تجمعی محاسبه‌شده در ستون ۵ و تغییرات حجم گزارش‌شده TWDB در ستون ۷ نشان داده است.



شکل ۱۲. حجم رسوب ته‌نشین شده در مخزن O. H. Ivie بین ترازهای سطح آب مختلف در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹.

بحث

بر اساس نتایج بدست آمده میانگین خطای محاسبه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن O. H. Ivie حدود ۹ درصد بدست آمد که از مقایسه آن با مطالعات مشابه صورت گرفته در این زمینه (Pham-Duc et al., 2022) می‌توان گفت روش پیشنهادی این قابلیت را دارد که با کمترین هزینه و در زمان کوتاه، تغییرات حجم آب ذخیره مخازن سدها بین ترازهای مختلف سطح آب را با دقت بالایی برآورد نماید. پژوهش‌های مشابه در زمینه بررسی نرخ رسوب‌گذاری در مخازن، میانگین جهانی ۱ تا ۲ درصد نرخ رسوب‌گذاری سالانه را برای کشورهای توسعه یافته ارائه داده‌اند (Nyikadzino & Gwate, 2021. Tesfaye et al., 2022) که مطابق نتایج بدست آمده مخزن O. H. Ivie با نرخ رسوب سالانه ۱/۱۴ مطابقت خوبی با مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نشان داد که توزیع رسوب ته‌نشین شده بین ترازهای مختلف سطح آب مخزن، از افزایش یا کاهش عمق آب تاثیرپذیری خاصی نمی‌گیرد و این توزیع رسوب می‌تواند تحت عواملی مثل اندازه رسوبات، موقعیت تشکیل دلتا، شیب جریان و فرم هندسی مخزن تغییر کند.

نتیجه‌گیری

مدیریت صحیح مصرف منابع آبی به ویژه در کشورهای در حال توسعه نیازمند اطلاعات دقیق و منظم از روند تغییرات ظرفیت ذخیره مخازن سدها است. در این پژوهش به کمک علم سنجش از دور یک روش دقیق برای محاسبه نرخ رسوب‌گذاری مخازن سدها ارائه گردید و برای اعتبارسنجی نتایج از دو پایگاه معتبر سری‌های زمانی داده‌های هیدرولوژیکی مخازن و دریاچه‌ها استفاده شد. با بررسی محاسبات



مخزن O. H Ivie مشخص شد که طی مدت زمان ۲۸ سال ظرفیت ذخیره مخزن از ۶۹۵ به ۴۷۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته است که بر این اساس نرخ رسوب‌گذاری سالانه مخزن حدود ۱/۱۴ درصد می‌باشد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند ضمن دقت بالا در محاسبات با صرف کمترین زمان و هزینه، جایگزین مناسبی برای روش‌های مستقیم شامل هیدروگرافی مخازن و روش‌های غیرمستقیم شامل نمونه‌برداری از رسوبات در مسیر جریان‌های ورودی به مخازن باشد، و می‌توان از آن برای تخمین منحنی‌های ارتفاع-مساحت-حجم آب مخازن سدها استفاده کرد. با کمک روش پیشنهادی در این پژوهش، علاوه بر تخمین حجم آب ذخیره شده در مخزن می‌توان با برآورد نرخ رسوب‌گذاری در بلندمدت، عمر مفید مخازن را نیز پیش‌بینی کرد. آگاهی از ظرفیت ذخیره و برآورد عمر مفید مخازن سدها بر اثر رسوب‌گذاری از مهم‌ترین مزایای روش ارائه‌شده در این پژوهش می‌باشد.

پیشنهادها

در کشور ایران سالانه بودجه قابل توجهی توسط سازمان‌های ذیربط برای تعیین حجم رسوب انباشته‌شده در مخازن سدها تخصیص داده می‌شود. بنابراین استفاده از علوم نوین برای افزایش دقت نتایج، کاهش هزینه‌ها و کاهش خطرات جانی در حین انجام عملیات اندازه‌گیری-های میدانی ضروری است. یکی از مهمترین راهکارها در این زمینه استفاده از علم سنجش‌ازدور یا فناوری ماهواره‌ای است. پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای به‌کارگیری مدل‌های سنجش‌ازدور استفاده کرده‌اند. در این پژوهش با استفاده از روشی دقیق برای محاسبه مساحت سطوح آب که خطاهای سنجنده در ارسال داده‌ها را کاهش می‌دهد استفاده شد و با محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سد در زمان‌های مختلف، حجم رسوب‌گذاری در مخزن برآورد شد. با توجه به ارتباط دریاچه‌های طبیعی با حفاظت از اکوسیستم و تنوع زیستی، روش پیشنهادی می‌تواند در راستای بررسی نتایج مربوط به اعمال شیوه‌های کاهش فرسایش دریاچه‌های طبیعی با حفاظت از اکوسیستم و تنوع زیستی، روش قابل توجه نرخ رسوب‌گذاری مواجه هستند، استفاده شود.

به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهبود مدیریت منابع آبی، ضمن توصیه کاربرد روش ارائه‌شده در این تحقیق برای مخازن سدهای مهم کشور (سدهای دز، کرخه، و ...)، موارد تکمیلی زیر نیز پیشنهاد می‌شوند:

بررسی کارایی تصاویر ماهواره‌ای در ارزیابی اثرات اقدامات اصلاحی (انجام عملیات آبخیزداری، احیاء پوشش گیاهی حوضه آبخیز و احداث سدهای رسوب‌گیر در بالادست سدهای مخزنی) که با هدف کاهش حجم رسوب ورودی به مخزن سد انجام شده است.

مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های مستقیم، به کمک داده‌های جریان و رسوب کافی از مخزن سد و حوضه آبخیز.

استفاده در مواردی که اطلاعات زمانی داده‌های اندازه‌گیری (هیدروگرافی، رسوب‌سنجی و هیدرومتری) برای مخازن و شاخه‌های ورودی به آن‌ها در دسترس نیستند.

پیش‌بینی عمر مفید مخزن سدهای کشور به منظور بررسی و مدیریت اقدامات حفاظتی مثل لایروبی و یا ایجاد جایگزین مناسب برای تامین ظرفیت ذخیره آب موردنیاز در زمانی که مخزن سد به دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد غیرقابل استفاده خواهد شد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Chomba, I. C. (2016). Sedimentation and its effects on selected small dams in Lusaka Province, Zambia (Doctoral dissertation, University of Zambia).
- Droujko, J., Sudha, S. H., Singer, G., & Molnar, P. (2023). Sediment source and sink identification using Sentinel-2 and (kayak-based) lagrangian river turbidity profiles on the Vjosa River. *EGU sphere*, 2023, 1-24.
- Gonzalez Rodriguez, L., McCallum, A., Kent, D., Rathnayaka, C., & Fairweather, H. (2023). A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. *Aquatic Sciences*, 85(2), 60.
- Haregeweyn, N., Melesse, B., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Meshesha, D., & Balana, B. B. (2012). Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia). *Journal of Soils and Sediments*, 12, 291-305.
- Jain, S. K., Singh, P., & Seth, S. M. (2002). Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data. *Hydrological Sciences Journal*, 47(2), 203-212.

- Li, L., Su, H., Du, Q., & Wu, T. (2021). A novel surface water index using local background information for long term and large-scale Landsat images. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 172, 59-78.
- 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.
- Mueller, J. M. (1990). *Population dynamics of the Concho water snake* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Nyikadzino, B., & Gwate, O. (2021). Estimation of Reservoir Capacity and Sedimentation Rate Using Direct and Indirect Methods. *Int J Earth Sci Geophys*, 7, 045.
- Patni, B. S., Patel, H. R., & Bhangaonkar, P. D. (2017). Assessment of sedimentation in Ajwa reservoir in the Vadodara Gujarat region using remotely sensed data. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 16-20.
- Pham-Duc, B., Frappart, F., Tran-Anh, Q., Si, S. T., Phan, H., Quoc, S. N., ... & Viet, B. D. (2022). Monitoring lake volume variation from space using satellite observations—A case study in Thac Mo Reservoir (Vietnam). *Remote Sensing*, 14(16), 4023.
- Schwatke, C., Dettmering, D. and Seitz, F., (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, 12(10), p.1606.
- 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.
- Sekertekin, A., Abdikan, S., & Marangoz, A. M. (2018). The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-13.
- Singh, M. C., Prashar, A., Singh, J., & Kumar, S. (2023). Reservoir capacity loss and sedimentation assessment of Dholbaha dam located in Punjab, India using remote sensing and bathymetric survey techniques. *Water Practice & Technology*, 18(11), 2901-2922.
- Teixeira Pinto, C., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of Landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote sensing*, 12(16), 2597.
- Tesfaye, A. T., Moges, M. A., Moges, M. M., Worqlul, A. W., Defersha, D. T., & Wassie, A. B. (2023). Reservoir sedimentation evaluation using remote sensing and GIS approaches for the reservoirs in the upper Blue Nile Basin. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 23.
- Wagh, S., & Manekar, V. (2021). Assessment of reservoir sedimentation using satellite remote sensing technique (SRS). *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(3), 851-860.
- Work, E. A., & Gilmer, D. S. (1976). Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(5), 685-694.
- 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.
- 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.



Estimation of sedimentation rate and storage capacity of reservoir dams using satellite imagery

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

For thousands of years humans have relied on reservoirs—regulated natural lakes and human made ones, for water supply, irrigation, and more recently hydropower generation. Reservoirs created by impounding sediment-laden streams infill over time, reducing storage capacity and altering water quality. sedimentation rates are poorly understood due to sparse bathymetry survey data and challenges in modeling sedimentation sequestration. The loss of reservoir capacity especially in developing countries brings with it adverse environmental, social and economic problems to people relying on these dams Sediment deposition in water reservoirs has major implications for storage capacity, reservoir lifetime, and water quality. Changes in rainfall patterns and land use will consequently alter the rate of erosion and therefore have a direct effect on sedimentation rates. Therefore, it is imperative that reservoir capacity re-assessment studies are regularly carried out. current methods of sediment analysis being employed in many countries are resource demanding in a context of financial and material resources scarcity. Reservoir capacity estimation and sedimentation analysis have commonly been conducted through the use of either direct or indirect methods of sediment quantification. direct methods refer to hydrographic survey techniques, which measure the actual sediments in the reservoir. Indirect methods refers to sediment sampling and soil loss models which can be used to indirectly quantify expected sediment flow into a reservoir without conducting any direct measurements in the reservoir. we proposed a novel approach to estimate reservoir sedimentation rates and storage capacity losses using Landsat-8 OLI satellites and daily in situ water levels.

Material and Methods

The study sought to monitor sedimentation of O. H. Ivie reservoir in the state of Texas in USA. Six Landsat 8 OLI datasets for the period 2016 to 2019 were used. Remotely sensed sedimentation data was analyzed using the MNDWI index method. The study employed a longitudinal survey design. Longitudinal survey design allowed the use of data collected overtime between years 1991 and 2019. Dam level and remotely sensed data was used in the study and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) method was employed for data analysis. After computing the water surface areas, the reservoir capacity between two consecutive reservoir water levels was computed by the Prismoidal method. Finally, we estimated the sediment volume and sedimentation rate based on the difference between the near-present storage capacity and the original maximum storage in design-shown. DAHITI and TWDB database were used to validate the data.

Results and Discussion

By comparing the results of estimating the volume of water stored in the O. H. Ivie reservoir with the data of DAHITI database, the result shown, the average error of calculating the volume of water stored was found to be about 9%. Based on TWDB database and the results, the storage capacity of O. H. Ivie reservoir has decreased from 695 million cubic meters at the beginning of operation (1991) to 472 million cubic meters in 2019. The results showed that the lost storage capacity of the reservoir due to sedimentation is about 32% of the original volume and the annual sedimentation rate is 1.4%. Also, the lost storage volume of the reservoir between 2004 and 2019 was about 198 million cubic meters. by evaluating the obtained results, the average height of sediment deposited in the reservoir between 2004 and 2019 was estimated to be about 9 meters.

Conclusion

The study has indicated that the use of GIS and remote sensing techniques enabled a fast and reasonably accurate estimation of live storage capacity losses due to sedimentation. The approach has also been found to be cost-effective and convenient approaches to estimate the elevation–area–capacity curves for the reservoirs. The results have also indicated that this approach for sedimentation surveys can be carried out at smaller intervals and longer periods than Conventional methods, Remote sensing and GIS can be used to a large extent, to overcome the difficulty in the collection, transfer, and sharing of a large amount of bathymetric data. Moreover, the proposed methodology can be used largely, to overcome information scarcity problems when the field survey data and physically based models are unavailable. The results of the present study can assist in developing effective management strategies and providing realistic options to policymakers for managing soil erosion hazards most efficiently for prioritizing different regions of the reservoirs for remedial treatments.

Keywords: Landsat 8 OLI, MNDWI Index, Reservoir Dam, Sedimentation Rate, Storage Capacity.