Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.33353

Comparative Evaluation of the Efficiency of Multi-Meter Spectral Indices in Monitoring the Spatio-Temporal Dynamics of Watersheds in Semi-Arid Regions: A Case Study of Golestan Dam

Omolbani Mohammadrezapour[1], Hadi Siasar[2], Mohammadjavad Zeynali[3] and Mohammad Nazeri Tahroudi[4]

(Received: September 30-2025 ; Revised: December 8-2025 ; Accepted: December 22-2025)

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Department of Agriculture, Payam Noor University, Tehran , Iran.
3. Department of Water Science, Faculty of Agriculture, Torbat Heydarieh University, Torbat Heydarieh, Iran.
4. Department of Water Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran
*Corresponding author, E-mail: Mohammadrezapour@gau.ac.ir

Abstract

Accurate monitoring of water surface dynamics in semi-arid regions poses challenges due to uncertainties regarding the optimal spectral index and sensor selection for effective water resource management. This study assessed the comparative performance of nine spectral water indices across the Landsat-8 and Sentinel-2 platforms to identify the best index-sensor combinations for monitoring semi-arid reservoirs. Utilizing the Google Earth Engine cloud computing platform, 181 satellite images were processed for Golestan Dam in northeastern Iran, comprising 107 Landsat-8 scenes from 2013 to 2023 and 74 Sentinel-2 scenes from 2018 to 2024. After applying atmospheric corrections using the LEDAPS and Sen2Cor algorithms, nine spectral indices (NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI, WI2015, WI1, WI2, LSWI, and NDTI) were calculated and evaluated against the WI2 reference through RMSE, R^2, and Nash-Sutcliffe efficiency metrics. MNDWI showed superior performance for Sentinel-2 (RMSE=21.42 ha, R^2=0.998, NS=0.996), while ANDWI was optimal for Landsat-8 (RMSE=54.54 ha, R^2=0.977, NS=0.976). Time-series analysis revealed a 35% reduction in mean annual reservoir area, decreasing from 7.28 km² in 2014 to 4.72 km² in 2021. Consistent seasonal patterns were observed, with spring maxima (9.33 km² in March) and autumn minima (3.35 km² in September) evident across both sensors. A high inter-sensor correlation (r = 0.933) supports the potential for multi-sensor integration in comprehensive monitoring efforts. The LSWI and NDTI indices displayed systematic overestimation due to interference from soil moisture and vegetation, making them unsuitable for quantifying water area. These findings highlight the sensor-dependent nature of optimal index selection, recommending MNDWI-Sentinel-2 pairing for short-term monitoring and ANDWI-Landsat-8 for long-term trend analysis in the management of semi-arid reservoirs.

Keywords: Remote sensing; Optimum water index selection; Multi-temporal analysis; Semi-arid

How to cite this article: Mohammadrezapour, O., Siasar, H., M. Zeynali and Nazeri Tahroudi, M. 2026. Comparative Evaluation of the Efficiency of Multi-Meter Spectral Indices in Monitoring the Spatio-Temporal Dynamics of Watersheds in Semi-Arid Regions: A Case Study of Golestan Dam. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 16-37. DOI: 10.47176/jwss.30.2.33353

Copyright © 2026 Mohammadrezapour et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۶ تا ۳۷ 10.47176/jwss.30.2.33353

ارزیابی تطبیقی کارایی شاخص‌های طیفی چندسنجنده‌ای در پایش دینامیک مکانی - زمانی پهنه‌های آبی مناطق نیمه‌خشک: مطالعه موردی سد گلستان

ام‌البنی محمدرضاپور[1*]، هادی سیاسر[2]، محمدجواد زینلی[3] و محمد ناظری تهرودی[4]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۸ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۲. گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.
۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Mohammadrezapour@gau.ac.ir

چکیده

پایش پهنه‌های آبی در مناطق نیمه‌خشک برای مدیریت منابع آب حیاتی است، اما انتخاب شاخص طیفی بهینه و سنجنده مناسب همچنان چالش‌برانگیز باقی مانده است. این پژوهش با هدف ارزیابی تطبیقی کارایی نُه شاخص طیفی آب در دو سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ برای تعیین ترکیب بهینه شاخص - سنجنده در پایش کوتاه‌مدت (با تمرکز بر دقت مکانی زیاد و تغییرات فصلی) و بلندمدت (با تمرکز بر روندهای سالانه و پوشش زمانی گسترده) پهنه آبی سد گلستان انجام شد. با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine (GEE)، ۱۸۱ تصویر ماهواره‌ای (۱۰۷ تصویر لندست-۸ طی ۲۰۲۳-۲۰۱۳ و ۷۴ تصویر سنتینل-۲ طی ۲۰۲۴-۲۰۱۸) از سد گلستان پردازش شد. پس از تصحیحات اتمسفری با الگوریتم‌های LEDAPS و Sen2Cor ، نُه شاخص طیفی شامل NDWI، MNDWI، ANDWI، AWEI، WI2015، WI1، WI2، LSWI و NDTI محاسبه و با استفاده از شاخص WI2 به‌عنوان مرجع (به دلیل عملکرد برتر در استخراج دقیق پهنه‌های آبی نیمه‌خشک با حساسیت کم به نویز گیاهی و خاکی نشان داده و همبستگی زیادی با داده‌های میدانی دارد)، کارایی آنها بر اساس معیارهای RMSE ، R^2 و ضریب نش - ساتکلیف ارزیابی شد. نتایج نشان داد MNDWI در سنتینل-۲ بهترین عملکرد را با RMSE=۲۱/۴۲ha، R^2=۰/۹۹۸ و NS=۰/۹۹۶ ارائه می‌دهد که به دلیل دقت مکانی ۱۰ متری و دوره بازگشت ۵ روزه، برای پایش کوتاه‌مدت تغییرات فصلی مانند اوج بهاری ۹/۳۳km² در مارس ایده‌آل است؛ درحالی‌که ANDWI در لندست-۸ با RMSE=۵۴/۵۴ha، R^2=۰/۹۹۷ و NS=۰/۹۷۶ برتری دارد و به دلیل پوشش زمانی بلند (۲۰۲۳-۲۰۱۳)، برای تحلیل بلندمدت روندهای سالانه مانند کاهش ۳۵٪ میانگین مساحت مخزن از ۷/۲۸km² در ۲۰۱۴ به ۴/۷۲km² در ۲۰۲۱ مناسب است. همبستگی زیاد دو سنجنده (r=۰/۹۳۳) امکان ترکیب آنها را برای پایش چندمقیاسه فراهم می‌آورد؛ درحالی‌که LSWI و Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) به دلیل بیش‌برآورد ناشی از رطوبت خاک و پوشش گیاهی، نامناسب تشخیص داده شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد انتخاب شاخص بهینه به ویژگی‌های طیفی سنجنده وابسته است و ترکیب MNDWI - سنتینل۲ برای پایش کوتاه‌مدت و ANDWI - لندست۸ برای تحلیل‌های بلندمدت توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، انتخاب بهینه شاخص آب، تحلیل چندزمانه، نیمه‌خشک

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

سد گلستان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های مدیریت منابع آبی در شمال شرق ایران است که نقشی کلیدی در تأمین آب شرب، کشاورزی و کنترل سیلاب‌های فصلی ایفا می‌کند. این سد با مدیریت رواناب‌های سطحی و تنظیم جریان آب، به کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند (۱). یکی از اصلی‌ترین چالش‌های این سد، رسوب‌گذاری گسترده در مخزن است که باعث کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی و افزایش خطر سیلاب در مناطق پایین‌دست می‌شود. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که رسوب‌گذاری مداوم در مخازن سدها به‌طور متوسط سالانه ۰/۵ تا ۱ درصد از ظرفیت آنها را در سطح جهانی کاهش می‌دهد (۳)؛ اما در مناطق نیمه‌خشک مانند ایران، این نرخ بیشتر و حدود ۱ تا ۱/۱۵ درصد در سال است (۳۰ و ۳۱). در سد گلستان، این عدد به دلیل شرایط توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، بسیار بیشتر است که منجر به کاهش عمر مفید سد می‌شود. تکنیک‌های مکانیکی و طبیعی مدیریت رسوبات می‌توانند نقش مؤثری در حل این مشکل ایفا کنند (۱۵، ۲۳ و ۲۴). در سد گلستان، این عدد به دلیل شرایط توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، بسیار بیشتر است (۲۳). مشکل دیگر سد گلستان کاهش کیفیت آب ناشی از ورود آلاینده‌های شهری و کشاورزی است. استفاده بی‌رویه از کودها و سموم شیمیایی در مناطق اطراف و ورود فاضلاب‌های تصفیه‌نشده به مخزن، منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها شده و کیفیت آب را برای مصارف انسانی و زیست‌محیطی کاهش می‌دهد (۱۸). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی شامل افزایش دما، کاهش بارش و تغییر الگوهای هیدرولوژیک، منابع آبی این منطقه را تحت تأثیر قرار داده است (۲۸). پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهند که مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، از جمله گلستان، ممکن است تا سال ۲۰۵۰ با کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی منابع آبی مواجه شوند (۱۵). کاهش ظرفیت و کیفیت آب این سد می‌تواند اثرهای قابل‌توجهی بر توسعه اقتصادی، امنیت غذایی و زیست‌محیطی منطقه بگذارد. ازاین‌رو، مدیریت بهینه این سد یکی از ضرورت‌های کلیدی برای منطقه است (۲۴). کاهش کیفیت آب ناشی از ورود آلاینده‌ها می‌تواند تأثیرات جدی بر سلامت عمومی و محیط‌زیست منطقه داشته باشد. فناوری‌های پیشرفته مانند سنجش از دور و الگوریتم‌های پردازش تصویر، می‌توانند ابزارهای کارآمدی برای پایش تغییرات سطحی کیفیت آب (مانند شناسایی آلاینده‌های معلق یا تغییرات طیفی ناشی از آلودگی‌های سطحی) و مدیریت این مشکل باشند (۲۰ و ۲۵). پایش دقیق تغییرات مکانی و زمانی سطح آب سدها می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مؤثرتر کمک کند و تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی را کاهش دهد (۱، ۷ و ۹). استفاده از فناوری سنجش از دور و شاخص‌های طیفی مانند Normalized Difference Water Index (NDWI) و Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) می‌تواند به شناسایی دقیق تغییرات سطح آب کمک کند (۱۵ و ۲۵). این روش‌ها ابزارهای مناسبی برای تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی و انسانی بر منابع آبی هستند (۱، ۵ و ۸). در همین راستا، مطالعات مختلفی صورت گرفته که به اختصار اشاره می‌شود. کائو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از Google Earth Engine (GEE)، سری زمانی از تصاویر لندست و شاخص آب MNDWI خط ساحلی ماهانه در مجمع‌الجزایر ژوشان چین را بررسی کردند (۴). ونگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز به مطالعه شاخص‌های Automated Water Extraction Index shadow (AWEIsh)، Automated Water Extraction Index non-shadow (AWEInsh)، MNDWI و NDWI روی تصاویر لندست۸ و سنتینل۲ پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد عملکرد تصاویر سنتینل۲ در استخراج پهنه‌های آبی بهتر از لندست است (۱۶). فیکاس و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از سری زمانی تصاویر لندست، تغییرات و نوع تبدیل مناطق تالابی را در دشت سیل رودخانه ویلامیت در ایالت اورگان ایالات متحده بررسی کردند (۱۲). زبردست و جعفری (۲۰۱۱) با استفاده از سنجش از دور وGIS، روند تغییرات تالاب انزلی را در یک دوره ده‌ساله بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد این تالاب دچار تخریب و تغییرات قابل‌توجهی در ویژگی‌های

محیطی خود شده است (۲۹). در راستای پایش دقیق و مستمر تغییرات پهنه آبی سد گلستان، این مطالعه با بهره‌گیری همزمان از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ (۲۰۲۳–۲۰۱۳) و سنتینل-۲ (۲۰۲۳–۲۰۱۷)، امکان تحلیل جامع و چندمقیاسه تغییرات را فراهم می‌آورد. در این پژوهش فرض بر این اساس است که کارایی شاخص‌های طیفی آب در استخراج پهنه‌های آبی به نوع سنجنده وابسته است و ترکیب بهینه شاخص – سنجنده می‌تواند دقت پایش کوتاه‌مدت و بلندمدت را بهبود بخشد. سنجنده OLI/TIRSماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پوشش طیفی گسترده (۰/۴۳ تا ۲/۲۹ میکرومتر)، داده‌های ارزشمندی برای بررسی روندهای بلندمدت ارائه می‌دهد (۱۰). در مقابل، سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر در باندهای مرئی و لبه قرمز، و دوره بازگشت پنج‌روزه، امکان پایش دقیق‌تر تغییرات کوتاه‌مدت را میسر می‌کند (۱۰). در فرایند پیش‌پردازش داده‌ها، تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته SREM برای داده‌های لندست و Sen2Cor برای سنتینل-۲ انجام می‌شود (۱۲). همچنین، با به‌کارگیری ماسک‌های کیفیت، پیکسل‌های آلوده به ابر و سایه شناسایی و حذف شده و نرمال‌سازی زاویه دید خورشیدی برای کاهش اثرهای توپوگرافی صورت می‌گیرد (۱۹).

برای استخراج دقیق پهنه‌های آبی، نه شاخص طیفی با کارایی اثبات‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک انتخاب شده‌اند. شاخص NDWI به عنوان یکی از پایه‌ای‌ترین شاخص‌ها، با استفاده از تفاوت بازتاب در باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک، پهنه‌های آبی را شناسایی می‌کند (۲۱). شاخص MNDWI با جایگزینی باند SWIR1 به جای NIR، حساسیت بیشتری به آب‌های عمیق و کاهش اثر پوشش گیاهی نشان می‌دهد (۲۷). شاخص‌های AWEI با دو نسخه متفاوت برای شرایط با و بدون سایه، از ترکیب چندین باند برای افزایش دقت در شرایط پیچیده بهره می‌گیرند (۱۱). شاخص WI2015 با ترکیب باندهای سبز و قرمز در مقابل NIR و SWIR1 تعریف شده و Land Surface Water Index (LSWI) با استفاده از نسبت NIR و SWIR1 برای پایش مناطق مرطوب و آب‌های کم‌عمق بهینه شده‌اند (۵). شاخص NDTI به طور خاص برای شناسایی آب‌های گل‌آلود طراحی شده (۱۷)؛ درحالی‌که Augmented Normalized Difference Water Index (ANDWI) با ترکیب پیچیده‌تر باندها، دقت بیشتری در شرایط متنوع محیطی ارائه می‌دهد (۲۱). شاخص WRI نیز با نسبت باندهای مرئی به مادون قرمز، قابلیت تشخیص پهنه‌های آبی در مناطق باز را بهبود می‌بخشد (۹).

مواد و روش‌ها

روش پژوهش این پژوهش بر مبنای تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و استفاده از ابزارهای پردازش خودکار برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی پهنه‌های آبی سد گلستان طراحی شده است. داده‌ها با استفاده از ابزارهای سنجش از دور، نرم‌افزارهای تخصصی مانند ENVI و ArcGIS و سامانه Google Earth Engine پردازش شدند(۱۳). این پژوهش ترکیبی از روش‌های توصیفی – تحلیلی و تجربی بوده و در قالب چند مرحله اجرایی صورت می‌پذیرد. در مرحله نخست، داده‌های مربوط به تصاویر ماهواره‌ای، از جمله تصاویر لندست۸ و سنتینل۲، برای دوره زمانی مشخص (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳) جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌ها با استفاده از ابزارهای سنجش از دور و نرم‌افزارهای تخصصی مانند ENVI و ArcGIS و سامانه گوگل ارث انجین پردازش خواهند شد. تصحیحات رادیومتری و اتمسفری نیز به‌منظور بهبود کیفیت داده‌ها و کاهش خطاهای ناشی از عوامل محیطی انجام می‌شود. تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم‌های LEDAPS برای لندست-۸ و Sen2Cor برای سنتینل-۲ و SREM برای لندست صورت گرفت. سنجنده لندست-۸ شامل OLI/TIRS و سنجنده سنتینل-۲ شامل MSI است.

در مرحله دوم، شاخص‌های طیفی مختلف، از جمله NDWI، MNDWI، AWEI و سایر شاخص‌های مرتبط، برای

شناسایی پهنه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های شاخص‌های مورد بررسی آمده است. این شاخص‌ها بر اساس رفتار بازتاب طیفی آب در باندهای مختلف محاسبه شده و به تفکیک آب از سایر عوارض زمینی کمک می‌کنند. شاخص‌های مورد استفاده شامل NDWI، MNDWI، ANDWI، AWEI، WI2015، WI1، WI2، LSWI و NDTI هستند که فرمول‌های آنها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده برای تحلیل دقیق‌تر داده‌ها به کار گرفته خواهند شد. روش طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از الگوریتم SVM و روش نظارت‌نشده با استفاده از روش K-means اعمال شد. در مرحله سوم، صحت‌سنجی نتایج حاصل از پردازش تصاویر با استفاده از داده‌های میدانی و اطلاعات مرجع انجام می‌شود. در این مرحله، از تکنیک‌هایی مانند ماتریس خطا، شاخص دقت کلی و شاخص کاپا برای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی و استخراج پهنه‌های آبی استفاده می‌شود. این شاخص‌ها بر اساس کلاس پایه (آب و غیر آب) محاسبه شدند و برای صحت‌سنجی استخراج مساحت، از معیارهای RMSE، MAE، R^2 و NS نسبت به مرجع WI2 استفاده شد. درنهایت، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و تحلیل روند برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی منابع آبی به‌کار گرفته می‌شود. این نتایج امکان تدوین راهکارهای مدیریتی و تصمیم‌گیری‌های بلندمدت را برای مدیریت پایدار منابع آبی و انطباق با شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌آورد. تمامی مراحل پژوهش به‌صورت گام‌به‌گام و با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های پیشرفته و استانداردهای علمی بین‌المللی انجام می‌گیرد تا دقت و اعتبار یافته‌ها تضمین شود. برای استخراج پهنه‌های آبی، روش آستانه‌گذاری Otsu استفاده شد، سپس فیلتر میانه ۳ x3 برای حذف نویز و حذف پلیگون‌های کوچک اعمال شد. روش کار بررسی رخدادهای حدی: برای تحلیل رخدادهای حدی، ابتدا سری زمانی مساحت پهنه آبی بر اساس شاخص WI2 از داده‌های ماهواره‌ای استخراج شد. سپس، مقادیر بیشینه و کمینه با استفاده از توابع آماری min و max در محیط GEE شناسایی شدند. صدک‌های ۱۰، ۵۰ و ۹۰ (P10، P50، P90) با تابع percentile محاسبه شدند تا آستانه‌های مدیریتی (خشک، میانه، پرآبی) تعریف شود. تعداد عبور از آستانه‌ها با شمارش موارد بیشتر/کمتر از صدک‌ها در سری ماهانه تعیین شد. تمام محاسبات در GEE با کد JavaScript اجرا شد.

۱- منطقه مورد مطالعه

سد گلستان با هدف تعدیل نوسانات جریان ورودی رودخانه گرگان‌رود و تأمین آب برای مصارف مختلف احداث شده است و به عنوان یک عنصر کلیدی در توسعه پایدار منطقه، نقشی حیاتی در تنظیم رژیم هیدرولوژیکی حوضه گرگان‌رود بر عهده دارد (۱ و ۲).

بر اساس داده‌های ثبت‌شده، مساحت مخزن سد گلستان بسته به شرایط هیدرولوژیک سالانه و مدیریت بهره‌برداری، در بازه ۱۱۰۰ تا ۱۶۰۰ هکتار متغیر است و حجم ذخیره عملیاتی این سد حدود ۵۰ میلیون مترمکعب ارزیابی شده است (۱). مقدار ورودی سالانه آب به این سد، به طور متوسط ۱۵۰ میلیون مترمکعب ثبت شده است که با توجه به تغییرات اقلیمی و وقوع خشکسالی‌های اخیر، کاهش قابل‌توجهی داشته و روندی نزولی را طی می‌کند (۳). از منظر هیدرولوژیک، بررسی آمار رواناب ورودی و خروجی سد گلستان نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر نوسانات بارش سالانه، نرخ تبخیر و تعرق و تغییرات دبی رودخانه، به‌ویژه در سال‌های خشک است که این عوامل موجب کاهش سطح آب مخزن و کاهش تأمین آب مطمئن برای مصارف پایین‌دست می‌شوند. مطالعات میدانی و تحلیل داده‌های ثبت‌شده ماهیانه مخزن نشان می‌دهد که تغییرات تراز سطح آب و دبی ورودی تحت تأثیر عوامل اقلیمی مانند کاهش بارندگی فصلی، افزایش دمای میانگین و تبخیر سالانه افزایش‌یافته در دهه گذشته بوده است (۶ و ۱۴). داده‌های مدل‌سازی هیدرولوژیک نیز بیانگر آن است که پایداری تأمین آب سد گلستان در میان‌مدت به شدت تحت تأثیر افزایش دفعات و شدت خشکسالی‌ها قرار دارد و مدیریت

جدول ۱. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در استخراج پهنه‌های آبی

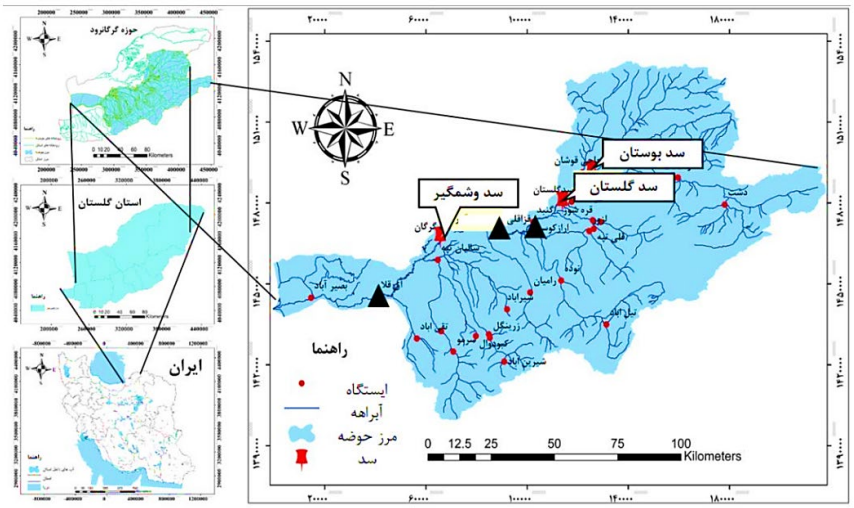
شاخص	معادله ریاضی	آستانه بهینه	کاربرد تخصصی
AWEI	$\rho Blue + 2.5\rho Green - 1.5(\rho NIR + \rho SWIR1) - 0.25\rho SWIR2$	>۰	تشخیص پهنه‌های آبی در مناطق پیچیده
AWEInsh	$4(\rho Green - \rho SWIR1) - (0.25\rho NIR + 2.75\rho SWIR2)$	>۰	شناسایی آب در مناطق بدون سایه
WI2015	$1.7204 + 171\rho Green + 3\rho Red - 70\rho NIR - 45\rho SWIR1 - 71\rho SWIR2$	>۱	پایش آب‌های سطحی
WI1	$(\rho Green - \rho SWIR2) / (\rho Green + \rho SWIR2)$	>۰/۲	تشخیص پهنه‌های آبی عمومی
WI2	$(\rho Blue - \rho SWIR2) / (\rho Blue + \rho SWIR2)$	>۰/۲	تفکیک آب از خشکی
NDWI	$(\rho Green - \rho NIR) / (\rho Green + \rho NIR)$	>۰	شناسایی پایه پهنه‌های آبی
MNDWI	$(\rho Green - \rho SWIR1) / (\rho Green + \rho SWIR1)$	>۰	تشخیص آب‌های عمیق
ANDWI	$(\rho Green + \rho Red - \rho NIR - \rho SWIR1) / (\rho Green + \rho Red + \rho NIR + \rho SWIR1)$	>۰/۱	پایش در مناطق خشک
LSWI	$(\rho NIR - \rho SWIR1) / (\rho NIR + \rho SWIR1)$	>۰/۲	شناسایی آب‌های کم‌عمق
NDTI	$(\rho Red - \rho SWIR1) / (\rho Red + \rho SWIR1)$	۰/۱۵ >	شناسایی آب‌های گل‌آلود
S2WI	$(\rho RE1 - \rho SWIR2) / (\rho RE1 + \rho SWIR2)$	>۰/۲	پایش دقیق مرزهای آبی

ρ: بازتاب طیفی در باند مربوطه، RE1: باند لبه قرمز اول در سنجنده سنتینل-۲، SWIR: باند مادون قرمز موج کوتاه، NIR: باند مادون قرمز نزدیک

بهینه بهره‌برداری از مخزن و ارتقای سامانه‌های پایش و ارزیابی مستمر جزو راهکارهای ضروری مدیریت منابع آب در این منطقه به شمار می‌آید (۲). شکل ۱ موقعیت مکانی سد گلستان را نشان می‌دهد.

۲- داده های مورد استفاده

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکردی نظام‌مند در پردازش داده‌های ماهواره‌ای، مبتنی بر بستر محاسبات ابری گوگل ارث انجین (GEE) و زبان برنامه‌نویسی JavaScript، به تحلیل جامع پهنه‌های آبی می‌پردازد. در مرحله نخست، داده‌ها از منابع مختلف



شکل ۱. محدودهٔ مطالعه‌شده، مرز حوضه آبریز سد گلستان و موقعیت آن در استان گلستان

جمع‌آوری شدند. داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر لندست ۸ و ۹ از سامانه گوگل ارث انجین (GEE) برای بازه زمانی ۲۰۲۳–۲۰۱۳ استخراج شدند (USGS, 2023) . داده‌های اقلیمی شامل دمای هوا و تبخیر از مدل ERA5 با وضوح ۰/۲۵ درجه دریافت شد (۴۰). همچنین، داده‌های میدانی از ۵۰ نقطه کنترل پهنه آبی سد گلستان با استفاده از تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زیاد (Google Earth Pro) و تطبیق با نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور در اکتبر ۲۰۲۳ استخراج شد. این داده‌های میدانی شامل نقاط GPS ثبت‌شده از حاشیه پهنه آبی (نوع: نقاط جغرافیایی با مختصات طول و عرض جغرافیایی) بودند که از طریق بازدید میدانی و دستگاه GPS دستی جمع‌آوری شدند. این نقاط کنترل بر اساس ویژگی‌های طیفی مشخص پهنه‌های آبی (مانند بازتاب کم در باند مادون قرمز نزدیک) و تأیید با داده‌های هیدرومتری ایستگاه‌های سازمان آب منطقه‌ای گلستان انتخاب شدند. (داده‌های هیدرومتری شامل سطوح آب ثبت‌شده روزانه از ایستگاه‌های ثابت، نوع: سری زمانی سطح آب در متر).

در مرحله پیش‌پردازش که به عنوان زیربنای اساسی تحلیل‌های بعدی عمل می‌کند، از الگوریتم پیشرفته LEDAPS برای حذف اثرات جوی از داده‌های لندست ۸ و ۹ استفاده شده است. این فرایند با بهینه‌سازی بازتاب سطحی، نقش حیاتی در افزایش دقت شاخص‌های طیفی ایفا می‌کند. همزمان، با به‌کارگیری ترکیب هوشمندانه‌ای از باند کیفیت و الگوریتم CFMASK، شناسایی و حذف پیکسل‌های آلوده به ابر و سایه با دقت زیادی انجام می‌پذیرد (۳۱). تولید تصاویر ماهانه عاری از ابر نیز از طریق روش ترکیب زمانی و میانگین‌گیری وزن‌دار صورت می‌گیرد که به کاهش چشمگیر نویزهای تصادفی منجر می‌شود.

در گام بعدی که به محاسبه و استخراج شاخص‌های طیفی اختصاص دارد، مجموعه‌ای از شاخص‌های بهینه شامل NDWI، MNDWI و AWEI محاسبه می‌شوند. این شاخص‌ها با تأکید بر تفاوت‌های طیفی آب و غیر آب، بنیان محکمی برای تحلیل‌های کمّی فراهم می‌آورند (۱۳). در این مرحله، تبدیل مقادیر دیجیتال به بازتاب سطحی با اعمال ضرایب مقیاس‌گذاری استاندارد لندست (۰/۰۰۰۱) صورت می‌گیرد. استخراج پهنه‌های آبی با استفاده از روش آستانه‌گذاری خودکار Otsu انجام می‌شود که با بهینه‌سازی واریانس بین‌کلاسی، مرزهای دقیقی بین پهنه‌های آبی و غیرآبی ترسیم می‌کند (۱۰). برای مناطق چالش‌برانگیز با آلبدوی زیاد، تنظیمات دستی آستانه بر اساس داده‌های مرجع اعمال می‌شود (۲۷). فرایند استخراج

پهنه‌های آبی از تصاویر ماهواره‌ای با محاسبه شاخص‌های طیفی متعدد و اعمال آستانه‌گذاری بهینه انجام شد. برای تعیین آستانه مناسب هر شاخص، از روش Otsu که بر مبنای بیشینه‌سازی واریانس بین‌کلاسی عمل می‌کند، استفاده شد. این روش امکان جداسازی خودکار پیکسل‌های آب از پس‌زمینه را با کمترین دخالت کاربر فراهم می‌آورد. پس از استخراج اولیه پهنه‌های آبی توسط هر شاخص، عملیات پس‌پردازش شامل اعمال فیلترهای مکانی برای حذف نویزها و پیکسل‌های منفرد انجام شد. فیلتر میانه با ابعاد کرنل ۳×۳ پیکسل برای هموارسازی مرزها و حذف خطاهای طبقه‌بندی به کار گرفته شد و پلیگون‌هایی با مساحت کمتر از حد آستانه تعریف‌شده حذف شدند. تمام مراحل پردازش و محاسبات در محیط GEE با استفاده از کدهای JavaScript اجرا شد و مراحل شامل مراحل پیش‌پردازش، محاسبه شاخص‌ها، آستانه‌گذاریOtsu، فیلتر میانه و استخراج مساحت است.

برای ارزیابی دقت نتایج، پنجاه نقطه مرجع شامل نمونه‌هایی از پیکسل‌های آب خالص و مناطق خشکی از طریق تفسیر بصری تصاویر با قدرت تفکیک زیاد و با درنظرگرفتن ویژگی‌های طیفی مشخص انتخاب شدند. این نقاط مرجع (نوع: نقاط کنترل زمینی مستقل از تصاویر ماهواره‌ای اصلی) با اطلاعات ثبت‌شده تراز سطح آب توسط سازمان آب منطقه‌ای گلستان (نوع: داده‌های هیدرومتری زمینی) برای تأیید صحت تطبیق داده شدند. مقایسه با محاسبه هم‌پوشانی پیکسل‌ها بین نقشه استخراج‌شده و نقاط مرجع زمینی انجام شد و به طور خاص، سطح آب استخراج‌شده از شاخص‌ها با سطوح آب اندازه‌گیری‌شده میدانی (از ایستگاه‌های هیدرومتری، متفاوت از نقاط رسوب) مقایسه شد تا خطای مکانی (در هکتار) محاسبه شود. شاخص Water Index 2 (WI2) به دلیل عملکرد پایدار در شرایط مختلف محیطی به عنوان مرجع برای مقایسه سایر شاخص‌ها انتخاب شد. اما برای اعتباربخشی منطقه مطالعاتی، از داده‌های مرجع زمینی (سطوح آب هیدرومتری) برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی WI2 استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که مناسب منطقه است. ارزیابی کارایی هر شاخص با محاسبه معیارهای آماری مانند جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب تعیین و ضریب کارایی نش – ساتکلیف انجام شد که امکان مقایسه کمّی عملکرد شاخص‌های مختلف را فراهم آورد. این رویکرد یکپارچه و چندمرحله‌ای، ضمن تضمین دقت و کارایی در پایش تغییرات پهنه‌های آبی، درک عمیق‌تری از الگوهای هیدرولوژیک منطقه فراهم می‌آورد.

نتایج

۱- نتایج کارایی شاخص‌های طیفی در برآورد مساحت پهنه آبی

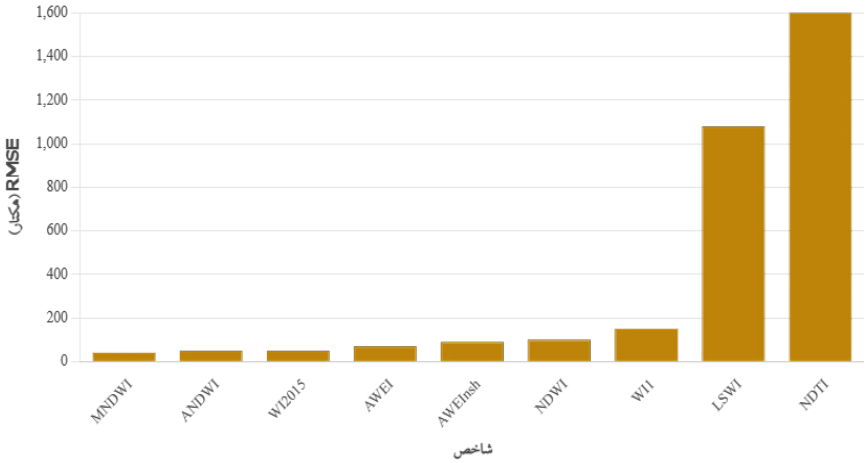
برای سنجش دقّت استخراج پهنه آبی، شاخص Water Index 2 (WI2) به‌عنوان مرجع مساحت در هر دو سنجنده به کار گرفته شد و کارایی شاخص‌ها بر پایه چهار سنجهٔ Root Mean Square Error (RMSE)، Mean Absolute Error (MAE)، R^2 و Nash-Sutcliffe Efficiency (NS) ارزیابی شد که در جداول ۲ و ۳ برای لندست ۸ و سنتیل ۲ نشان داده شده است. همچنین شکل‌های ۲ و ۳ نیز مقایسه مقادیر RMSE شاخص‌های مختلف را برای تصاویر سنتیل۲ و لندست ۸ نشان داده شده است. بر مبنای داده‌های سنتینل ۲ (۲۰۲۴–۲۰۱۸)، شاخص MNDWI دقیق‌ترین برآورد را نسبت به مرجع ارائه می‌دهد؛ به‌طوری که مقادیر RMSE≈۲۱/۴ha، R^2≈۰/۹۹۸ و NS≈۰/۹۹۶ نشان‌دهنده خطای بسیار اندک و برازش عالی است. پس از آن ANDWI با RMSE≈۳۳/۵ha و WI2015 با RMSE≈۳۴/۵ha در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در مقابل، LSWI و NDTI به‌دلیل RMSE بسیار بزرگ و NS منفی، برای برآورد کمّی مساحت سطح آب مناسب نیستند و استفاده از آنها می‌تواند به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد نظام‌مند بینجامد. در داده‌های لندست ۸ (۲۰۲۵–۲۰۱۳)، الگوی عملکرد اندکی متفاوت است؛ به‌طوری که شاخص ANDWI بهترین کارایی را نشان می‌دهد (RMSE≈۵۴/۵ha؛ R^2≈۰/۹۷۷ ؛ NS≈۰/۹۷۶) و سپس AWEI (≈۶۲/۰ha) و (≈۶۷/۶ha) WI2015 قرار دارند؛ MNDWI هرچند عملکرد مناسبی دارد،

جدول ۲. خلاصه معیارهای ارزیابی شاخص‌های مورد استفاده برای تصاویر سنتینل ۲

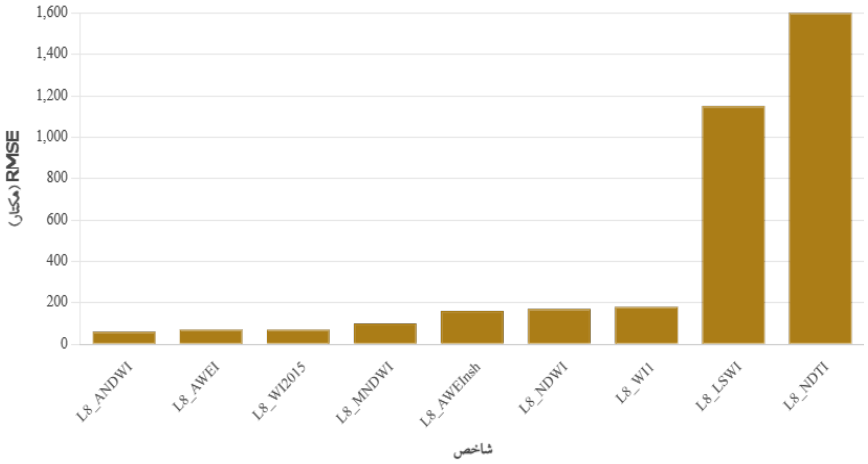
شاخص	RMSE (ha)	MAE (ha)	ME (bias, ha)	R^2	NS
MNDWI	۰/۹۷۴	−۲۶/۶	−۲۱/۸۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶
ANDWI	۰/۹۷۱	۳۰/۹۳	−۳۳/۳۸	۰/۹۸۹	۰/۹۸۴
WI2015	۰/۹۴۶	۳۶/۴۶	−۳۱/۶۲	۰/۹۸۹	۰/۹۸۳
AWEI	۰/۹۵۲	۴۱/۰۸	۳۹/۵۸	۰/۹۸۵	۰/۹۸
NDWI	۰/۹۳۷	۱۳۸/۶۳	۴۴/۶۱	۰/۹۸۲	۰/۹۷۵
WI1	۰/۹۳۹	۲۳۷/۰۲	۹۶/۵۹	۰/۹۵۱	۰/۸۱۸
AWEIsh	۰/۹۰۴	۱۳۵	۱۱۳/۰۴	۰/۹۶۸	۰/۸۵۱
NDTI	۰/۹۷۴	−۲۶/۶	−۲۱/۸۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶
LSWI	۰/۹۷۱	۳۰/۹۳	−۳۳/۳۸	۰/۹۸۹	۰/۹۸۴

جدول ۳. خلاصه معیارهای ارزیابی شاخص‌های مورد استفاده برای تصاویر لندست۸

شاخص	RMSE (ha)	MAE (ha)	ME (bias, ha)	R^2	NS
ANDWI	۵۴/۵۴	۲۴/۸۳	−۹/۰۳	۰/۹۷۷	۰/۹۷۶
AWEI	۶۱/۹۶	۳۳/۱۳	−۱۲/۹۱	۰/۹۷۴	۰/۹۷۰
WI2015	۶۷/۶۲	۳۹/۴۶	−۲۶/۶۰	۰/۹۷۱	۰/۹۶۴
MNDWI	۹۰/۸۹	۴۴/۱۵	۳۱/۹۳	۰/۹۴۶	۰/۹۳۴
NDWI	۱۲۰/۰۲	۷۳/۵۵	۳۶/۴۶	۰/۹۵۲	۰/۸۹۲
AWEIsh	۱۴۱/۱۲	۷۸/۴۰	۴۱/۰۸	۰/۹۳۷	۰/۸۷۰
WI1	۱۷۳/۹۲	۱۳۶/۶۳	۱۳۸/۶۳	۰/۹۳۹	۰/۷۵۸
LSWI	۲۹۳/۲۱	۲۷۳/۰۲	۲۷۳/۰۲	۰/۹۰۴	۰/۵۱۰



شکل ۲. مقادیر RMSE برای سنتینل ۲ در همه شاخص‌های مورد استفاده



شکل ۳. مقادیر RMSE برای لندست ۸ در همه شاخص‌های مورد استفاده

اما با RMSE≈۹۰/۹ha پس از ANDWI طبقه‌بندی می‌شود. نتایج ماتریس خطا برای صحت‌سنجی استخراج پهنه آبی با استفاده از ۵۰ نقطه مرجع نشان می‌دهد که دقت کلی ۹۵٪ و کاپا ۰/۹۲ است (جدول ۴).

جمع‌بندی این یافته‌ها حاکی از آن است که «شاخص برتر» می‌تواند بین سنجنده‌ها متفاوت باشد: برای کاربردهای مبتنی بر سنتینل ۲، MNDWI انتخاب مناسب‌تری است؛ درحالی‌که در لندست ۸، ANDWI (با عملکرد نزدیکِ MNDWI) برتری دارد. این تفاوت با ملاحظات طیفی و تفکیک مکانی/ زمانی دو سنجنده همخوان است و در عمل توصیه می‌شود پایش کوتاه مدت و به‌روز با NDWI–S2 انجام شود و تحلیل‌های روندی میان‌مدت تا بلندمدت با تکیه بر ANDWI–L8 (و به‌عنوان پشتیبان، MNDWI–L8) تکمیل شود. شکل ۴ تغییرات زمانی میانگین سالانه مساحت پهنه آبی سد گلستان بر اساس نُه شاخص طیفی مختلف طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ را نمایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۴ نکته قابل توجه، تفکیک واضح شاخص‌ها به دو گروه متمایز است. گروه اول شامل هفت شاخص MNDWI، AWEI، WI2015، WI1، WI2، NDWI و ANDWI است که الگوی تغییرات مشابه و همگرایی چشمگیری را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها در محدوده ۳ تا ۱۰ کیلومترمربع نوسان داشته و روند کلی کاهشی از سال ۲۰۱۹ (با مقدار بیشینه حدود ۱۰ کیلومترمربع) تا سال ۲۰۲۳ (با مقدار کمینه حدود ۳ کیلومترمربع) را نمایش می‌دهند. این کاهش حدود ۷۰ درصدی در مساحت پهنه آبی، منطبق با دوره خشکسالی و کاهش ورودی‌های حوضه آبریز در این بازه زمانی است.

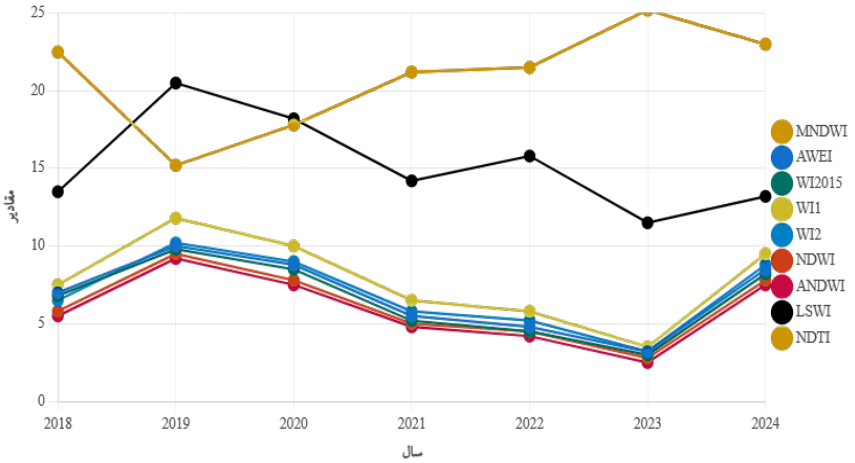
گروه دوم شامل دو شاخص LSWI و NDTI است که رفتاری کاملاً متفاوت از سایر شاخص‌ها نشان می‌دهند. LSWI با مقادیر بین ۱۱ تا ۲۰ کیلومترمربع و NDTI با مقادیر ۱۵ تا ۲۵ کیلومترمربع، بیش‌برآورد قابل توجهی از مساحت واقعی پهنه آبی ارائه می‌دهند. واگرایی این دو شاخص از گروه اول، مؤید یافته‌های بخش نتایج است که نشان داد LSWI و NDTI به دلیل حساسیت زیاد به رطوبت خاک و پوشش گیاهی پیرامون مخزن، برای تخمین دقیق مساحت آب در مناطق نیمه‌خشک مناسب نیستند. افزایش نسبی تمامی شاخص‌ها در سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۲۳، احتمالاً ناشی از بهبود شرایط هیدرولوژیک و افزایش نزولات در این سال است که نیازمند پایش مستمر برای تأیید پایداری این روند صعودی است.

۲- بررسی سری زمانی با تصاویر سنتینل ۲

بررسی پیوسته سری زمانی شاخص مرجع WI2 در تصاویر سنتینل ۲ (برحسب کیلومترمربع) نشان می‌دهد که پهنه آبی مخزن در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ از نوسان‌پذیری زیادی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که کمینه ثبت‌شده ≈۰/۰۱ کیلومترمربع در تاریخ ۲۰۲۳/۰۹/۰۱ و بیشینه

جدول ۴. اعداد ماتریس خطا

	Predicted Non-Water	Predicted Water	Total
Actual Non-Water	۲۴	۱	۲۵
Actual Water	۱	۲۴	۲۵
Total	۲۵	۲۵	۵۰



شکل ۴. روند زمانی میانگین سالانه مساحت پهنه آبی سد گلستان بر اساس نه شاخص‌های طیفی (۲۰۱۸–۲۰۲۴)

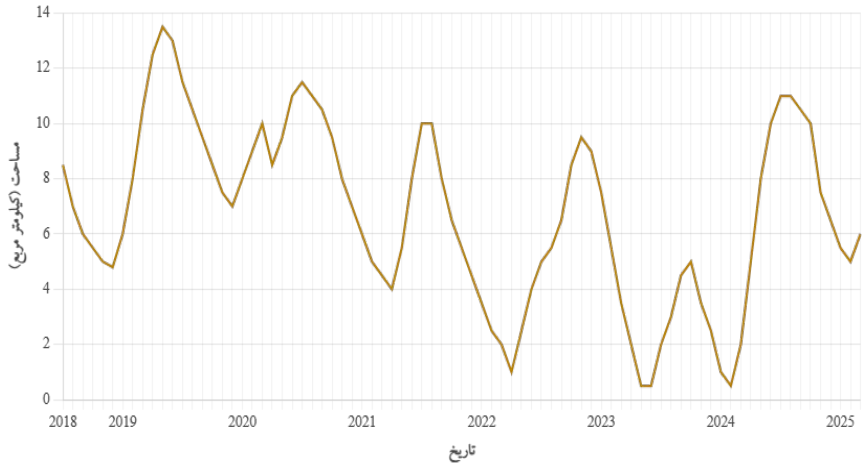
ثبت‌شده ≈۱۳/۳۳ کیلومترمربع در ۲۰۱۹/۰۴/۰۱ رخ داده است. این دامنه تغییرات وسیع از تقریباً خشک‌شدگی تا گسترش قابل‌توجه سطح آب بیانگر حساسیت زیاد مخزن به محرک‌های اقلیمی (نزولات، تبخیر، دما) و نیز تصمیمات بهره‌برداری (الگوی رهاسازی و برداشت) است و ضرورت پایش با تفکیک زمانی زیاد را تأیید می‌کند. روند زمانی ترسیم‌شده در شکل ۵ این نوسانات را به‌صورت واضح نمایش می‌دهد.

۳- بررسی میانگین سالانه مساحت سطح آب با تصاویر لندست ۸

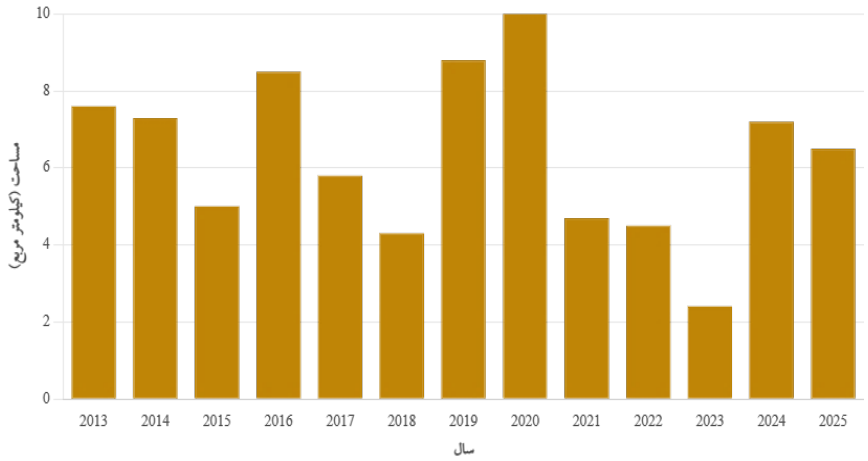
برای ارزیابی رفتار میان‌مدت، میانگین سالانه مساحت سطح آب (مرجع WI2) از تصاویر لندست ۸ محاسبه شد. در شکل ۶ تغییرات میانگین سالانه سطح مخزن با استفاده از تصاویر لندست ۸ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد میانگین سالانه از ≈ ۷/۲۸ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۴ به ≈ ۴/۷۲ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۱ کاهش یافته است؛ یعنی کاهشی خالص در حدود ۳۵٪ طی دوره مورد مطالعه صورت گرفت. برآورد نرخ تغییرات سالانه نیز نشان می‌دهد کاهش متوسطِ نزدیک به ۵٪ در سال قابل انتظار بوده است. هرچند رخداد اوج‌های ۲۰۲۰–۲۰۱۹ می‌تواند برازش خطی ساده را تحت‌تأثیر قرار دهد، مقایسه ابتدا–انتها تصویری روشن از کاهش معنادار ظرفیت سطحی مخزن ارائه می‌کند که با الگوی نوسانات آبی منطقه هم‌خوان است.

۴- الگوهای فصلی

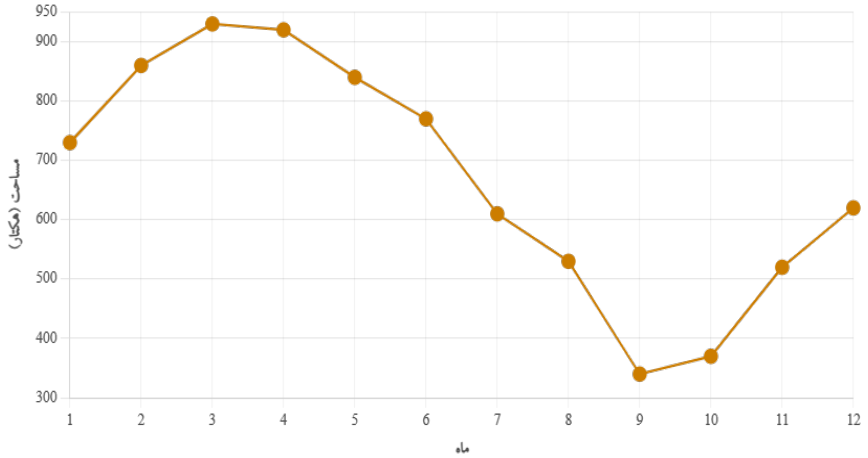
شکل ۷ نمودار فصلی متناظر، تغییرات ماه‌به‌ماه را با تفکیک زمانی بالای تصاویر سنتینل ۲ نشان می‌دهد. تحلیل میانگین‌های ماهانه شاخص مرجع WI2 نشان می‌دهد تغییرات فصلی مساحت مخزن معنادار و منظم است. در داده‌های سنتینل ۲، چرخه فصلی با اوج بهاری و افت انتهای تابستان/اوایل پاییز مشخص می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بیشترین میانگین ماهانه در ماه مارس (۳) برابر با (≈۹۳۲/۹۰ha) و کمترین میانگین ماهانه در



شکل ۵. روند زمانی نوسانات سطح مخزن با استفاده از تصاویر سنتیل۲



شکل ۶. تغییرات میانگین سالانه سطح مخزن با استفاده از تصاویر لندست ۸



شکل ۷. نمودار فصلی متناظر، تغییرات ماه‌به‌ماه با تفکیک زمانی بالای تصاویر سنتینل ۲

ماه سپتامبر (۹) برابر با (≈۳۳۵/۱۲ha) برآورد شده است. این الگو با نقش بارش‌های پایانی زمستان و بهار (افزایش ورودی) و تشدید تبخیر/ برداشت در دوره گرم سال سازگار است.

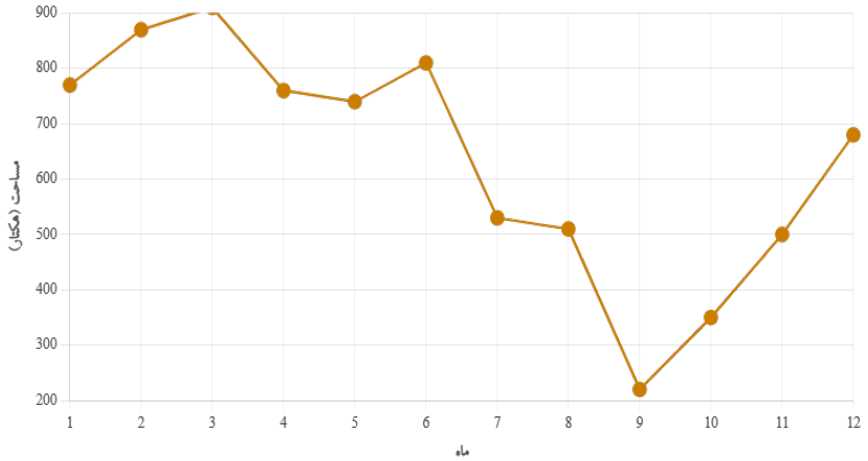
در شکل ۸ در داده‌های لندست ۸ نیز الگوی مشابهی دیده می‌شود؛ اوج فصلی در مارس با (≈۹۰۵/۸۴ha) و افت فصلی در سپتامبر با (≈۲۱۹/۳۸ha) دیده می‌شود. با این حال، به‌سبب تناوب بازدید کمتر و تفاوت‌های تفکیک مکانی/ طیفی در لندست ۸، پاره‌ای از پیک‌ها نسبت به سنتیل۲ هموارتر دیده می‌شوند و دامنه نوسان ماهانه اندکی متراکم‌تر است. این تفاوت‌های ظریف دقیقاً همان چیزی است که از مقایسه دو سنجنده انتظار می‌رود؛ سنتینل ۲ برای آشکارسازی تغییرات سریع‌تر و کوتاه مدت مفیدتر است و لندست ۸ نمایی پایدارتر از روند فصلی بلندمدت ارائه می‌دهد.

۵- بررسی رخدادهای حدی

با درنظرگرفتن WI2 به‌عنوان مساحت مرجع، رخدادهای حدی و آستانه‌های مدیریتی استخراج شد. در داده‌های سنتینل ۲، بیشینه ثبت‌شده ≈ ۱۳/۳۳ km² در ۲۰۱۹/۴/۱ و کمینه ثبت‌شده ≈۰/۰۱ km² در ۲۰۲۳/۹/۱ رخ داده است؛ این دو نقطه شاخص نماینده وضعیت‌های «پرآبی» و «خشکیِ شدید» هستند و برای کالیبراسیون آستانه‌های عملیاتی (هشدار خشکی/پرآبی) بسیار کارآمدند. برای لندست ۸ نیز کمینه/بیشینه‌های متناظر به‌دست آمد که نمایی باثبات‌تر از رخدادهای حدّیِ بین‌سالی ارائه می‌کند. به‌منظور استانداردسازی تصمیم‌گیری، آستانه‌های صدکی بر حسب km² محاسبه شد (P10، P50، P90) تا تعریف رسته‌های مدیریتی ساده شود: P10 (خشک/هشدار کم‌آبی)، P5 (وضعیت میانه)، P90 (پرآبی/هشدار آب‌گرفتگی). در جدول ۵ شامل تاریخ و مقدار کمینه/بیشینه برای هر سنجنده و نیز مقدار آستانه‌های P10/P50/P90 و در جدول ۶ آستانه‌های پیشنهادی رخدادهای حدی و تعداد عبوری‌ها بر مبنای صدک‌های ۹۵/۹۰/۱۰/۵ سری ماهانه WI2 (km²) آمده است. واحدها به km² تبدیل شده‌اند. در سامانه پایش، این آستانه‌ها به‌صورت خطوط راهنما پیاده‌سازی می‌شوند تا تغییر وضعیت مخزن به‌سرعت قابل‌تشخیص باشد.

۶- همبستگی بین شاخص‌ها

تحلیل ماتریس‌های همبستگی نشان می‌دهد خانواده شاخص‌های مرتبط با آب (WI/NDWI/MNDWI/AWEI/WI2015) همبستگی بسیار زیادی با مرجع WI2 دارند و همین الگو در هر دو سنجنده تکرار می‌شود. طبیعتاً، از آنجایی که WI2 خود یک شاخص پیشرفته سنجش آب سطحی است، انتظار می‌رود همبستگی زیادی با سایر شاخص‌های هم‌خانواده داشته باشد؛ اما این تحلیل برای تأیید سازگاری و اعتبارسنجی عملکرد آنها در شرایط نیمه‌خشک منطقه مطالعاتی انجام شده است. در سنتینل ۲، همبستگی‌های خطی با WI2 به‌ترتیب برای MNDWI (r≈۰/۹۹۹)، ANDWI (≈۰/۹۹۷)، WI2015 (≈۰/۹۹۷)، AWEI (≈۰/۹۹۲)، AWEIsh (≈۰/۹۸۹)، NDWI (≈۰/۹۸۵) و WI1 (≈۰/۹۸۱) بسیار قوی است؛ در مقابل، LSWI (≈۰/۷۵) صرفاً همبستگی متوسط نشان می‌دهد و NDTI (≈۰/-۸۱) با WI2 همبستگی معکوس دارد که با ماهیت شاخص (تأکید بر تضاد طیفی خاک/گیاه نسبت به آب) سازگار است. در لندست ۸ نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود: ANDWI (≈۰/۹۸۹)، AWEI (≈۰/۹۸۶)، WI2015 (≈۰/۹۸۶)، AWEIsh (≈۰/۹۷۵)، MNDWI (≈۰/۹۷۲)، WI1 (≈۰/۹۶۹) و NDWI (≈۰/۹۲۳) همبستگی‌های قوی با WI2 دارند؛ حال آنکه LSWI (≈۰/۶۰) تنها همبستگی متوسط ارائه می‌کند و NDTI (≈-۰/۳۳) ضعیف و معکوس است. این الگوها که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز قابل مشاهده‌اند. یافته‌های بخش کارایی را تقویت می‌کنند: شاخص‌های خانواده WI و تبدیل‌های نزدیک به آن (MNDWI/ANDWI/WI2015/AWEI) برای برآورد کمّی مساحت آب مناسب‌اند؛ درحالی‌که LSWI/NDTI به‌دلیل حساسیت بیشتر به پوشش گیاهی، رطوبت خاک و پس‌زمینه



شکل ۸. نمودار فصلی متناظر، تغییرات ماه‌به‌ماه با تفکیک زمانی بالای تصاویر لندست ۸

جدول ۵. خلاصه آمار توصیفی ماهانه WI2 و صدک‌ها (km²)

Max (km²)	P95 (km²)	P90 (km²)	P90 (km²)	P10 (km²)	P5 (km²)	Min (km²)	Std (km²)	Median (km²)	Mean (km²)	n (months)	Period	Dataset
۱۳/۳۴	۱۱/۵۶	۱۱/۱۵	۱۱/۱۵	۱/۹۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۳/۵۸	۷/۰۶	۶/۶۸	۷۴	2018-06-01 to 2024-12-01	Sentine-2 (W1?)
۱۲/۱۹	۱۰/۹۶	۱۰/۵۵	۱۰/۵۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰	۳/۵۵	۶/۷۴	۶/۰۹	۱۰۷	2013-05-01 to 2025-03-01	Landsat-8 (W1?)

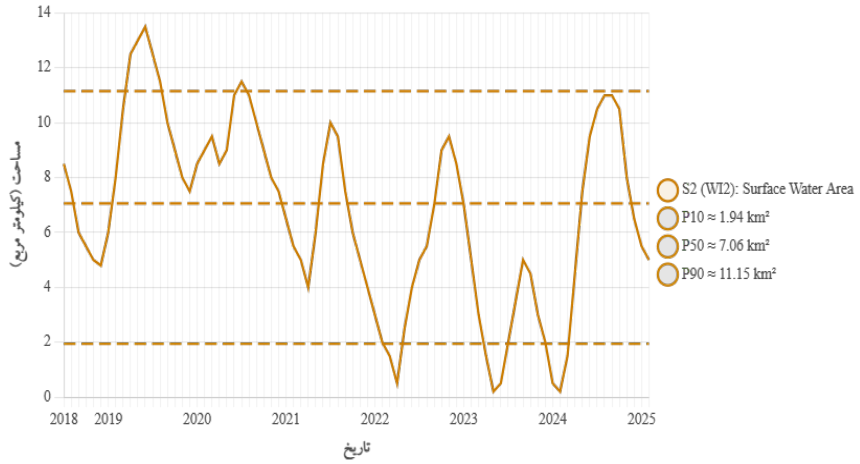
جدول ۶. آستانه‌های پیشنهادی رخدادهای حدی و تعداد عبوری‌ها بر مبنای صدک‌های ۹۵/۹۰/۱۰/۵ سری ماهانه WI2 (km²)

# Very High	# Low	# Low	# Very Low	Very High (≥P95)	High (≥P90)	Low (≤P10)	Very Low (≤P5)	Dataset
۴	۸	۸	۴	۱۱/۵۶	۱۱/۱۵	۱/۹۴	۰/۱۶	Sentinel-2 (W12)
۶	۱۱	۱۱	۶	۱۰/۹۶	۱۰/۵۵	۰/۱۱	۰/۰۲	Landsat-8 (W12)

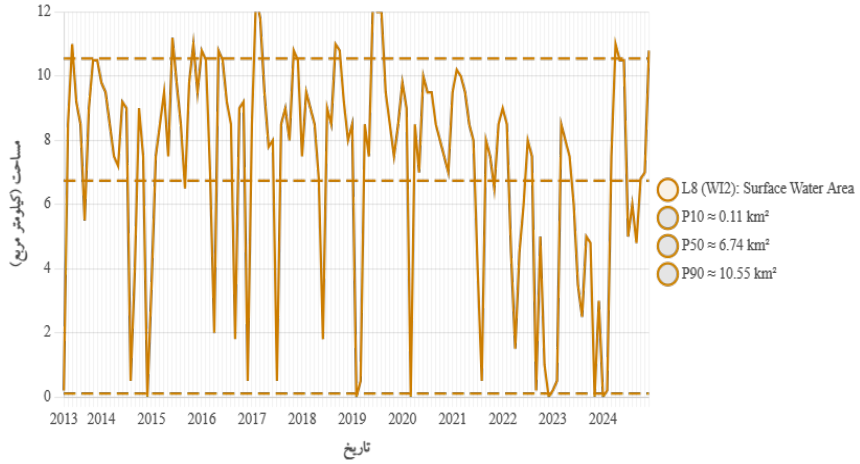
آستانه‌های Very Low/Low/High/Very High بر مبنای صدک‌های 5/10/90/95 از سری ماهانه WI2 (km²) محاسبه شده‌اند.

خشکی، برای این هدف محدودیت دارند و می‌توانند به خطاهای نظام‌مند بینجامند.

- نتایج تلفیقی مبتنی بر دو منبع داده سنتینل ۲ و لندست ۸ برای ارزیابی رفتار زمانی مخزن و پیوند آن با خشکسالی/ترسالی اقلیمی، نخست سری‌های زمانیِ مساحتِ سطح آب بر اساس شاخص مرجع WI2 از دو سنجنده استخراج و به مقیاس km² تبدیل شد. منحنی‌های زمانی نشان می‌دهند که مخزن طی سال‌های اخیر نوسان‌پذیری قابل‌توجهی را تجربه کرده است: در پنجرهٔ سنتینل۲، دوره‌هایی از افت شدید سطح آب با مقادیر بسیار کوچک (نزدیکی به خشکیدگی) و دوره‌هایی از گسترش قابل‌اعتنا دیده می‌شود؛ در پنجرهٔ لندست۸ نیز، با وجود تفکیک زمانی کمتر، الگوی افت‌وخیز میان‌مدت حفظ شده و کاهش خالص از میانهٔ دههٔ ۲۰۱۰ به بعد قابل ردیابی است. این رفتار، همسو با یافته‌های پیشین شما دربارهٔ کمینه‌ها و بیشینه‌ها، مؤید حساسیت زیاد مخزن به رژیم بارش – تبخیر و نیز تصمیمات بهره‌برداری است (رهاسازی،

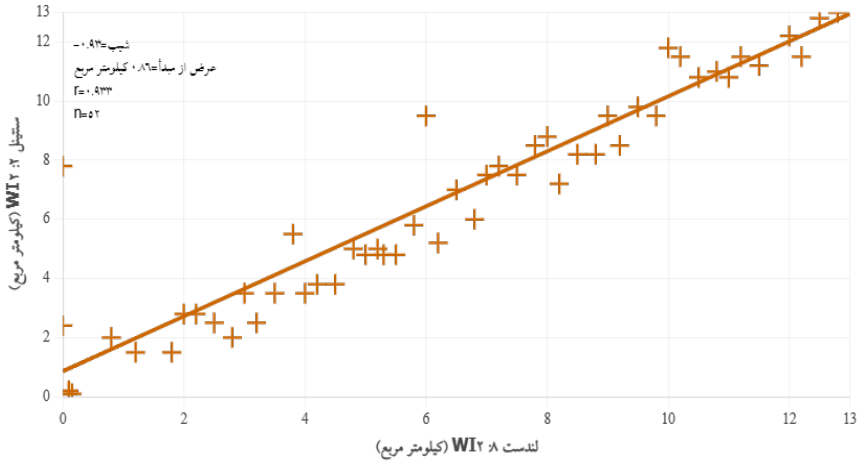


شکل ۹. نمودار مساحت سطح آب برای مقادیر آستانه‌های صدکی بر اساس تصاویر سنتینل ۲



شکل ۱۰. نمودار مساحت سطح آب برای مقادیر آستانه‌های صدکی بر اساس تصاویر لندست ۸

شکل ۱۱. هم‌پوشانی سری زمانی ماهانه WI2 بین Sentinel-2 و Landsat-8



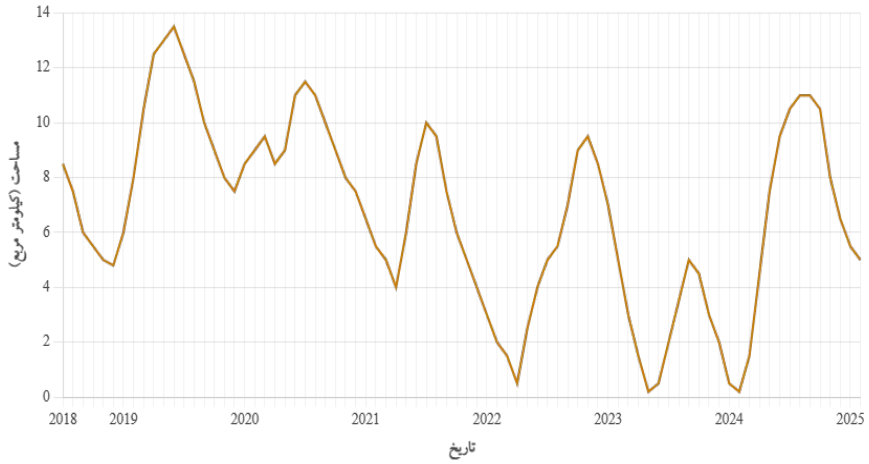
شکل ۱۲. نمودار پراکنش S2 برحسب L8 با خط برازش

برداشت و سیاست‌های تنظیم مخزن). برای سنجش ارتباط اقلیم – مخزن، شاخص SPI (استانداردشدهٔ بارش) به‌صورت ماهانه نرمال‌سازی و با سری‌های WI2 هم‌تراز شد و همبستگی هم‌زمان (Pearson) میان WI2 (km²) و SPI در پنجرهٔ ستینل ۲ در حد کم تا متوسط برآورد شد (≈۰/۱۹) که با درنظرگرفتن یک تأخیر یک‌ماههٔ SPI تا حدی بهبود می‌یابد (≈۰/۲۸) (شکل ۱۳، ۱۴ و ۱۵). این نتیجه از منظر هیدرولوژیک قابل تبیین است: پاسخ سطح آب مخزن به بارش/ورودی معمولاً با تأخیر زمانی بروز می‌کند و علاوه‌بر اقلیم، از کنترل‌های بهره‌برداری و ورودی‌های حوضه نیز تأثیر می‌پذیرد. در پنجرهٔ لندست ۸، همبستگی هم‌زمان و با تأخیر، ضعیف و نزدیک به صفر برآورد شد (≈-۰/۰۹ و ≈-۰/۰۷)؛ اختلاف با پنجرهٔ S2 محتمل است؛ زیرا L8 به‌واسطهٔ تناوب تصویربرداری کمتر، برخی قله‌ها/فرونشست‌های کوتاه‌مدت را هموار می‌کند و پنجرهٔ زمانی هم‌خط با SPI در همهٔ ماه‌ها دقیقاً هم‌پوشانی ندارد (شکل‌های ۱۶،۱۷ و۱۸). برآیند این تحلیل آن است که اگرچه اقلیم (SPI) نقش مهمی در تعیین پهنهٔ آبی دارد، علامتِ پاسخ مخزن در داده‌های ماهانه به‌طور قاطع و قوی تنها با SPI توضیح داده نمی‌شود و برای بهبود توضیح‌پذیری لازم است متغیرهای تکمیلی (ورودی رودخانه، تبخیر – تعرق برآوردی، رهاسازی‌ها، و تقویم بهره‌برداری) در یک چارچوب چندمتغیره وارد شوند. با این حال، حتی در همین تنظیم، نشانهٔ تأخیر در پاسخ (Lag-1) آشکار بوده و از لحاظ مدیریتی ارزشمند است: برای نمونه، می‌توان آستانه‌های هشدار را با تکیه بر صدک‌های WI2 و رصد SPI با تأخیر یک ماهه بازتنظیم کرد تا هشدارهای خشکسالی/پرآبی کاراتر شوند.

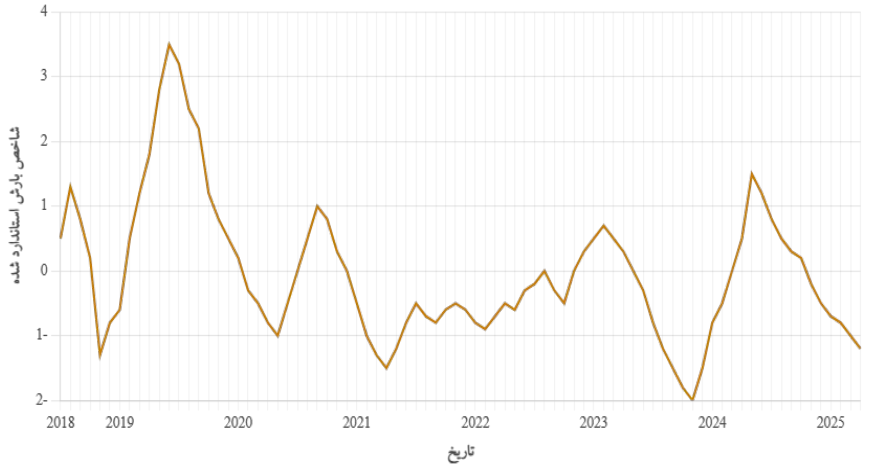
برای تکمیل تصویر، روندهای ماهانه و فصلی با این تحلیل همخوان است: در هر دو سنجنده، اوج‌های فصلی هم‌زمان با ماه‌های مرطوب و افت‌های فصلی در اواخر تابستان – اوایل پاییز دیده می‌شود؛ در S2 این نوسانات واضح‌تر و در L8 هموارتر نمود می‌یابند. این تفاوت رفتاریِ سنجنده‌ها اهمیت ترکیب آنها را دوچندان می‌کند. S2 برای پایش کوتاه‌مدت و هشدار سریع و L8 برای ارزیابی‌های میان‌مدت – بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مجموع، استفادهٔ مکمل از هر دو منبع همراه با شاخص‌های برتر (MNDWI برای S2 و ANDWI/MNDWI برای L8) توصیه می‌شود تا علاوه بر دقت طیفی، پویایی زمانی نیز به‌خوبی پوشش داده شود.

۷- هم‌سنجی دو سنجنده و سازگاری مقیاسی

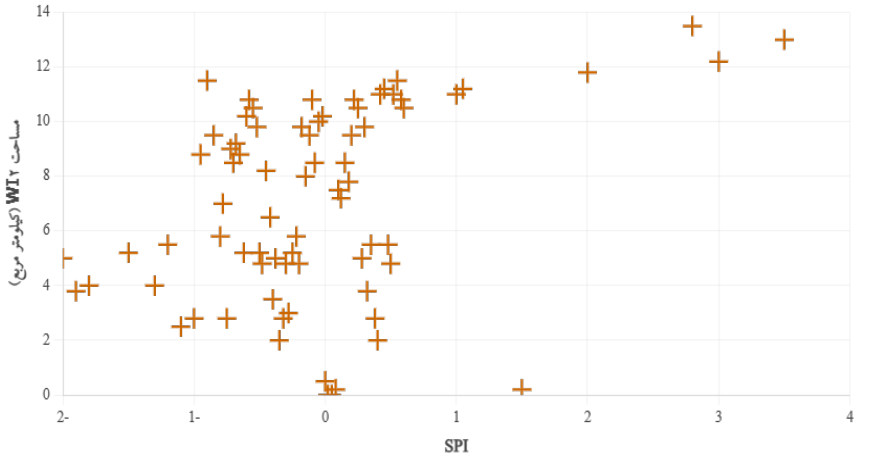
برای سنجش سازگاری مقیاسی و قابلیت هم‌جوسنجی (inter-sensor calibration)، سری‌های ماهیانه مساحت سطح آب (مرجع WI2) از دو سنجندهٔ ستینل۲ و لندست۸ به واحد کیلومترمربع استخراج و صرفاً در بازهٔ همپوشان مقایسه شدند (شکل ۱۹). نتایج نشان می‌دهد که این دو منبع، با وجود تفاوت‌های



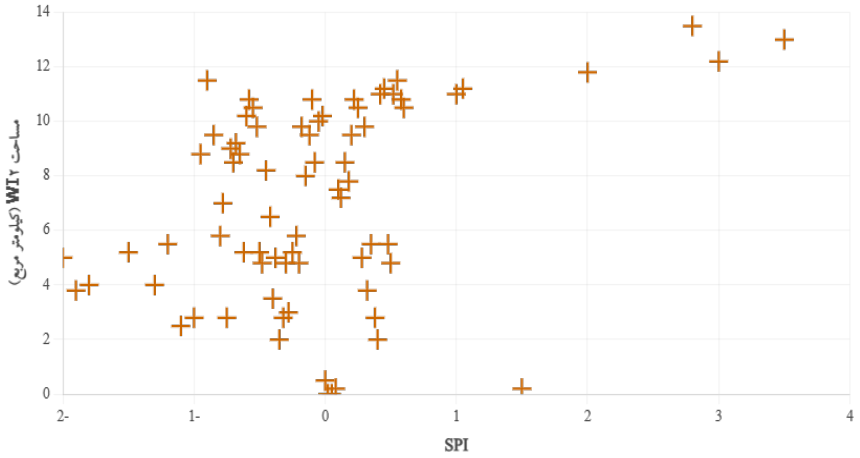
شکل ۱۳. سری زمانی ماهانه مساحت سطح آب با استفاده از تصاویر سنتینل ۲



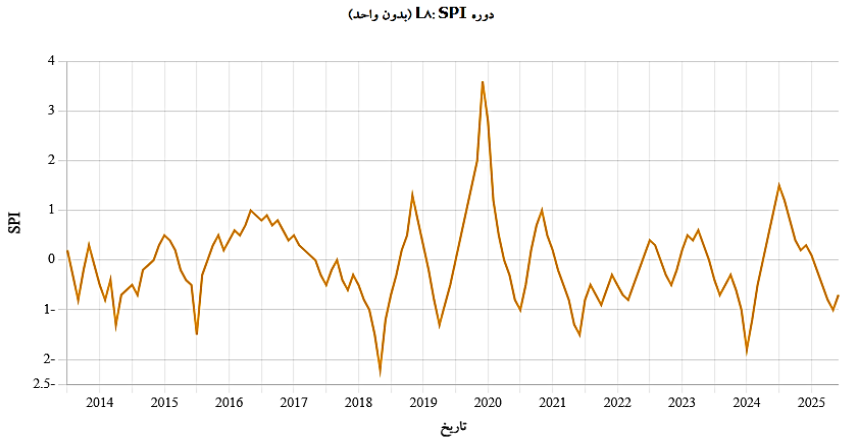
شکل ۱۴. سری زمانی SPI هم‌راستا با تصاویر سنتینل ۲



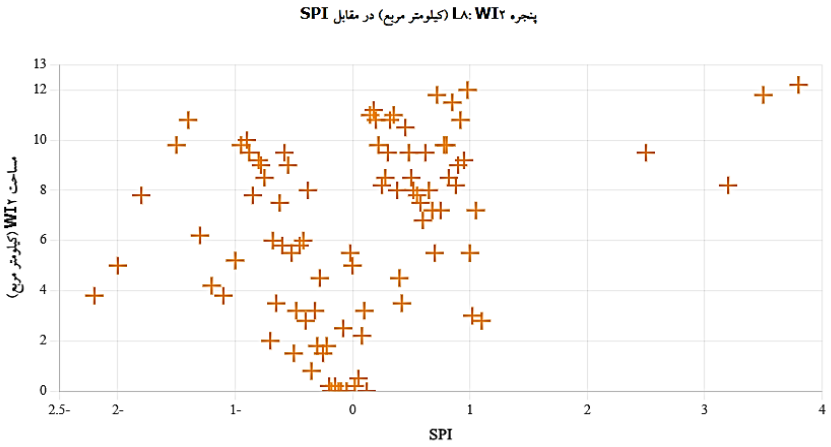
شکل ۱۵. نمودار پراکنش همبستگی WI2 و SPI با استفاده از تصاویر سنتینل ۲



شکل ۱۶. سری زمانی ماهانه مساحت سطح آب با استفاده از تصاویر لندست ۸



شکل ۱۷. سری زمانی SPI هم‌راستا با تصاویر لندست ۸

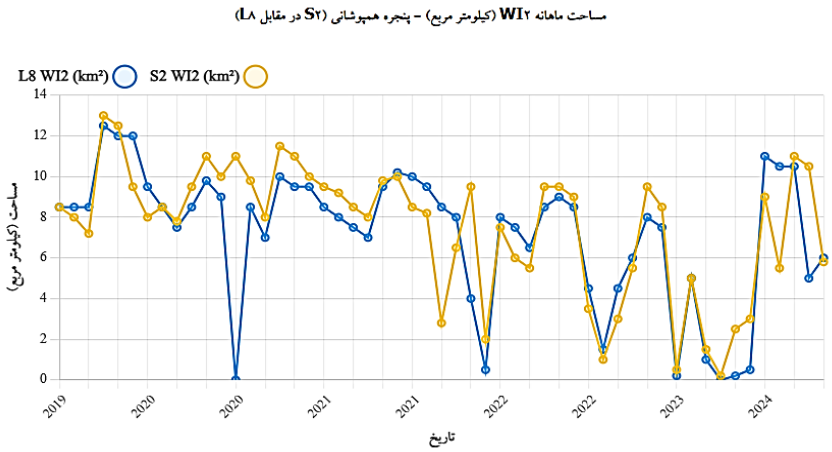


شکل ۱۸. نمودار پراکنش همبستگی WI2 و SPI با استفاده از تصاویر لندست ۸

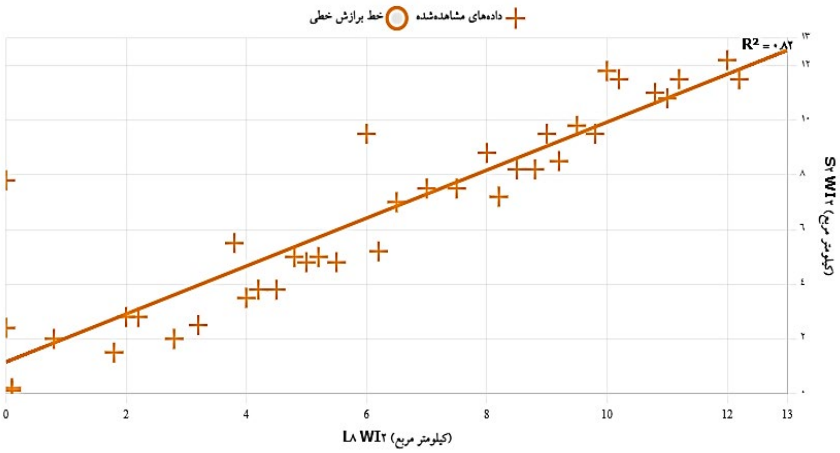
تفکیک زمانی/مکانی و ویژگی‌های طیفی، سازگاری زیادی دارند؛ به‌طوری که ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر ماهیانهٔ WI2 در بازه مشترک برابر با r≈۰/۹۳۳ (n=۵۲ ماه) به‌دست آمد؛ زیرا اختلاف ناچیز مشاهده‌شده عمدتاً به خاطر اختلاف دامنه طیفی میکرومتری دو سنجنده است. رگرسیون خطی سنتینل۲ (وابسته) برحسب لندست۸ (مستقل) نیز شیبی معادل ۰/۹۳ ≈ و عرض از مبدأ ۰/۸۶ km² ≈ نشان می‌دهد (شکل ۲۰)؛ بنابراین، در مقیاس ماهیانه سنتینل ۲ اندکی مقادیر بزرگ‌تر از لندست ۸ گزارش می‌کند (میانگین بایاس S2−L8≈+۰/۴۶ km² ؛ MAE≈۰/۷۳km²). این رفتار با انتظارهای فنی نیز سازگار است: تفکیک مکانی ۱۰ متر و بازه بازدید ۵ روزه در سنتینل۲ باعث ثبت پیک‌های کوتاه‌مدت و جزئیات فضایی بیشتر می‌شود، حال آنکه لندست۸ به‌واسطهٔ تاریخچهٔ بلندمدت (از ۲۰۱۳) و تناوب کمتر، نمایی هموارتر و پایدارتر از تغییرات میان‌مدت تا بلندمدت ارائه می‌کند. برآیند این تحلیل آن است که سنتینل۲ گزینه‌ای ایده‌آل برای پایش کوتاه‌مدت و هشدار سریع (ثبت واکنش‌های تند مخزن به محرک‌های اقلیمی/بهره‌برداری) است و لندست۸ بستر مناسبی برای تحلیل‌های روندی و ارزیابی‌های بین سالی؛ در نتیجه، ترکیب دو سنجنده تصویری جامع‌تر و تصمیم‌سازتر از دینامیک مخزن فراهم می‌آورد. افزون بر این، ضرایب همبستگی و رگرسیون محاسبه‌شده، پایه‌ای تجربی برای کالیبراسیون متقابل و نرمال‌سازی بین‌سنجنده‌ای فراهم می‌کند تا در صورت نیاز، سری‌های زمانی به مقیاس واحد تبدیل شوند و عدم قطعیت‌های ناشی از تفاوت سنجنده‌ها کاهش یابد.

بحث

این پژوهش با رویکرد تحلیلی – تطبیقی و اتکا به دو منبع دادهٔ سد گلستان، کارایی شاخص‌های طیفی را در تخمین مساحت سطح آب مخزن سد گلستان طی دورهٔ ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ ارزیابی می‌کند. برای هر سنجنده، WI2 به‌عنوان مرجع مساحت در نظر گرفته شد و عملکرد شاخص‌ها بر پایهٔ شاخص‌های خطا (RMSE، MAE، MSE)، معیار برازش (R^2) و کارایی نش–ساتکلیف (NS) نسبت به مرجع محاسبه شد. از آنجا که WI2 خود مرجع است، گزارش خطا برای WI2 در برابر (WI2) از نظر روش‌شناختی معنا ندارد؛ ازاین‌رو در این ارزیابی، WI2 به‌عنوان خط مبنا و سایر شاخص‌ها در مقایسه با آن سنجیده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد MNDWI دقیق‌ترین برآورد مساحت را نسبت به WI2ارائه می‌کند (RMSE≈۲۱/۴۲ha، R^2≈۰/۹۹۸، NS≈۰/۹۹۶). پس از آن، ANDWI (RMSE≈۳۳/۴۹ha، R^2≈۰/۹۹۴، NS≈۰/۹۹۱) و WI2015 (RMSE≈۳۴/۵۰ha، R^2≈۰/۹۹۳، NS≈۰/۹۹۰) در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در مقابل، LSWI و NDTI به‌دلیل خطای زیاد و NS کم یا منفی (نشان‌دهنده‌ی عملکرد ضعیف‌تر از میانگین مشاهده‌ها) برای برآورد کمّی مساحت مناسب نیستند. این الگو با منطق طیفی نیز سازگار است: شاخص‌های خانوادهٔ WI/NDWI/MNDWI/ANDWI/WI2015 به‌طور مستقیم‌تر به سیگنال آب حساس‌اند؛ درحالی‌که LSWI/NDTI از رطوبت خاک/پوشش گیاهی و پس‌زمینهٔ خشک اثر می‌پذیرند. نمودار شکل ۱۷ این رتبه‌بندی را به‌صورت بصری خلاصه می‌کند. در لندست۸، ANDWI بهترین کارایی را نسبت به L8_WI2 (مرجع) نشان می‌دهد (RMSE≈۵۴/۵۴ha، R^2≈۰/۹۷۷، NS≈۰/۹۷۶). پس از آن، AWEI و WI2015 قرار دارند و MNDWI-L8 با وجود دقت مناسب، بعد از ANDWI طبقه‌بندی می‌شود (RMSE≈۹۰/۸۹ha، R^2≈۰/۹۴۶، NS≈۰/۹۳۴). مشابه Sentinel-2، شاخص‌های LSWI/NDTI به‌ویژه در مقاطع با پوشش گیاهی یا پس‌زمینهٔ متغیر برای برآورد مستقیم مساحت آب محدودیت دارند. نمودار شکل ۱۸ این نتایج را نمایش می‌دهد. تفاوت «شاخص برتر» بین دو سنجنده قابل انتظار است: برای سنتینل۲، MNDWI و برای لندست۸، ANDWI (در کنار MNDWI-L8/WI2015) توصیه می‌شود. این جمع‌بندی با ساختار همبستگی بین‌شاخصی (همبستگی‌های زیاد میان خانوادهٔ



شکل ۱۹. نمودار تغییرات مساحت برحسب زمان با تصاویر دو سنجندهٔ سنتیل۲ و لندست۸



شکل ۲۰. نمودار رگرسیون خطی مقادیر ماهانه WI2 دو سنجندهٔ سنتیل۲ و لندست۸

WI و مشتقات آن با WI2 و با معیارهای دقت (RMSE/R²/NS) هم‌راستاست. این نتایج با مطالعات قبلی مانند (۱۸) که برتری سنتینل-۲ در استخراج پهنه‌های آبی را نشان داد، همخوانی دارد و تأکید می‌کند که انتخاب شاخص بهینه به دقت سنجنده وابسته است. همچنین، کاهش ۳۵٪ مساحت مخزن از ۷/۲۸km² در ۲۰۱۴ به ۴/۷۲km² در ۲۰۲۱، با روندهای اقلیمی گزارش‌شده توسط IPCC (۲۰۲۱) سازگار است (۳۸) و نشان‌دهنده تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر منابع نیمه‌خشک است. محدودیت‌های پژوهش شامل حساسیت به ابر و سایه است که با CFMASK کاهش یافت؛ اما برای آینده، ترکیب با داده‌های راداری مانند سنتینل-۱ پیشنهاد می‌شود. درنهایت، ترکیب MNDWI - سنتینل-۲ برای پایش کوتاه‌مدت و ANDWI - لندست-۸ برای تحلیل بلندمدت، ابزارهای عملی برای مدیریت پایدار سد گلستان فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که کارایی شاخص‌های طیفی آب به‌طور مستقیم به ویژگی‌های طیفی و تفکیک مکانی - زمانی سنجنده وابسته است و نمی‌توان یک شاخص واحد را برای تمام کاربردها و سنجنده‌ها به‌صورت عمومی توصیه کرد. مقایسهٔ نُه شاخص طیفی در دو سنجنده لندست۸ و سنتینل۲ نشان داد که MNDWI در سنتینل۲ با برخورداری از خطای

بسیار کم (RMSE≈۴۲/۲۱ha) و برازش عالی (R^2≈۰/۹۹۸) در دوره بازگشت زمانی کوتاه‌تر، بهترین گزینه برای پایش کوتاه‌مدت و فصلی پهنه‌های آبی سد گلستان است. در مقابل، ANDWI در لندست۸ با RMSE≈۵۴/۵۴ha و R^2≈۰/۹۹۷ عملکرد برتری نسبت به سایر شاخص‌ها در این سنجنده داشته و به دلیل طولانی‌بودن آرشیو زمانی لندست، مناسب‌ترین ابزار برای تحلیل روندهای بلندمدت و بین سالی تشخیص داده شد. بررسی سری زمانی نیز نشان داد که مخزن سد گلستان طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ با کاهش حدود ۳۵ درصدی در میانگین مساحت سطح آب مواجه بوده است که این تغییر با اثرات خشکسالی، افزایش تبخیر و کاهش ورودی‌های هیدرولوژیک همخوانی دارد. تحلیل‌های فصلی با داده‌های سنتینل۲ الگوی مشخصی از اوج بهاره (≈۳۳/۹ کیلومترمربع در اسفند–فروردین) و کمینه پاییزی (≈۳۵/۳ کیلومترمربع در شهریور–مهر) را نشان داد که بیانگر وابستگی قوی پهنه آبی به بارندگی و روند تبخیر سالانه است. از سوی دیگر، شاخص‌های LSWI و NDTI در هر دو سنجنده، به دلیل حساسیت زیاد به رطوبت خاک، پوشش گیاهی و پس‌زمینه خشکی، خطاهای زیاد و رفتارهای غیرواقعی نشان دادند؛ ازاین‌رو برای پایش کمی پهنه‌های آبی در مناطق نیمه‌خشک قابل توصیه نیستند. همبستگی بسیار زیاد شاخص‌های MNDWI، ANDWI، AWEI و WI2015 با شاخص مرجع WI2 صحت استخراج پهنه آبی توسط این شاخص‌ها را تأیید کرد و نشان داد که این گروه شاخص‌ها از سازگاری طیفی مناسبی برای محیط‌های خشک و نیمه‌خشک برخوردارند.

منابع مورد استفاده

1. Alaei, A., M. Rajaee Talarposhti, A. Eslami and M. Ghorbani. 2024. Remotely sensed evaluation of operation management of Golestan Dam reservoir before the flood. *Journal of Hydrology* 631: 130861.
2. Alizadeh, A. 2014. Principles of Applied Hydrology. Imam Reza University Press, Mashhad (in Farsi).
3. Al-Mamari, M.M., S.A. Kantoush, T.M. Al-Harrasi, A. Al-Maktoumi, K.I. Abdrabo, M. Saber and T. Sumi. 2023. Assessment of sediment yield and deposition in a dry reservoir using field observations, RUSLE and remote sensing: Wadi Assarin, Oman. *Journal of Hydrology* 617(A): 128982. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128982
4. Cao, M., K. Mao, X. Shen, T. Xu, Y. Yan and Z. Yuan. 2020. Monitoring the spatial and temporal variations in the water surface and floating algal bloom areas in Dongting Lake using a long-term MODIS image time series. *Remote Sensing* 12(21): 3622. https://doi.org/10.3390/rs12213622
5. Chandrasekar, K., M.V.R. Sesha Sai, P.S. Roy and R.S. Dwevedi. 2010. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. *International Journal of Remote Sensing* 31(15): 3987-4005. https://doi.org/10.1080/01431160802575653
6. Costa, E.M.B., P.S. Lucio and A.G. Maia. 2021. Relevance of reservoir morphometry in the evaporation process: an evaporation model for semi-arid regions. *Water Resources Management* 35: 4895-4907. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02978-1
7. Du, Z., W. Li, D. Zhou, Y. Tian, T. Ling, H. Wang, Y. Gui and B. Sun. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing* 8(4): 354. https://doi.org/10.3390/rs8040354
8. ECMWF. 2023. ERA5: data documentation. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Available from: https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A%2Bdata%2Bdocumentation
9. El-Asmar, H.M., M.E. Hereher and S.B. El Kafrawy. 2013. Surface area change detection of the Burullus Lagoon, North of the Nile Delta, Egypt, using water indices: A remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 16(1): 119-123. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.04.001
10. European Space Agency (ESA). 2015. Sentinel-2 User Handbook. European Space Agency. Available from:https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
11. Feyisa, G.L. and et al. 2014. Automated Water Extraction Index (AWEI): A new technique for water body mapping. *Remote Sensing of Environment* 140:23–35.
12. Fickas, K.C., W.B. Cohen and Z. Yang. 2014. 2016. Landsat-based monitoring of annual wetland change in the Willamette Valley of Oregon, USA from 1972 to 2012. *Wetlands Ecology and Management* 24(1): 73-92. https://doi.org/10.1007/s11273-015-9452-0

13. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau and R. Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
14. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press; 2021.
15. Kaplan, G. and U. Avdan. 2017. Mapping and monitoring wetlands using Sentinel-2 satellite imagery. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-4/W4, pp.271-277. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-271-2017
16. Kwang, C., E.M. Osei Jnr and A.S. Amoah. 2018. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using Water Extraction Indexes over Volta River. *Journal of Geography and Geology* 10(1): 1-14. https://doi.org/10.5539/jgg.v10n1p1
17. Lacaux, J.P., Y.M. Tourre, C. Vignolles, J.A. Ndione and M. Lafaye. 2007. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment* 106(1): 66-74.
18. Luna Juncal, M.J., P. Masino, E. Bertone and R.A. Stewart. 2023. Towards nutrient neutrality: A review of agricultural runoff mitigation strategies and the development of a decision-making framework. *Science of The Total Environment* 874: 162408. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162408
19. Main-Knorn, M., B. Pflug, J. Louis, V. Debaecker, U. Müller-Wilm and F. Gascon. 2017. Sen2Cor for Sentinel-2. *In:* Proceedings of SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, Warsaw, Poland. https://doi.org/10.1117/12.2278218
20. Mamun, M., M. Hasan and K.-G. An. 2024. Advancing reservoirs water quality parameters estimation using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data with machine learning approaches. *Ecological Informatics* 81: 102608. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102608
21. McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) to delineate open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7):1425–1432.
22. Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9(1):62–66.
23. Rahmati, O., H. Ghasemieh, M. Samadi, Z. Kalantari, J.P. Tiefenbacher, O.A. Nalivan, A. Cerdà, S.S. Ghiasi, H. Darabi, A.T. Haghighi and D.T. Bui. 2020. TET: An automated tool for evaluating suitable check-dam sites based on sediment trapping efficiency. *Journal of Cleaner Production* 266: 122051. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122051
24. Sharifi, A. and et al. 2023. Sustainable water storage under climate pressure: A remote sensing approach. *Hydrological Processes* 37(4):e14895.
25. Wang, X., D. Xie, X. Li, H. Long and W. Tang. 2020. Ensembles of multiple spectral water indices for improving surface water mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92: 102177.
26. Xu, H. 2006. Modification of the NDWI to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14):3025–3033.
27. Yang J and Y. Hong. 2024. Adaptive thresholding and spectral optimization for water body extraction. *Remote Sensing Applications* 15: 101248.
28. Yu, Y., Y. Pi, X. Yu, Z. Ta, L. Sun, M. Disse, F. Zeng, Y. Li, X. Chen and R. Yu. 2019. Climate change, water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. *Journal of Arid Land* 11: 1–14. https://doi.org/10.1007/s40333-018-0073-3
29. Zebardast, L. and H. Jafari. 2011. Use of Remote Sensing in Monitoring the Trend of Changes of Anzali Wetland in Iran and Proposing Environmental Management Solution. *Journal of Environmental Studies* 37(57): 1-8.
30. Zheng, J., J. Wang, J. Guo, Y. Zhang, Q. Lü and H. Sun. 2021. A siphon drainage system with variable diameters for landslides: Concept, calculation, and validation. *Journal of Hydrology* 597: 126305.
31. Zhu, Z., S. Wang and C.E. Woodcock. 2015. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment* 159: 269-277. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014