



Detection and monitoring of water body changes using innovative thresholding of spectral indices Case study: Gorgan Gulf and Miankaleh Wetland

Ali Rezaali ¹ , Hamid Ebadi ² , Hadi Farhadi ^{*3}

1- Bachelor's student of surveying engineering, Faculty of geodesy and geomatics engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
Email: AliRezaaliGeo@gmail.com

2- Professor, Photogrammetry and remote sensing department, Faculty of geodesy and geomatics engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: Ebadi@kntu.ac.ir

3- (*Corresponding author) Ph.D. Student in remote sensing, Faculty of geodesy and geomatics engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: hadi.farhadiabeshahmadloo@email.kntu.ac.ir

Article Info

Date of receive:

2024/09/15

Date of last review:

2024/11/23

Date of accept:

2024/11/29

Date of online publication:

2024/11/29

Keywords:

Remote sensing,
Google earth engine,
Water body extraction,
Spectral indices,
Thresholding,
Gorgan Gulf,
Miankaleh Wetland

Extended Abstract

Introduction

Water bodies are crucial in Earth's ecosystems, human life, agriculture, and various industries. However, in recent years, global challenges like urbanization, climate change, and over-extraction of groundwater have significantly affected these vital resources. Iran, in particular, is dealing with a severe water crisis, made worse by reduced precipitation and changing climate patterns, leading to visible declines in its lakes, rivers, and wetlands. Consequently, effective monitoring and management of water bodies are essential to battle this crisis. Remote sensing (RS) technology provides a cost-effective, long-term solution for large-scale environmental monitoring. The Google Earth Engine (GEE) cloud platform enables rapid and accurate analysis of satellite images, facilitating effective monitoring of temporal changes in water bodies. GEE's ability to process freely accessible satellite data, such as Sentinel-2 imagery, makes it particularly useful and efficient for monitoring surface water area through spectral indices specifically designed for water detection and extraction. Therefore, the main objective of this study is to monitor the 6-year time series of changes in Gorgan Gulf and Miankaleh Wetland using Sentinel-2 imagery in the GEE platform. The study utilizes GEE's capabilities to provide accurate, up-to-date information, which is important for water resource management in the region. ... ► Page 34

How to Cite:

Rezaali, A. Ebadi, H. Farhadi, H. (2025). Detection and monitoring of water body changes using innovative thresholding of spectral indices - Case study: Gorgan Gulf and Miankaleh Wetland. Scientific - Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(134), 33-60.

Materials & Methods

Study Area

The present study focuses on Gorgan Gulf and Miankaleh Wetland, both located below the Caspian Sea in northern Iran.

Data

To extract water bodies in the current study, Sentinel-2 imagery was used along with 440 validation samples (220 water and 220 non-water) to assess the accuracy of the spectral index classification. The validation samples were extracted from the 6-year mean (2018–2024) RGB Sentinel-2 image within the study area.

Methodology

A spectral index-based approach was employed to extract water bodies using Sentinel-2 satellite images. The spectral indices used to identify water bodies in the study area include the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Water Ratio Index (WRI), New Water Index (NWI), and Enhanced Water Index (EWI). The study was implemented and executed in GEE. After preprocessing Sentinel-2 images using the SCL and QA60 bands, a mean reducer function was applied to generate seasonal composite images for each year. Based on these seasonal composites, the spectral indices (MNDWI, EWI, NWI, and WRI) were calculated. Optimal threshold values for each index were determined using the Edge Otsu thresholding algorithm. The steps of the Edge Otsu thresholding method include binary thresholding with initial thresholds, Canny edge detection, edge length filter, edge buffering, sampling within the buffer, histogram creation, and finally applying Otsu's method to calculate optimal thresholds. After calculating and applying the optimal thresholds to the spectral index images, binary maps (water and non-water classes) were generated. Finally, the accuracy of the extracted water bodies was assessed both quantitatively and qualitatively.

Results & Discussion

According to the quantitative evaluation results, the WRI spectral index achieved the highest accuracy with an overall accuracy (OA) of 99% and a Kappa coefficient (KC) of 0.99, while the MNDWI index had the lowest accuracy, with an OA of 98% and a KC of 0.96. When

applying the default threshold values, the WRI and NWI indices had the highest and lowest accuracy metrics, with overall accuracies of 94% and 86%, and Kappa coefficients of 0.88 and 0.65, respectively. The results also suggest that the NWI and EWI indices can be used interchangeably due to their high accuracy similarity (98% for optimal threshold and 83% and 85% for default threshold). Qualitative and visual accuracy assessments confirmed the quantitative accuracy values of the different spectral indices in extracting water bodies. Furthermore, the study shows a significant reduction in the area of the studied water bodies over the past six years, especially in between the years 2021 and 2022. The annual mean surface water area from 2018 to 2024 steadily declined, with areas of 399.73, 381.52, 374.18, 357.99, 311.63, and 293.60 square kilometers, respectively. In addition, the annual rate of change for the study period was estimated at -4.55%, -1.92%, -4.32%, -12.94%, and -5.78%. Based on the analyses, the most significant reduction in water area occurred in the Miankaleh Wetland. Visual analysis of the results indicated that the fall of 2023 had the smallest surface water area, while the summer of 2018 had the largest.

Conclusion

Gorgan Gulf and Miankaleh Wetland, two of the most important water resources of the Caspian Sea and Iran, have faced serious challenges from drought and reduced surface water in recent years, highlighting the need for continuous and accurate monitoring. Therefore, this study utilized Sentinel-2 satellite imagery from 2018 to 2024 to extract water bodies using spectral indices and the Edge Otsu thresholding algorithm. The proposed method was implemented in GEE, which enables rapid cloud-based calculations. The findings of this study demonstrate that the Edge Otsu thresholding method achieved optimal accuracy in water body extraction compared to default thresholds (such as 0 and 1). In addition, the spatiotemporal changes in the study area were analyzed, revealing a significant decrease in the water area, particularly in the Miankaleh Wetland. Thus, this study illustrates the effectiveness of the Edge Otsu algorithm in improving accuracy and suggests that combining spectral indices with machine learning models in future research could further enhance water body extraction.



شناسایی و پایش تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از آستانه‌گذاری ابتکاری شاخص‌های طیفی مطالعه موردی: خلیج گرگان و تالاب میانکاله

علی رضاعلی^۱، حمید عبادی^۲، هادی فرهادی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران AliRezaaliGeo@gmail.com
۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران Ebadi@kntu.ac.ir
۳- (*نویسنده مسئول) دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران hadi.farhadiabeshahmadloo@email.kntu.ac.ir

چکیده

خلیج گرگان و تالاب میانکاله از مهم‌ترین پهنه‌های آبی ایران، نیازمند نظارت مستمر و پایش تغییرات مساحت آبی هستند. با توجه به چالش‌های موجود در تهیه نقشه پهنه آبی از تصاویر ماهواره‌ای نوری (ابر و سایه) و عدم وجود رویکرد آستانه‌گذاری قابل اطمینان برای استخراج زمانی-مکانی پهنه آبی، مطالعه حاضر عملکرد شاخص‌های طیفی WRI، NWI، EW، MNDWI و مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ را به تفکیک فصول مختلف مورد بررسی قرار داده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، به‌کارگیری ابتکاری الگوریتم آتسو لبه به‌منظور پایش دقیق تغییرات مساحت پهنه‌های آبی و مقایسه عملکرد آن با شاخص‌های طیفی مختلف است. بنابراین، مشارکت تحقیق حاضر، به‌کارگیری الگوریتم آتسو لبه و تهیه نقشه پهنه آبی به‌صورت سری زمانی در مقیاس فصلی است. نتایج ارزیابی کمی صحت استخراج پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی نشان داد که شاخص طیفی WRI با صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۹ بیشترین صحت و شاخص MNDWI با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۶ کمترین صحت را در حالت استفاده از آستانه بهینه ثبت کرده‌اند. همچنین، در شرایط اعمال حدود آستانه پیش‌فرض، شاخص‌های طیفی WRI و NWI به‌ترتیب با صحت‌های کلی ۹۴ درصد و ۸۶ درصد و ضرایب کاپای ۰/۸۸ و ۰/۶۵، بیشترین و کمترین صحت‌ها را ثبت کرده‌اند. با توجه به نتایج کسب شده، میانگین سالانه مساحت آبی محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله در محدوده زمانی مطالعاتی به‌ترتیب برابر با ۳۹۹/۷۳، ۳۸۱/۵۲، ۳۷۴/۱۸، ۳۵۷/۹۹ و ۳۱۱/۶۳ و ۲۹۳/۶۰ کیلومتر مربع بوده است. لذا، تغییرات سالانه در این مدت به‌ترتیب معادل ۴/۵۵٪، ۱/۹۲٪، ۴/۳۲٪، ۱۲/۹۴٪ و ۵/۷۸٪ ثبت شده است. براساس تحلیل مساحت پهنه آبی از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، یک الگوی نزولی در این منطقه حاکم بوده و میزان کاهش در سال ۲۰۲۲ شدیدتر از سال‌های دیگر به ویژه در تالاب میانکاله برآورد شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۰۹

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۰۹/۰۹

واژه‌های کلیدی:

سنجش از دور؛

گوگل ارث انجین؛

استخراج پهنه آبی؛

شاخص‌های طیفی؛

آستانه‌گذاری؛

خلیج گرگان؛

تالاب میانکاله

استناد به این مقاله:

رضاعلی، ع؛ عبادی، ح؛ فرهادی، ه (۱۴۰۴) شناسایی و پایش تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از آستانه‌گذاری ابتکاری شاخص‌های طیفی - مطالعه موردی: خلیج گرگان و تالاب میانکاله؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴، (۱۳۴)، ۶۰-۳۳

۱- مقدمه

پهنه‌های آبی جهان از اجزای اساسی محیط زیست زمین محسوب می‌شوند که تأثیرات فراوانی بر حیات انسان‌ها، کشاورزی و صنایع می‌گذارند. توسعه شهرنشینی، تغییرات شدید اقلیمی و استخراج بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، از عواملی هستند که فشار زیادی بر منابع آبی وارد کرده‌اند (Chen et al., 2022). در سال‌های اخیر، منابع آبی ایران به دلیل کاهش بارش‌ها، تغییر الگوهای بارندگی و تأثیر تغییرات اقلیمی بر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سایر پهنه‌های آبی به شدت تحت فشار قرار گرفته‌اند. به همین علت، کشور با بحرانی‌ترین وضعیت در کاهش منابع آب و پهنه‌های آبی مواجه شده است (Noori et al., 2023). لذا، پایش سریع، مدیریت مؤثر و نظارت مداوم بر پهنه‌های آبی، در یک مقیاس وسیع و به مدت طولانی ضروری است. استفاده از فناوری سنجش از دور و سامانه گوگل ارث انجین (GEE)^۱ که قادر به تسریع فرآیندها و ساده‌سازی محاسبات است، به عنوان یک راه‌حل کلیدی پیشنهاد می‌شود (Guo et al., 2024; Jin et al., 2023; Wang et al., 2023).

پهنه‌های آبی مهم ایران، شامل دریاچه ارومیه، تالاب هامون جازموریان، زاینده‌رود و تالاب میانکاله و خلیج گرگان در سال‌های اخیر با بحران شدید کمبود آب مواجه شده‌اند. دریاچه ارومیه به دلیل کاهش بارندگی و تبخیر بالا (Habibi et al., 2021)، تغییرات اقلیمی (Madani, 2014) و سدسازی (Rahimi & Breuste, 2021) دچار افت شدید سطح آب شده است. همچنین، تالاب هامون جازموریان تحت فشارهای انسانی و مدیریت ناپایدار منابع آبی (Rad et al., 2022) قرار دارد که منجر به تخریب بوم‌سازگان آن شده است. زاینده‌رود نیز به خاطر برداشت بیش از حد از منابع آب (Madani et al., 2016) با مشکلات جدی مواجه است. علاوه بر این، تالاب میانکاله و خلیج گرگان به دلیل تغییرات اقلیمی، برداشت بیش از حد آب و آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی (Khoshrovan et al., 2022) با بحران مواجه شده‌اند.

این عوامل در مجموع موجب بروز بحران شدید کمبود آب در این مناطق در سال‌های اخیر شده‌اند.

سامانه GEE یک سامانه تحت وب با قابلیت محاسبات ابری است که با ارائه مجموعه داده‌های رایگان و پردازش سریع داده‌ها، به تحلیل‌های سنجش از دوری کمک شایانی می‌کند. این سامانه در سال‌های اخیر با استقبال بی‌نظیر پژوهشگران سنجش از دور مواجه شده و دنیای تحلیل‌ها و محاسبات عظیم سنجش از دوری را دگرگون ساخته است. با استفاده از محاسبات ابری، دسترسی آسان و سرعت پردازش بالا، GEE در تهیه نقشه‌های پهنه‌های آبی در انواع مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای، جهانی و در بازه زمانی طولانی مدت بسیار مؤثر و کارآمد است (Amani et al., 2020; Kumar & Mutanga, 2018). علاوه بر این، سامانه GEE به طور گسترده در مطالعات مختلفی، از جمله نظارت بر بحران سیل (Farhadi, Esmaeily, et al., 2022)، شناسایی ریسک سیلاب (Farhadi & Najafzadeh, 2021)، کشاورزی (Huang et al., 2024)، مدیریت شهری (Farhadi et al., 2023; Farhadi, Managhebi, et al., 2022; Liang et al., 2020) و شناسایی و مدیریت جنگل (Farzanmanesh et al., 2024) و شناسایی و استخراج پهنه‌های آب سطحی (Farhadi et al., 2024; Li et al., 2021; Pang et al., 2024; Zhou et al., 2024) استفاده می‌شود.

الگوریتم‌های تشخیص و استخراج آب مبتنی بر ترکیب باندی (شاخص‌های طیفی آبی) (Liu et al., 2022)، روش آستانه‌گذاری تک‌باندی (Jiaxin Li et al., 2022) و روش رابطه طیفی چندباندی (X. Wang et al., 2018)، الگوریتم‌های طبقه‌بندی^۲ به روش یادگیری ماشین (مانند ماشین بردار پشتیبان^۳ (SVM) (H. Tang et al., 2022)) و روش‌های یادگیری عمیق از جمله الگوریتم‌های استخراج آب با به کارگیری داده‌های سنجش از دوری هستند. روش‌های یادگیری ماشین که با داده‌های ساختاریافته کار می‌کنند و نیازمند سطح محاسباتی متوسط هستند، برای بررسی پهنه‌های آبی مناسب بوده و در عین حال انعطاف‌پذیری و تفسیرپذیری را در فرآیند مهندسی ویژگی ممکن می‌کنند. از طرفی، رویکرد مبتنی

2- Classification

3- Support Vector Machine

1- Google Earth Engine

آبی بهبودیافته) (Pei, 2007) چند نمونه از شاخص‌های طیفی شناخته‌شده و مرسوم هستند.

در سال‌های گذشته، مطالعات کاربردی مختلف و نوینی با استفاده از شاخص‌های طیفی صورت گرفته است. برای مثال، Ticehurst و همکاران از چندین شاخص آبی، از جمله MNDWI، FWI، WofS و TCW^۵ برای تهیه نقشه از گستره آب‌های سطحی استفاده کرده و به نقاط قوت و ضعف آن‌ها در محیط‌هایی با پوشش‌های زمینی مختلف پرداخته است. با ترکیب این شاخص‌ها، مطالعه مذکور بهینه‌ترین کاربرد آن‌ها را برای تهیه نقشه صحیح آب در حوضه موری-دارلینگ^۸، استرالیا، ارائه می‌دهد (Ticehurst et al., 2022).

رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی به دلیل سرعت بالای آن، به عنوان روشی مرسوم برای برآورد پهنه آبی تلقی می‌شود (Montero et al., 2023; Mueller et al., 2016). علاوه بر این، روش مذکور مزایای متعددی دارد که از جمله آن می‌توان به کاهش تأثیر عوامل مختلف اختلال مثل سایه و پوشش گیاهی اشاره کرد. با این وجود، یکی از مهم‌ترین معایب رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی، وابستگی بیش از حد به ارتباط بین ویژگی‌های زمینی مختلف است (Tran et al., 2022). به عبارت دیگر، زمانی که انعکاس طیفی این ویژگی‌ها تضعیف می‌شود، توانایی شناسایی آب کاهش پیدا کرده و نتایج نامطلوبی حاصل خواهد شد. بنابراین، در برخی از محدوده‌ها نیاز به استفاده از ترکیب شاخص‌های طیفی مختلف است تا توانایی تفکیک ویژگی آبی از غیرآب بهبود یابد. این روش برای مناطقی که حاوی پوشش‌های زمینی با پیچیدگی کم هستند مناسب است.

در مطالعه‌ای که لی و همکاران در سال ۲۰۲۲ انجام دادند، به بررسی تغییرات ۲۱ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱) حوضه آبریز دریاچه بوستن^۹ چین پرداخته شد که در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ در سامانه GEE استفاده

بر یادگیری عمیق در پردازش داده‌های بدون ساختار نظیر تصاویر ماهواره‌ای عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد؛ زیرا این روش به صورت خودکار الگوهای سخت و پیچیده را یاد می‌گیرد (Sengupta et al., 2020). با این وجود، به منابع محاسباتی بالاتری نیاز دارد و ممکن است قدرت تفسیرپذیری کمتری داشته باشد. از سوی دیگر، یادگیری عمیق از نظر آموزش نمونه‌ها زمان‌بر است. روش مبتنی بر طبقه‌بندی، پهنه‌های کوچک و باریک آبی را با استفاده از ویژگی‌های طیفی، تصویری، مکانی و بافتی آن‌ها شناسایی می‌کند. در حالت کلی، در طبقه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین، هر دو روش نظارت‌شده و بدون نظارت وجود دارد (Guo et al., 2023).

روش‌های بدون نظارت دقیق نیستند و همچنین روش‌های نظارت‌شده به تعداد و کیفیت (در نظر گرفتن پراکندگی و نحوه اخذ) نمونه‌های آموزشی اخذشده وابسته هستند (Farhadi, Esmaeily, et al., 2022). علاوه بر این، انتخاب صحیح حد آستانه نقش کلیدی در میزان صحت طبقه‌بندی در روش آستانه‌گذاری تک‌باند دارد. روش آستانه‌گذاری تک‌باند در استخراج پهنه‌های آبی باریک، پهنه‌های آبی دارای پیکسل‌های ترکیب آبی و غیرآبی، مناطق با توپوگرافی پیچیده (مانند کوهستان) و برفی به خوبی عمل نمی‌کند؛ با این وجود، برای پهنه‌های آبی بزرگ مانند رودخانه‌های عریض و دریاچه‌ها مؤثر است (Farhadi et al., 2024). همانطور که اشاره شد، روش‌های مختلفی برای تشخیص و استخراج پهنه‌های آبی وجود دارد، اما در کل، روش مبتنی بر شاخص‌های طیفی که بر پایه ترکیب باندهای طیفی است، روشی بسیار مرسوم، پرکاربرد و سریع محسوب می‌شود. شاخص‌های NDWI^۱ (شاخص نرمال‌شده تفاضلی آب) (McFeeters, 1996)، شاخص MNDWI^۲ (شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده) (Xu, 2006)، شاخص WRI^۳ (شاخص نسبت آب) (Shen & Li, 2010) و شاخص EWI^۴ (شاخص

5- Fisher's Water Index

6- Water Observations from Space

7- Tasseled Cap Wetness

8- Murray-Darling

9- Bosten Lake Basin

1- Normalized Difference Water Index

2- Modified Normalized Difference Water Index

3- Water Ratio Index

4- Enhanced Water Index

شاخص‌های طیفی EVI و NDVI و روش آستانه‌گذاری آتسو به‌کار گرفته شد (Tan et al., 2020). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تحقیق مذکور، پیاده‌سازی روش پیشنهادی به‌صورت سری زمانی در بازه ۳۳ سال بود که به تأثیرات مختلف ناشی از پهنه‌های آبی و شناسایی ارتباط بین تغییرات پهنه آبی و رویش گیاهی پرداخته شده بود. در مطالعه‌ای دیگر، فرهادی و همکاران برای مقابله با چالش‌های مرسوم در استخراج پهنه‌های آبی در مناطق بدون سایه (مانند سایه‌های مناطق شهری و پهنه‌های آبی کوچک و گل‌آلود)، شاخصی جدید به نام "شاخص استخراج آب/سیلاب" (FWEI) ^۵ توسعه دادند. این شاخص از نسبت میانگین باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) ^۶ اخذ شده از تصاویر سنتینل-۲ استفاده می‌کند. شاخص FWEI عملکرد بهتری در تهیه نقشه‌های آبی از آب‌های گل‌آلود و شفاف در پهنه‌های کوچک و رودخانه‌های باریک نشان می‌دهد و نسبت به شاخص‌های موجود مانند NDWI-G ^۷، NDWI-F ^۸، MNDWI-1، MNDWI-2 و AWEInsh ^۹ عملکرد برتری دارد. با دستیابی به صحت کلی متوسط ۹۴/۲۶ درصد برای استخراج آب و ۹۳/۱۱ درصد برای استخراج سیلاب، شاخص FWEI صحت استخراج آب را بهبود می‌بخشد. در مطالعه مذکور، از شاخص FWEI با تکنیک آستانه‌گذاری Otsu برای استخراج صحیح بدنه‌های آبی و مناطق سیلابی استفاده شده است. شاخص توسعه داده‌شده در استخراج صحیح پهنه‌های آبی کوچک و مناطق سیلابی در رودخانه‌های باریک و مخازن کوچک برتری دارد. این امر با شاخص‌های رایج به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر آن‌ها (۲۰ تا ۶۰ متر برای سنتینل-۲) امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، شاخص مذکور نسبت به پوشش ابری حساس است؛ بنابراین، پژوهشگران بر لزوم توسعه شاخصی مقاوم به ابر برای استخراج آب با استفاده

شده است. در مطالعه مذکور، برای پایش پهنه‌های آبی از ۱۰ شاخص طیفی از جمله شاخص‌های طیفی AWEI ^۱، NDWI و MNDWI و سه روش طبقه‌بندی Smile Cart، SVM و سه روش فاصله ^۲ استفاده شده است. مطالعه انجام شده در محدوده‌ای بزرگ، برای مدت زمان طولانی و در مناطقی با توپوگرافی سخت و پیچیده انجام گرفته است. پژوهشگران استفاده از حد آستانه صفر برای تمامی پهنه‌های آبی و شاخص‌های طیفی را دارای مزایا و معایب خاص خودشان می‌دانند. به‌طوری‌که در برخی از پهنه‌های آبی در این حوضه آبریز، حد آستانه صفر نتایج مناسب و برای برخی دیگر از آن‌ها، نتایج نامناسبی ارائه می‌کند؛ به همین علت، مقادیر آستانه در مطالعه مذکور به‌صورت تکرارشونده ^۳ اعمال شده است. برای مثال، برای شاخص WI_{۲۰۱۹} ^۴، حدود آستانه ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ به همراه حدود آستانه ماسک شیب مختلف مانند صفر تنظیم شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی تأثیر شیب، چهار منطقه مجزا با توپوگرافی پیچیده به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این بود که شاخص طیفی WI_{۲۰۱۹} با حد آستانه ۰/۱۵ و حد آستانه شیب ۸ درجه، در مناطق دارای توده‌های برفی عملکرد مطلوبی داشته و در مناطقی که شیب منطقه از این حدود کمتر بوده، صحت بالاتری داشته است. نویسندگان مقاله دریافتند که با قرار دادن ماسک و تعدیل شیب در استخراج پهنه‌های آبی در مناطق با توپوگرافی شدید، بهبود قابل توجهی در صحت نتایج حاصل می‌شود (X. Li et al., 2022). در مطالعه دیگری که در دریاچه لانگان چین در سال ۲۰۲۰ توسط Tan و همکاران صورت گرفت، به بررسی ارتفاع آب و گونه‌های گیاهی متراکم بر روی آب پرداخته شد. در مطالعه مذکور، داده‌هایی چون تصاویر مربوط به ماهواره‌های سری لندست-۵، ۷ و ۸ به‌صورت سری زمانی از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۹ مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر این،

5- Flood/Water Extraction Index

6- Near Infrared Red

7- Normalized Difference Water Index - Gao

8- Normalized Difference Water Index - McFeeters

9- Automated Water Extraction Index (No Shadow)

1- Automated Water Extraction Index

2- Minimum Distance

3- Iterative

4- Water Index 2019

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله است. خلیج گرگان، در محدوده عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی تا ۳۷ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی تا ۵۴ درجه و ۶ دقیقه شرقی (Gharibreza et al., 2018)، به عنوان بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر در بخش جنوب شرقی دریای خزر و در استان گلستان واقع شده است. این خلیج، مساحتی معادل ۵۵۰ کیلومتر مربع، طول و عرضی به ترتیب برابر با ۵۵ و ۱۰ کیلومتر دارد. همچنین، بیشینه عمق حوضه خلیج ۴/۵ متر بوده که به تدریج در ساحل غربی که منطقه ساحلی آن توسط تالاب‌ها پوشانده شده است، به مقدار صفر می‌رسد (Gharibreza et al., 2018). طول خلیج حدود ۷۰ کیلومتر (Amini et al., 2012) و در جهت غربی-شرقی و عرض آن بین ۱۲ تا ۱۳ کیلومتر متغیر است. علاوه بر این، مساحت آبخیز آن بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر مربع است که بیش از دو سوم آن در استان مازندران واقع شده است. نگاره ۱، موقعیت جغرافیایی و تصویر RGB با ترکیب رنگ واقعی از تصاویر میانگین مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- داده‌ها و پیش‌پردازش

برای بررسی آماری و بصری نتایج استخراج و تغییرات پهنه آبی در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر رایگان و با دسترسی آزاد ماهواره‌ای سنتینل-۲ (Bhangale et al., 2020; C. ۲- Wang et al., 2018; Yang et al., 2017) استفاده شده است. ماهواره سنتینل-۲ یکی از مأموریت‌های مشاهداتی زمین از برنامه کوپرنیک^۳ انجمن فضایی اروپا^۴ (ESA) است که تصاویر چندطیفی با وضوح متوسط را جمع‌آوری می‌کند و برای طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله پوشش خاک و آب، پایش گیاهان، تغییرات پوشش زمین، و همچنین حوادث

از داده‌های SAR^۱ در تحقیقات آینده تأکید کرده‌اند (Farhadi et al., 2024).

با توجه به پیشینه تحقیق، در بیشتر مطالعات بر اساس شاخص‌های طیفی، از یک یا دو شاخص طیفی استفاده شده است. علاوه بر این، استفاده از یک روش آستانه‌گذاری هوشمند و بهینه، یکی از مهم‌ترین مراحل در تهیه نقشه پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی است. این درحالی است که در اغلب پژوهش‌های صورت گرفته، آستانه‌گذاری شاخص‌های طیفی به شکل تک‌مقداره و به صورت تجربی و آزمون و خطا بوده و از الگوریتم آستانه‌گذاری خودکار با اطمینان بالا استفاده نشده است؛ با این وجود، در مطالعه حاضر از چهار شاخص طیفی و روش آستانه‌گذاری ابتکاری آتسو لبه^۲ استفاده شده است. علاوه بر این، به دلیل اینکه پهنه‌های آبی به عنوان پدیده پویا به شمار می‌آیند، ممکن است که تنها با بررسی میانگین سالانه تغییرات نتیجه مناسبی در خصوص پایش پهنه‌های آبی حاصل نشود. این درحالی است که در اکثر مطالعات انجام شده تاکنون، میانگین سالانه تغییرات مد نظر بوده و تمامی فصل‌های سال مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

لذا، هدف اصلی تحقیق حاضر پایش سری زمانی شش ساله تغییرات خلیج گرگان و تالاب میانکاله با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در سامانه GEE است. مطالعه حاضر در راستای رسیدن به هدف اصلی، چندین هدف فرعی را نیز دنبال می‌کند که شامل شناسایی و تعیین مقادیر آستانه مناسب برای استخراج پهنه‌های آبی از شاخص‌های طیفی مختلف، تحلیل تغییرات شش ساله به تفکیک فصل در منطقه خلیج گرگان و تالاب میانکاله، ارزیابی صحت شاخص‌های طیفی مختلف، بررسی و مقایسه شاخص‌های طیفی متنوع در استخراج آب‌های سطحی، استفاده از الگوریتم ابتکاری آستانه‌گذاری هوشمند آتسو لبه و مقایسه آن با حدود آستانه پیش فرض و مرسوم هستند.

3- Copernicus Program
4- European Space Agency

1- Synthetic-Aperture Radar
2- Edge Otsu



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی خلیج گرگان و تالاب میانکاله

تحقیق حاضر از تعداد ۱۷۵۳ تصویر سنتینل-۲ از تاریخ ۲۱-۲۰۱۸-۰۳ تا ۲۱-۲۰۲۴-۰۳ استفاده شده است. نگاره ۲، تعداد تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده مربوط به سنتینل-۲ در منطقه مورد مطالعه و محدوده زمانی شش سال اخیر (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴) را به تفکیک فصول سال نشان می‌دهد. جدول ۱، محدوده زمانی مورد بررسی در مطالعه حاضر را در قالب تاریخ‌های میلادی و شمسی نشان می‌دهد.

برای ایجاد موزائیک تصویر که از داده‌های سری زمانی تشکیل می‌شود، از کاهنده میانگین^۴ در GEE استفاده شده است که با محاسبه میانگین پیکسل‌های تصاویر سری زمانی، تأثیر داده‌های اشتباه (تصاویر با پوشش ابر، سایه ابر و برف) و نویزهای نامطلوب تصاویر سنجنش از دوری را کاهش می‌دهد. در تحقیق حاضر، مجموعه داده سنتینل-۲ بر اساس مرز جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (خلیج گرگان و تالاب میانکاله)، بازه زمانی شش سال اخیر (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ به تفکیک فصل) و حداکثر درصد پوشش ابر ۱۰ درصد فیلتر شده است. با توجه به ضمانت سامانه GEE نسبت به ارتو بودن^۵ و عاری بودن داده‌های سنتینل-۲ از هرگونه خطای رادیومتریک، اتمسفری و سنجنده (Amani et al., 2020; Wulder et al., 2019; Yang et al., 2022)، تصحیح‌های سنجنش از دوری نیست. همچنین، به منظور فیلترکردن پیکسل‌های نامطلوب و معیوب از ماسک‌های

طبیعی مفید است. ماهواره سنتینل-۲ (MSI)^۱ با دید گسترده (۲۹۰ کیلومتر)، قدرت تفکیک زمانی بالا (۱۰ روز با یک ماهواره و ۵ روز با ترکیب دو ماهواره) و قدرت تفکیک مکانی متوسط (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری)، تصاویر چندطیفی ارائه می‌دهد. این ماهواره‌ها نسبت به ماهواره‌های مرسوم دیگر مانند ماهواره‌های سری لندست، تعداد بازدیدهای بیشتری را برای پایش‌های مستمر محیط‌زیستی فراهم می‌کنند. ماهواره سنتینل-۲، از دو ماهواره همسان سنتینل-2A و سنتینل-2B تشکیل شده است. باندهای قرمز، سبز و آبی (RGB) ماهواره سنتینل-۲، قدرت تفکیک مکانی به اندازه ۱۰ متر دارند. بهبود توان تفکیک مکانی و زمانی در تصاویر سنتینل-۲ نسبت به تصاویر سری لندست، می‌تواند برای برنامه‌های مختلفی که نیاز به دقت و بازدیدهای بیشتری دارند، مفید باشد. علاوه براین، قدرت تفکیک مکانی چهار باند (مرئی و NIR) ۱۰ متر، شش باند (لبه قرمز^۲ و مادون قرمز موج کوتاه) ۲۰ متر و سه باند (تصحیح جوی^۳) ۶۰ متر است. در پژوهش حاضر از داده‌های Harmonized Sentinel-2 MSI Level-1C ارتو تصحیح شده با بازتابش بالای جو استفاده شده است. این مجموعه داده با قطعه کد "S2_HARMONIZED" در سامانه GEE قابل دسترسی است. بنابراین، با توجه به بازه زمانی و مکانی مورد مطالعه، در

4- Mean Reducer

5- Orthorectified

1- Multi Spectral Instrument

2- Red Edge

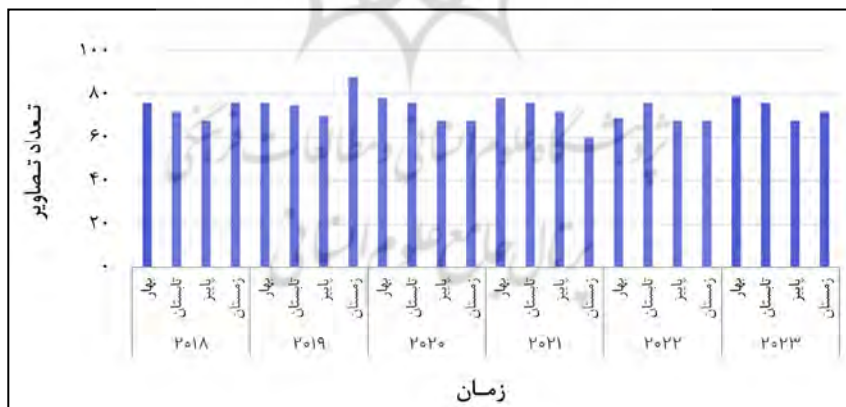
3- Atmospheric Correction

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمر)

شناسایی و پایش تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از آستانه‌گذاری ابتکاری ... / ۴۱

جدول ۱: محدوده زمانی مطالعاتی به تاریخ‌های میلادی و شمسی در پژوهش حاضر

عنوان فصل	شروع میلادی	پایان میلادی	شروع شمسی	پایان شمسی	عنوان فصل	شروع میلادی	پایان میلادی	شروع شمسی	پایان شمسی
بهار ۲۰۱۸	۲۰۱۸-۰۳-۲۱	۲۰۲۱-۰۶-۲۲	۱۳۹۷/۰۴/۰۱	۱۴۰۰/۰۴/۰۱	بهار ۲۰۲۱	۲۰۲۱-۰۳-۲۱	۲۰۲۱-۰۶-۲۲	۱۳۹۷/۰۴/۰۱	۱۴۰۰/۰۴/۰۱
تابستان ۲۰۱۸	۲۰۱۸-۰۶-۲۲	۲۰۲۱-۰۹-۲۳	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۴۰۰/۰۷/۰۱	تابستان ۲۰۲۱	۲۰۲۱-۰۶-۲۲	۲۰۲۱-۰۹-۲۳	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۴۰۰/۰۷/۰۱
پاییز ۲۰۱۸	۲۰۱۸-۰۹-۲۳	۲۰۲۱-۱۲-۲۲	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱	پاییز ۲۰۲۱	۲۰۲۱-۰۹-۲۳	۲۰۲۱-۱۲-۲۲	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱
زمستان ۲۰۱۸	۲۰۱۸-۱۲-۲۲	۲۰۲۱-۰۳-۲۱	۱۳۹۷/۱۰/۰۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱	زمستان ۲۰۲۱	۲۰۲۱-۱۲-۲۲	۲۰۲۲-۰۳-۲۱	۱۳۹۷/۱۰/۰۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱
بهار ۲۰۱۹	۲۰۱۹-۰۳-۲۱	۲۰۲۲-۰۶-۲۲	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۱	بهار ۲۰۲۲	۲۰۲۲-۰۳-۲۱	۲۰۲۲-۰۶-۲۲	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۱
تابستان ۲۰۱۹	۲۰۱۹-۰۶-۲۲	۲۰۲۲-۰۹-۲۳	۱۳۹۸/۰۷/۰۱	۱۴۰۱/۰۷/۰۱	تابستان ۲۰۲۲	۲۰۲۲-۰۶-۲۲	۲۰۲۲-۰۹-۲۳	۱۳۹۸/۰۷/۰۱	۱۴۰۱/۰۷/۰۱
پاییز ۲۰۱۹	۲۰۱۹-۰۹-۲۳	۲۰۲۲-۱۲-۲۲	۱۳۹۸/۰۷/۰۱	۱۴۰۱/۱۰/۰۱	پاییز ۲۰۲۲	۲۰۲۲-۰۹-۲۳	۲۰۲۲-۱۲-۲۲	۱۳۹۸/۰۷/۰۱	۱۴۰۱/۱۰/۰۱
زمستان ۲۰۱۹	۲۰۱۹-۱۲-۲۲	۲۰۲۲-۰۳-۲۱	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۴۰۱/۱۰/۰۱	زمستان ۲۰۲۲	۲۰۲۲-۱۲-۲۲	۲۰۲۳-۰۳-۲۱	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۴۰۱/۱۰/۰۱
بهار ۲۰۲۰	۲۰۲۰-۰۳-۲۱	۲۰۲۳-۰۶-۲۲	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۴۰۲/۰۴/۰۱	بهار ۲۰۲۳	۲۰۲۳-۰۳-۲۱	۲۰۲۳-۰۶-۲۲	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۴۰۲/۰۴/۰۱
تابستان ۲۰۲۰	۲۰۲۰-۰۶-۲۲	۲۰۲۳-۰۹-۲۳	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۱	تابستان ۲۰۲۳	۲۰۲۳-۰۶-۲۲	۲۰۲۳-۰۹-۲۳	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۱
پاییز ۲۰۲۰	۲۰۲۰-۰۹-۲۳	۲۰۲۳-۱۲-۲۲	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۴۰۲/۱۰/۰۱	پاییز ۲۰۲۳	۲۰۲۳-۰۹-۲۳	۲۰۲۳-۱۲-۲۲	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۴۰۲/۱۰/۰۱
زمستان ۲۰۲۰	۲۰۲۰-۱۲-۲۲	۲۰۲۳-۰۳-۲۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۴۰۳/۰۱/۰۱	زمستان ۲۰۲۳	۲۰۲۳-۱۲-۲۲	۲۰۲۴-۰۳-۲۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۴۰۳/۰۱/۰۱



نگاره ۲: تعداد تصاویر مورد استفاده از ماهواره سنتینل-۲ در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله

علاوه بر این، تابع احتمال وجود ابر^۳ در تصاویر سنتینل-۲، قابلیت فیلتر کردن حداکثر پوشش ابری “CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE” از طریق ویژگی‌های تصویر^۴ را فراهم می‌کند. همچنین، برای ماسک کردن پیکسل‌های برفی و یخی نیز از

بیتی^۱ باند کیفیت سنتینل-۲ به نام QA60^۲ استفاده شده است. ماسک‌های باند ارزیابی کیفیت به منظور حذف مشاهدات با کیفیت پایین ناشی از ابر، سایه ابر و برف یا یخ به صورت خودکار استفاده شدند.

3- Sentinel-2: Cloud Probability

4- Image Properties

1- Bitmask

2- Quality Assessment 60

حذف شدند. بعد از حذف پیکسل‌های نامطلوب از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده، تابع کاهنده میانگین اعمال شده و تصویر ترکیبی میانگین به‌ازای هر فصل ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از تصاویر فصلی ایجادشده، شاخص‌های طیفی مورد مطالعه (MNDWI، EWI، NWI و WRI) محاسبه شده و در مرحله بعد، حدود آستانه بهینه توسط الگوریتم ابتکاری آتسو لبه به‌صورت خودکار تعیین می‌شود. الگوریتم آتسو لبه شامل مراحل آستانه‌گذاری دودویی اولیه، الگوریتم تشخیص لبه Canny Edge، فیلتر طول لبه، بافر لبه‌ها، نمونه‌برداری داخل بافر و ایجاد هیستوگرام و اعمال الگوریتم آتسو هست. پس از محاسبه مقادیر بهینه آستانه و اعمال آن‌ها بر روی شاخص‌های طیفی، نقشه دودویی مربوط به کلاس پهنه آبی و غیرآبی استخراج شده است. در نهایت، نتایج آماری و بصری مساحت پهنه‌های آبی استخراج‌شده در منطقه مطالعاتی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در نگاره ۳، به توضیح روش پیشنهادی پرداخته شده است. نگاره ۳، مراحل انجام پژوهش حاضر را ارائه می‌کند.

۳-۱- شاخص‌های طیفی مورد استفاده

همانطور که قبلاً اشاره شد، شاخص‌های طیفی متنوعی به‌منظور استخراج پهنه‌های آبی ارائه شده است. شاخص‌های طیفی، از باندهای طیفی در طول موج‌های مختلف، معادلات و ساختار متفاوتی بهره‌مند هستند که برای کاربردهای مشخص طراحی می‌شوند. بنابراین، در تحقیق حاضر برای استخراج پهنه آبی در منطقه مورد مطالعه و ارزیابی شاخص‌ها از چهار شاخص طیفی کاربردی به‌منظور استخراج پهنه آبی شامل شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده (MNDWI)، شاخص نسبت آب (WRI)، شاخص آب جدید (NWI) و شاخص بهبودیافته آب (EWI) استفاده شده است. جدول ۲، روابط ریاضی شاخص‌های طیفی مورد استفاده در استخراج پهنه آبی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

باند SCL^۱ ماهواره سنتینل-۲ استفاده شده است. این باند اطلاعات طبقه‌بندی تصاویر سنتینل-۲ را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. علاوه بر این، از پردازش گر^۲ Cloud Score+ (GOOGLE/CLOUD_SCORE_PLUS/V1/S2_HARMONIZED) با استفاده از تابع linkCollection در GEE برای حصول اطمینان از کمینه بودن پدیده ابر در تصاویر سنتینل-۲ استفاده شده است. از این مجموعه داده با حد آستانه ۰/۶۰ و باند ارزیابی کیفیت CS^۳ برای بهبود هرچه بیشتر داده‌های سنتینل-۲ بهره‌گیری شده است.

۳-۲ روش تحقیق

در پژوهش حاضر از رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی برای استخراج پهنه‌های آبی با به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ استفاده شده است. شاخص‌های مورد مطالعه برای استخراج پهنه آبی در منطقه مورد مطالعه، شامل شاخص‌های اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال‌شده (MNDWI)^۴، شاخص نسبت آب (WRI)^۵، شاخص آب جدید (NWI)^۶ و شاخص بهبودیافته آب (EWI)^۷ هستند. مطالعه حاضر مطابق با مراحل روندنمای ارائه‌شده در نگاره ۳ در سامانه GEE انجام شده است. منبع داده مورد استفاده در پژوهش حاضر، مجموعه داده و تصاویر سنجنش از دوری سنتینل-۲ را شامل می‌شود. فرآیند پیش‌پردازش تصاویر مورد استفاده دارای چندین مرحله است. در مرحله اول، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ بر اساس محدوده جغرافیایی مورد مطالعه و محدوده زمانی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ (به تفکیک فصل‌های سال)، محدود شدند. سپس، به‌منظور افزایش صحت و کیفیت رادیومتریکی تصاویر مورد استفاده، پیکسل‌های حاوی ابر، برف و دیگر پیکسل‌های معیوب با استفاده از باندهای SCL و QA60 (European Space, 2022)

1- Scene Classification

2- Processor

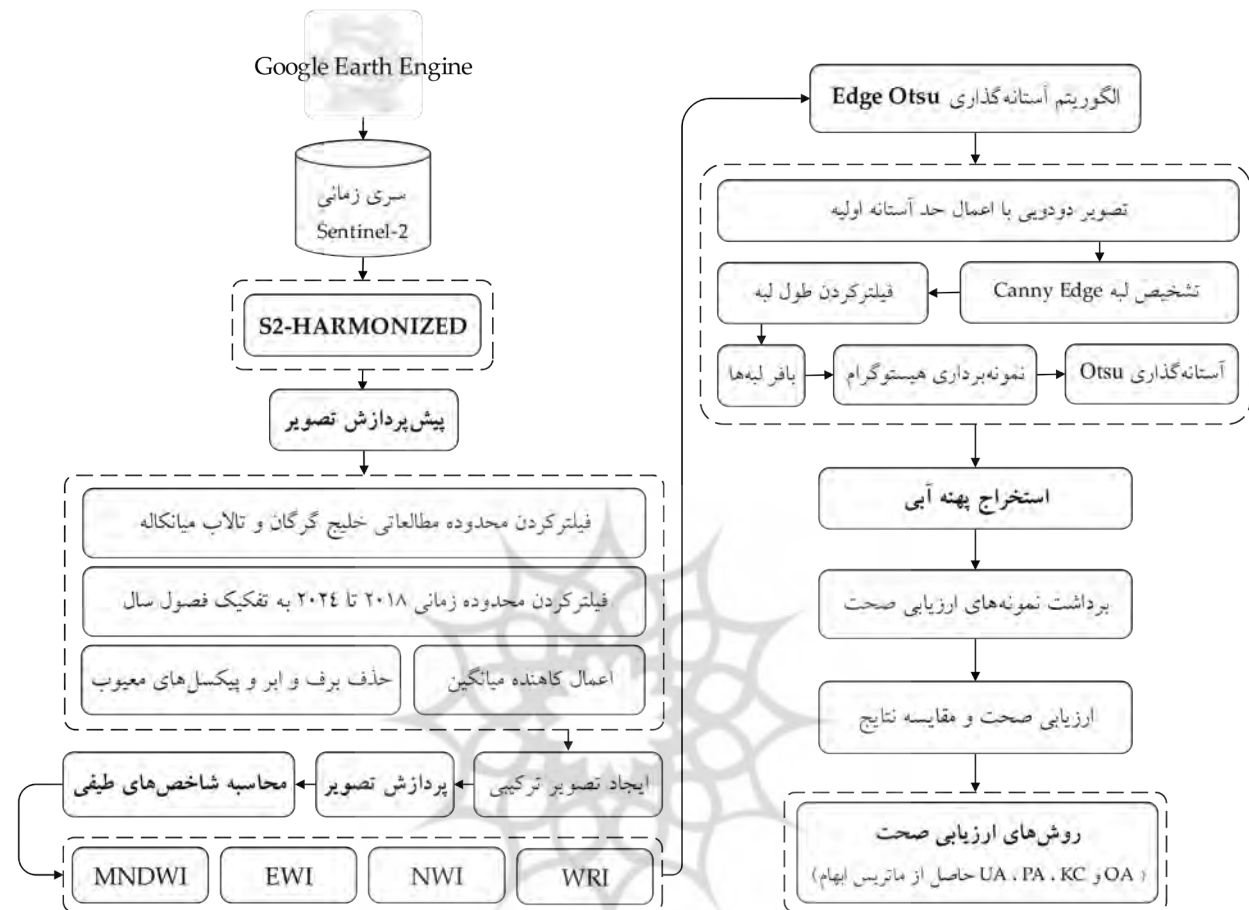
3- Cloud Score

4- Modified Normalized Difference Water Index

5- Water Ratio Index

6- New Water Index

7- Enhanced Water Index



نگاره ۳: روندنمای مراحل انجام پژوهش حاضر

جدول ۲: روابط ریاضی شاخص‌های طیفی مورد مطالعه

شماره رابطه	مرجع	نام شاخص طیفی	روابط شاخص‌های طیفی
(۱)	(Xu, 2006)	MNDWI	$MNDWI = (\rho_G - \rho_{SWIR1}) / (\rho_G + \rho_{SWIR1})$
(۲)	(Pei, 2007)	EWI	$EWI = (\rho_G - \rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_G + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR1})$
(۳)	(Feng, 2012)	NWI	$NWI = ((\rho_B - (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2})) / (\rho_B + (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2})))$
(۴)	(Shen & Li, 2010)	WRI	$WRI = (\rho_G + \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1})$

در جدول ۲، باندهای B، G، R و NIR-1 و SWIR-1 و ۳-۱-۱- شاخص اصلاح شده اختلاف آب نرمال شده (MNDWI) به ترتیب به باندهای آبی، سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک و باندهای مادون قرمز کوتاه موج ۱ و ۲ از تصاویر سنتینل-۲ اشاره دارند.

از باندهای آبی، NIR، و SWIR-1 و SWIR-2 استفاده شده که به ترتیب معادل با باندهای ۲، ۸، ۱۱ و ۱۲ در ماهواره سنتینل-۲ هستند.

۳-۱-۴- شاخص نسبت آب (WRI)

شاخص WRI توسط شن و همکاران (Shen & Li, 2010) در سال ۲۰۱۰ معرفی شد. شاخص WRI نسبت بین مجموع بازتاب‌های طیفی در باندهای قرمز و سبز به مجموع بازتاب‌های کل در باندهای NIR و MIR است (Mukherjee & Samuel, 2016). همچنین، می‌توان دریافت که مقدار شاخص WRI برای پهنه‌های آبی بیشتر از ۱ است (Shen & Li, 2010). شاخص WRI، از باندهای انعکاسی سبز، قرمز، NIR و SWIR استفاده می‌کند که به ترتیب معادل با باندهای ۳، ۴، ۸ و ۱۱ در ماهواره سنتینل-۲ هستند.

۳-۲- روش تعیین حد آستانه

یکی از چالش‌های مهم در رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی، تعیین مقادیر دقیق آستانه بهینه برای استخراج یک کلاس مشخص از شاخص‌ها هست. تصاویر اخذ شده در فصل‌ها و منطقه‌های متفاوت، تحت شرایط جوی و پوششی متفاوتی قرار دارند که می‌تواند بر مقدار حد آستانه تأثیر بگذارد. برای مثال، شاخص NDWI به‌طور معمول و در حالت پیش‌فرض با مقدار آستانه صفر به دو کلاس مختلف تقسیم می‌شود (Xu, 2006). با این وجود، تنظیم دقیق مقادیر آستانه می‌تواند صحت تشخیص پهنه‌های آبی را افزایش دهد (Acharya et al., 2018). روش‌های متنوعی برای آستانه‌گذاری شاخص‌های طیفی وجود دارد. به‌طور مثال، تن و همکاران از یک روش آستانه‌گذاری تطبیقی^۵ برای استخراج سریع پوشش سیل از تصاویر راداری Sentinel-1 (Tan et al., 2023)، ساهو و همکاران از روش آستانه‌گذاری تک مدی^۶ (Sahoo et al., 1988)، فرهادی و همکاران از ترکیب روش

جای باند NIR قرار داده شده است. باندهای SWIR-1 و سبز به ترتیب معادل با باندهای ۱۱ و ۳ در ماهواره سنتینل-۲ هستند. این شاخص اصلاح‌شده ویژگی‌های آبی را تقویت کرده و به‌طور مؤثر نویز مناطق ساخته‌شده^۱، گیاهان و خاک را کاهش می‌دهد. بنابراین، شاخص مذکور برای بهبود و استخراج اطلاعات آب در مناطقی که پس‌زمینه‌ای از مناطق ساخته‌شده دارند، مناسب‌تر است (Xu, 2006).

۳-۱-۲- شاخص بهبودیافته آب (EWI)

شاخص EWI توسط پی و همکاران (Pei, 2007) در سال ۲۰۰۷ معرفی شد. این شاخص بر اساس امضای طیفی^۲ آب و نویز پس‌زمینه پیشنهاد شده و قادر است به‌طور قابل توجهی جریان آب نیمه‌خشک را از نویز پس‌زمینه جدا کند (Pei, 2007). با بررسی فرآیند ایجاد شاخص EWI، ثابت می‌شود که چه تصویر سنجش از دوری تصحیح جوی شده باشد و چه تصحیح جوی صورت نگرفته باشد، آب سطحی را می‌توان با صحت خوبی استخراج کرد (Han-qiu, 2008). در رابطه شاخص EWI از باندهای انعکاسی سبز، NIR و SWIR استفاده شده است که به ترتیب معادل باندهای ۳، ۸ و ۱۱ در ماهواره سنتینل-۲ هستند.

۳-۱-۳- شاخص آب جدید (NWI)

براساس تحلیل طیفی پهنه‌های آبی و ویژگی‌های پس‌زمینه در تصاویر لندست، مشخص شد که پهنه‌های آبی جذب بالایی در باندهای NIR و MIR دارند. به همین ترتیب شاخص NWI توسط فنگ در سال ۲۰۰۹ (Feng, 2012) ارائه شد. با انتخاب جزیره شیامن^۳ به‌عنوان منطقه مطالعاتی، نتایج آزمایشی روی تصاویر سنجش از دوری تصحیح جوی^۴ شده نشان داد که شاخص NWI می‌تواند به‌طور مؤثر برای استخراج سریع پهنه‌های آبی با صحت بالا استفاده شود (Feng, 2012). در محاسبه شاخص NWI،

1- Built-up Land

2- Spectral Signature

3- Xiamen

4- Atmospherically corrected

5- Adaptive Thresholding

6- Bimodal

و تصاویر ماهواره‌ای حاصل شده از الگوریتم‌های آتسو لبه و آتسو Bmax به‌طور کلی نتایج مورد اطمینان‌تری را نسبت به روش فازی آتسو ارائه می‌کنند (Li et al., 2023). نتیجه هر دو الگوریتم تصویر دودویی^۷ (آب و غیرآب) است ولی این دو الگوریتم از جهت مناطق نمونه‌برداری برای تولید هیستوگرام با یکدیگر تفاوت دارند. روش Edge Otsu برای اولین بار توسط دانچیتز و همکاران با داده‌های راداری ارائه شد (Donchyts et al., 2016). مارکرت و همکاران نشان دادند که برای داده‌های SAR، الگوریتم آتسو لبه به‌خصوص برای نمونه‌برداری از یک هیستوگرام تک‌قله‌ای حساسیت بیشتری نسبت به الگوریتم آتسو Bmax به داده‌های ورودی دارد (Markert et al., 2020). با این حال، هر دو الگوریتم اندازه صحت کلی تقریباً یکسانی دارند و الگوریتم آتسو لبه صحت‌های مناسب و بالایی را حاصل می‌کند (Donchyts et al., 2016). در حالت کلی، الگوریتم آتسو لبه از فیلتر لبه Canny برای شناسایی صحیح پهنه‌های آبی استفاده می‌کند (Canny, 1986). هدف اصلی فیلتر لبه Canny، محدود کردن تعداد پیکسل‌های ورودی هیستوگرام تصویر به آن پیکسل‌هایی است که در نزدیکی لبه‌های زمین و آب قرار دارند. در این فرآیند، ابتدا لبه‌های تصاویر دودویی اولیه با استفاده از فیلتر لبه Canny شناسایی می‌شوند. سپس، لبه‌های کوچک‌تر از یک مقدار مشخص که توسط کاربر تعیین می‌شود (معروف به پارامتر طول لبه)، طی یک فرآیند محدودسازی بر اساس طول حذف می‌شوند. در واقع، اعمال مراحل مذکور می‌تواند شیوه نمونه‌برداری برای تولید هیستوگرام را تغییر دهد. به این ترتیب، فقط لبه‌هایی که طولشان برابر یا بیشتر از مقدار تعریف شده توسط کاربر است، به عنوان لبه‌های معتبر در نظر گرفته می‌شوند. پس از آن، با استفاده از یک فاصله دیگر (معروف به پارامتر بافر لبه)، بافرهایی در اطراف لبه‌های استخراج شده ایجاد شده و سپس پیکسل‌های داخل این بافرها نمونه‌برداری شده و هیستوگرامی از آن‌ها ساخته می‌شود. در مرحله بعد، از هیستوگرام تشکیل شده

آستانه‌گذاری اتسو و تک‌مدی^۱ (Farhadi et al., 2024) استفاده کرده‌اند. همچنین، کاپور و همکاران یک روش جدید برای آستانه‌گذاری تصاویر سطح خاکستری با استفاده از آنتروپی هیستوگرام (Kapur et al., 1985) ارائه داده‌اند. تغییرات فصلی مانند وجود ابر، برف، تغییرات دما و شرایط جوی مختلف، نیازمند اعمال حدود آستانه متفاوتی هستند (Junjie Li et al., 2022). به دلیل محدوده و شرایط محیطی خلیج گرگان، استفاده از یک حد آستانه ثابت نتیجه دقیقی به همراه نخواهد داشت. بنابراین، برای چهار شاخص طیفی مورد مطالعه و تصاویر مربوط به ۲۴ فصل، ۹۶ حد آستانه استخراج شد. تعیین مقادیر دقیق حد آستانه به صورت دستی با استفاده از روش آزمون و خطا، به ویژه در پژوهش‌های دارای محدوده مطالعاتی وسیع و محدوده زمانی طولانی مدت، بسیار پیچیده و زمان‌بر است (Kolli et al., 2022). آتسو روشی خودکار و بدون نظارت به نام آستانه‌گذاری آتسو^۲ برای تعیین حد آستانه و کلاسه‌بندی دودویی تصاویر در سال ۱۹۷۹ ارائه داد (Otsu, 1979). روش آستانه‌گذاری آتسو بر اساس توزیع مقادیر پیکسل‌ها عمل کرده و عملیات بیشینه‌سازی واریانس بین کلاس‌های دوگانه پس‌زمینه^۳ و هدف^۴ را برای به دست آوردن خودکار مقدار حد آستانه انجام می‌دهد (Otsu, 1979). در صورتی که هیستوگرام تصویر از نوع تک‌قله‌ای (یا نزدیک به آن) باشد، الگوریتم آستانه‌گذاری آتسو موفق به تعیین حد آستانه نخواهد شد و در نتیجه صحت طبقه‌بندی نامطلوبی حاصل خواهد شد (Tan et al., 2023). بر این اساس، الگوریتم مذکور در سال‌های اخیر بهبود یافته و در انواع مختلفی مانند الگوریتم‌های خودکار آتسو لبه^۵ (Markert et al., 2020) آتسو Bmax (Cao et al., 2019; Markert et al., 2020) و فازی آتسو^۶ (Rambabu & Nagaraju, 2015) موجود است. در این باره، لی و همکاران در مطالعه‌ای نشان دادند که نقشه‌ها

1- Unimodal Thresholding

2- Otsu Thresholding

3- Background

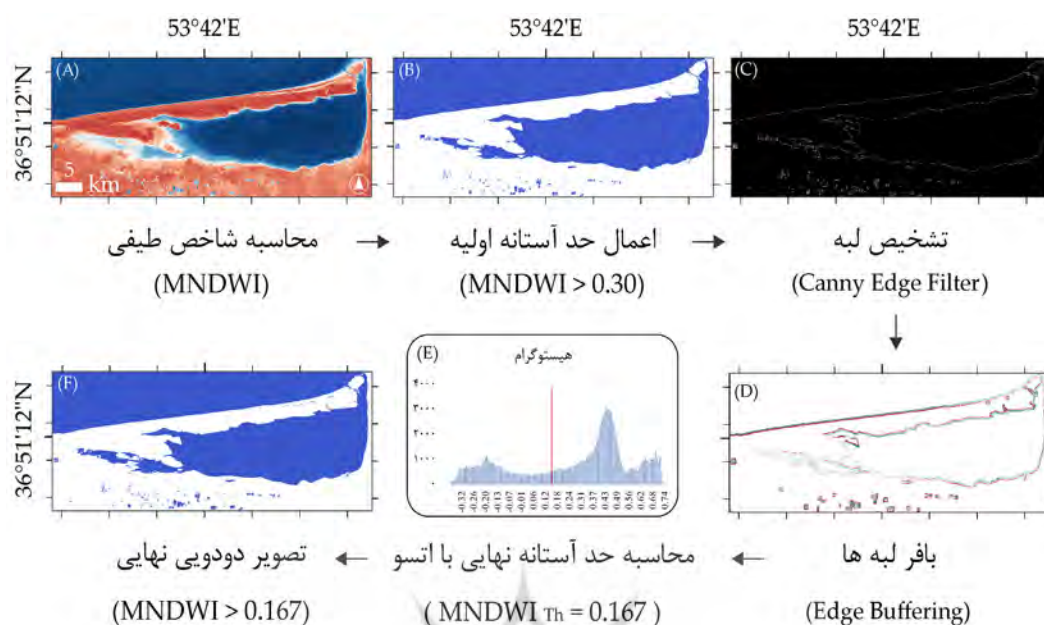
4- Target

5- Edge Otsu

6- Fuzzy Otsu

7- Binary

8- Synthetic Aperture Radar



نگاره ۴: فرآیند استخراج پهنه آبی با استفاده از الگوریتم آتسو لبه و شاخص طیفی MNDWI

صحت نقشه پهنه‌های آبی که از داده‌های سنجش از دوری استخراج شده‌اند، به صورت کیفی و کمی انجام می‌شود. در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی عملکرد و صحت کلاس مربوط به پهنه آبی و سایر کلاس‌ها، چندین معیار ارزیابی صحت به کار گرفته شده است. این معیارها که شامل معیارهای ضریب کاپا (KC)^۱، صحت کاربر (UA)^۲، صحت تولیدکننده (PA)^۳ و صحت کلی (OA)^۴ هستند، از ماتریس ابهام^۵ استخراج شده‌اند. در جدول ۳، معیارهای ارزیابی صحت به همراه معادلات آن‌ها ارائه شده است.

۳-۴- جمع‌آوری نمونه‌های ارزیابی

نمونه‌های ارزیابی صحت مناطق آبی و غیرآبی در منطقه مورد مطالعه به صورت دستی و با رعایت پراکندگی مناسب نقاط (توزیع نرمال) از تصویر RGB میانگین شش ساله سنتینل-۲ اخذ شده‌اند. در مجموع، ۴۴۰ نمونه اعتبارسنجی آبی و غیرآبی در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله

برای محاسبه مقدار آستانه با استفاده از الگوریتم آتسو بهره‌گیری می‌شود. در نهایت، این آستانه بر روی شاخص طیفی اعمال می‌شود؛ به طوری که پیکسل‌هایی با مقادیر کمتر از آستانه به عنوان غیرآب و پیکسل‌هایی با مقادیر بیشتر از آستانه به عنوان آب تشخیص داده می‌شوند (Markert et al., 2020). پارامترهای الگوریتم لبه کنی برای حد آستانه کنی به مقدار ۰/۷ و برای سیگمای کنی به مقدار ۰/۹۹ تنظیم شده است (Donchyts et al., 2016). حدود آستانه اولیه شاخص‌های MNDWI، NWI و EWI به ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۳۵ هستند که به صورت تجربی به دست آمده‌اند. نگاره ۴، یک نمونه از فرآیند استخراج آب توسط الگوریتم آتسو لبه با استفاده از شاخص طیفی MNDWI در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۳-۳- رویکرد ارزیابی صحت

پس از طبقه‌بندی شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با حدود آستانه حاصل از الگوریتم آستانه‌گذاری Edge Otsu، اندازه‌گیری و تحلیل صحت طبقه‌بندی پیکسل‌های آبی و غیرآبی ضروری است. فرآیند ارزیابی صحت برای سنجش

1- Kappa Coefficient

2- User's Accuracy

3- Producers Accuracy

4- Overall Accuracy

5- Confusion Matrix

جدول ۳: روابط معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی صحت

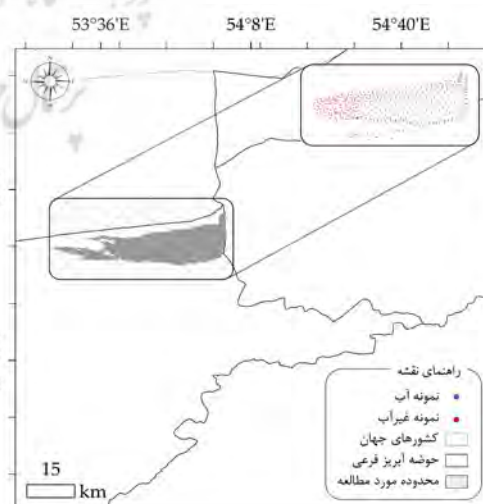
نام معیار	شماره رابطه	مرجع	روابط معیارهای ارزیابی صحت
ضریب کاپا	(۵)	(Rosenfield & Fitzpatrick-Lins, 1986)	$K = \frac{n(TP + TN) - ((TP + FP)(TP + FN) + (FN + TN)(FP + TN))}{n^2 - ((TP + FP)(TP + FN) + (FN + TN)(FP + TN))}$
صحت کاربر	(۶)	(Congalton, 1991)	$UA\% = \frac{TP}{TP + FP}$
صحت کلی	(۷)	(Congalton, 1991)	$OA\% = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$
صحت تولیدکننده	(۸)	(Barsi et al., 2018; Story & Congalton, 1986)	$PA\% = \frac{TP}{TP + FN}$
F1-Score	(۹)	(Goutte & Gaussier, 2005; Van Rijsbergen, 1979)	$F1-Score\% = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN}$

۴- نتایج و بحث

برداشت شده که برای رعایت توازن میان طبقات، ۲۲۰ نمونه مربوط به کلاس آب و ۲۲۰ نمونه مربوط به کلاس غیرآبی هستند. نمونه‌های ارزیابی صحت با توجه به بررسی بصری تصاویر میانگین شش ساله ماهواره سنتینل-۲ (تصاویر رنگی و شاخص‌های طیفی مورد مطالعه) و تصاویر زمان‌مند با کیفیت بالای گوگل ارث اخذ شده‌اند. بنابراین، از نمونه‌های مذکور برای سنجش صحت نتایج حاصل از استخراج پهنه‌های آبی توسط شاخص‌های طیفی و الگوریتم ابتکاری آستانه‌گذاری در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. نگاره ۵ نمونه‌های ارزیابی اخذ شده در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله را نشان می‌دهد.

۴-۱- نتایج تعیین مقادیر حد آستانه

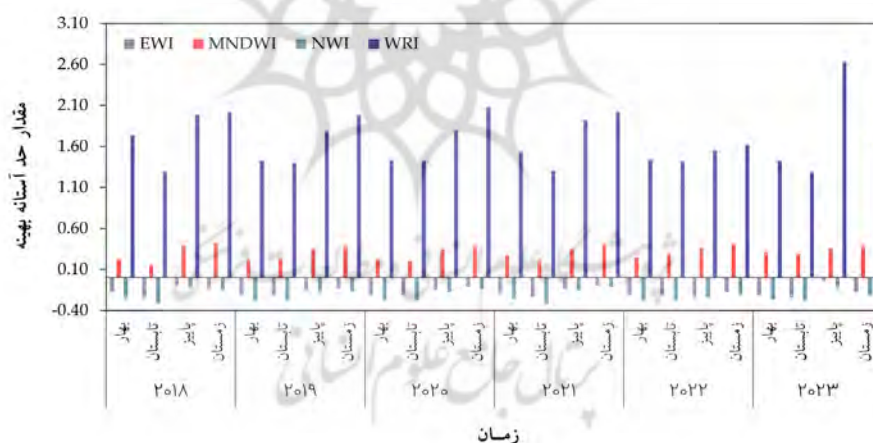
مقادیر آستانه مستخرج از الگوریتم آستانه‌گذاری Edge Otsu در محدوده مورد مطالعه و محدوده زمانی شش سال اخیر به تفکیک فصول سال در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، نگاره ۶ مقادیر موجود در جدول ۴ را به‌منظور سهولت مقایسه مقادیر با یکدیگر به‌صورت بصری ارائه می‌دهد. همانطور که در جدول ۴ و نگاره ۶ نشان داده شده است، حدود آستانه شاخص طیفی WRI همواره برابر یا بالاتر از ۱/۲۹ بوده و بیشینه و کمینه آن به‌ترتیب برابر با ۲/۶۳ (تصویر مربوط به پاییز ۲۰۲۳) و ۱/۲۹ (تصویر مربوط به تابستان ۲۰۲۳) است. مقادیر حدود آستانه بهینه شاخص



نگاره ۵: نمونه‌های ارزیابی صحت در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله

جدول ۴: حدود آستانه بهینه حاصل از الگوریتم آتسو لیه در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله

شاخص طیفی				محدوده زمانی		شاخص طیفی				محدوده زمانی	
EWI	MNDWI	NWI	WRI			EWI	MNDWI	NWI	WRI		
-۰/۱۹	۰/۲۷	-۰/۲۶	۱/۵۴	بهار	۲۰۲۱	-۰/۱۸	۰/۲۲	-۰/۲۵	۱/۷۳	بهار	۲۰۱۸
-۰/۲۴	۰/۱۹	-۰/۳۱	۱/۳۰	تابستان		-۰/۲۴	۰/۱۴	-۰/۳۱	۱/۲۹	تابستان	
-۰/۱۳	۰/۳۵	-۰/۱۶	۱/۹۲	پاییز		-۰/۱۰	۰/۳۹	-۰/۱۲	۱/۹۸	پاییز	
-۰/۱۰	۰/۴۰	-۰/۱۱	۲/۰۲	زمستان		-۰/۱۳	۰/۴۲	-۰/۱۵	۲/۰۱	زمستان	
-۰/۲۱	۰/۲۵	-۰/۲۸	۱/۴۴	بهار	۲۰۲۲	-۰/۲۱	۰/۲۱	-۰/۲۹	۱/۴۳	بهار	۲۰۱۹
-۰/۲۲	۰/۲۹	-۰/۲۸	۱/۴۱	تابستان		-۰/۲۱	۰/۲۳	-۰/۲۸	۱/۴۰	تابستان	
-۰/۲۴	۰/۳۶	-۰/۲۴	۱/۵۵	پاییز		-۰/۱۵	۰/۳۵	-۰/۱۸	۱/۷۹	پاییز	
-۰/۱۷	۰/۴۱	-۰/۲۰	۱/۶۲	زمستان		-۰/۱۳	۰/۳۸	-۰/۱۷	۱/۹۸	زمستان	
-۰/۲۱	۰/۳۱	-۰/۲۷	۱/۴۳	بهار	۲۰۲۳	-۰/۲۱	۰/۲۲	-۰/۲۷	۱/۴۳	بهار	۲۰۲۰
-۰/۲۴	۰/۲۹	-۰/۲۸	۱/۲۹	تابستان		-۰/۲۰	۰/۲۰	-۰/۲۷	۱/۴۳	تابستان	
-۰/۰۴	۰/۳۶	-۰/۱۲	۲/۶۳	پاییز		-۰/۱۴	۰/۳۴	-۰/۱۸	۱/۷۹	پاییز	
-۰/۱۸	۰/۳۸	-۰/۲۱	۱/۶۶	زمستان		-۰/۱۱	۰/۳۸	-۰/۱۴	۲/۰۸	زمستان	



نگاره ۶: مقادیر آستانه مستخرج از الگوریتم آستانه گذاری Edge Otsu در منطقه مورد مطالعه

محدوده زمانی مورد مطالعه را رقم زده است. حدود آستانه بهینه شاخص طیفی NWI همواره منفی بوده و در محدوده -۰/۱۱ و -۰/۳۱ قرار دارند. ترتیب صعودی به نزولی مقادیر آستانه بهینه این شاخص (به جز سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ که به ترتیب، پاییز، زمستان، بهار و تابستان است) به صورت زمستان، پاییز، بهار، تابستان است. علاوه بر این، حدود

طیفی WRI همواره (از بزرگ به کوچک) مربوط به تصاویر فصل زمستان، پاییز، بهار و تابستان است ولی این مورد در سال ۲۰۲۳ به پاییز، زمستان، بهار و تابستان تغییر یافته است. همچنین در تصاویر مربوط به پاییز ۲۰۲۳، مقدار حد آستانه بهینه WRI بسیار بالاتر از تصاویر مربوط به زمستان این سال بوده و در کل بیشترین مقدار حد آستانه در کل

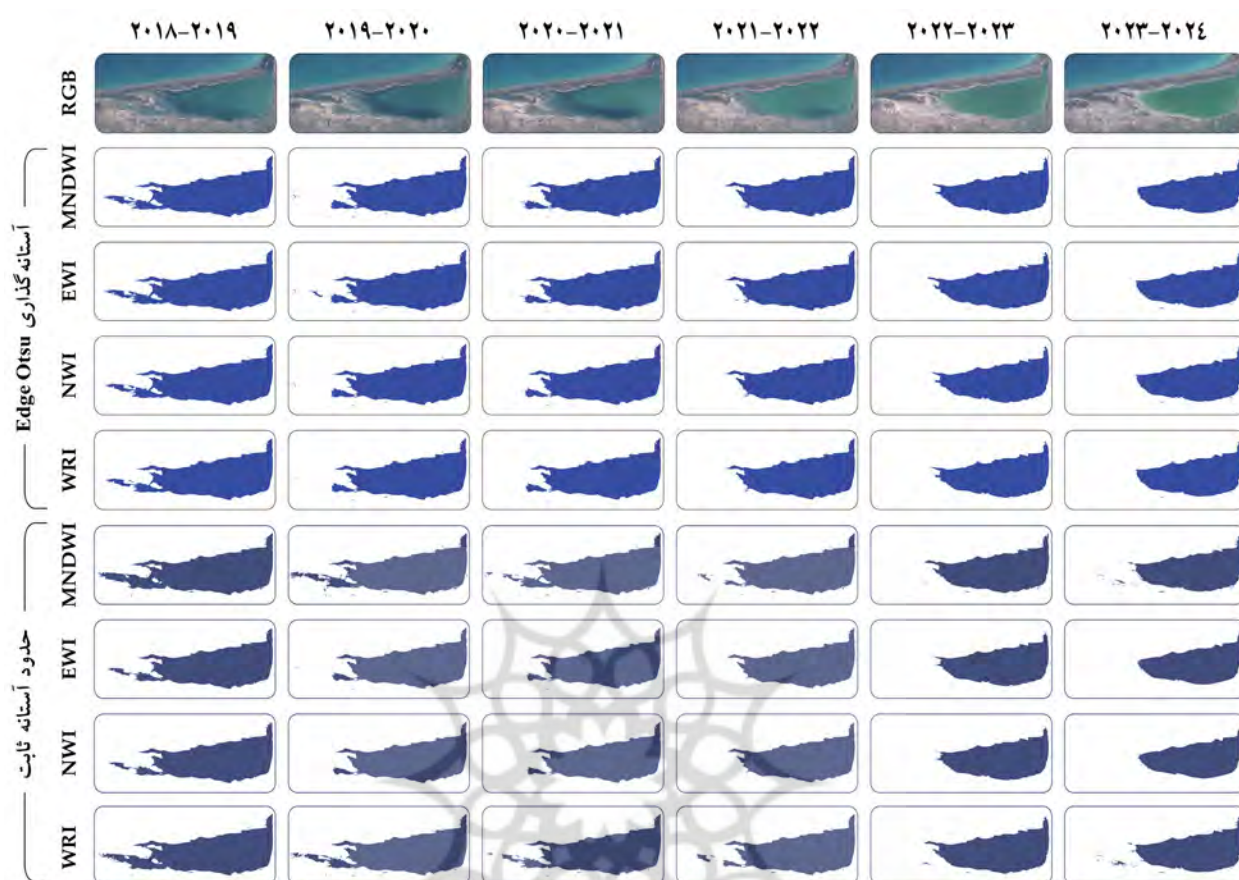
تعیین و تنظیم دستی یک آستانه برای تمام شاخص‌ها در تمام زمان‌ها منجر به شناسایی و استخراج اشتباه پهنه آبی خواهد شد.

۴-۲- ارزیابی کیفی صحت

به منظور ارزیابی کیفی و بررسی عملکرد چارچوب پیشنهادی در استخراج تغییرات آب سطحی خلیج گرگان و تالاب میانکاله طی شش سال اخیر، نتایج پهنه‌های آبی استخراج شده توسط شاخص‌های طیفی مختلف در نگاره ۷ ارائه شده است. بر اساس نگاره ۷، خلیج گرگان از آغاز دوره مطالعاتی (ابتدای بهار ۲۰۱۸) تا انتهای دوره مطالعاتی (ابتدای بهار ۲۰۲۴) تغییراتی کاهشی را تجربه کرده و بیشترین مساحت آب سطحی خود را در تابستان ۲۰۱۸ و کمترین را در تابستان ۲۰۲۳ ثبت کرده است. همچنین، بیشترین تغییرات در کاهش مساحت آب مربوط به ناحیه غرب این خلیج (تالاب میانکاله) است. در طی شش سال اخیر، آب سطحی موجود در تالاب میانکاله به قدری کاهش مساحت پیدا کرده که می‌توان گفت این تالاب تقریباً خشک شده است. لازم به ذکر است که پهنه آبی استخراج شده در شرایط استفاده از حدود آستانه بهینه با روش Edge Otsu، در مقایسه با حالت استفاده از حدود آستانه پیش فرض، از پایداری و نزدیکی مقادیر بالاتری برخوردار است. به منظور سهولت بررسی و مقایسه نتایج آستانه‌گذاری Edge Otsu و حدود آستانه پیش فرض (ثابت)، لازم بود محدوده‌ای که بیشترین تغییرات را دارد (تالاب میانکاله) به صورت جداگانه بزرگ‌نمایی شده و مورد بررسی قرار بگیرد. در همین جهت، نگاره ۸ تصاویر دودویی مستخرج از تصاویر میانگین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ شاخص‌های طیفی NWI، EWI، MNDWI و WRI در محدوده تالاب میانکاله را با استفاده از روش آستانه‌گذاری Edge Otsu و حدود آستانه ثابت ارائه می‌کند.

آستانه بهینه شاخص طیفی MNDWI در محدوده ۰/۱۴ و ۰/۴۲ قرار دارند.

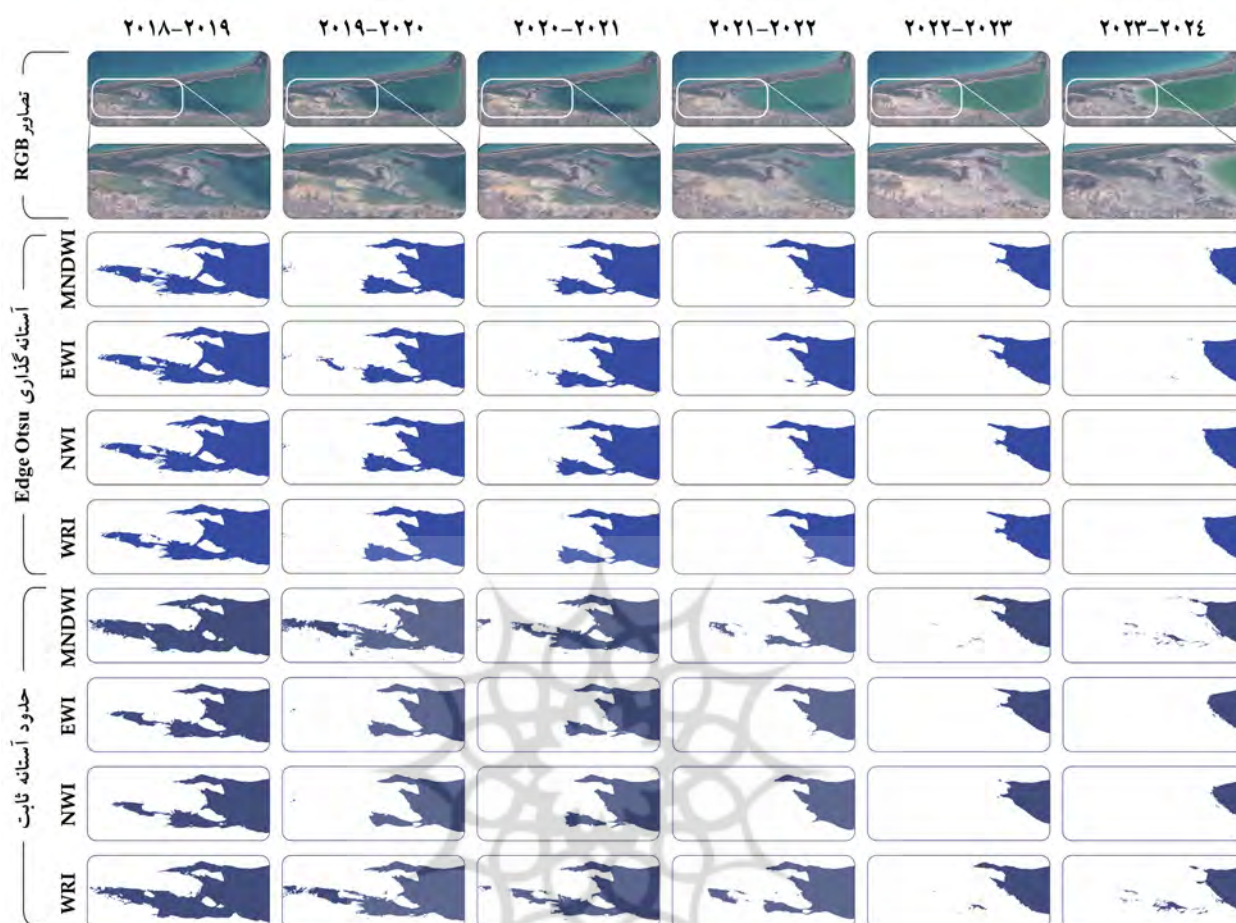
در میان حدود آستانه بهینه این شاخص، تصاویر مربوط به فصول زمستان، پاییز، بهار و تابستان همواره به ترتیب بزرگ‌ترین تا کوچک‌ترین حدود آستانه را ثبت کرده‌اند، ولی در تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ ترتیب فصول تابستان و بهار جابه‌جا شده است. همچنین، حدود آستانه مستخرج از شاخص طیفی EWI مانند شاخص NWI همواره حاوی مقادیر منفی بوده و میان ۰/۲۴- و ۰/۰۴- قرار دارند. تفاوت ترتیب مقادیر آستانه هر فصل در شاخص EWI نسبت به شاخص‌های مطالعاتی دیگر بیشتر است. به صورتی که شاخص‌های مربوط به فصول پاییز و زمستان در اکثر سال‌های مورد مطالعه، مقادیر بالاتری از دیگر فصول دارند. به جز شاخص‌های مربوط به پاییز سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳، همواره فصل زمستان عدد آستانه بهینه بزرگ‌تری دارد. در حدود آستانه بهینه شاخص EWI، فصول بهار و تابستان اغلب به عنوان سومین و چهارمین فصول به ترتیب بزرگی حدود آستانه بوده ولی این مسئله در سال ۲۰۲۲ به طور کلی نقض شده و ترتیب به صورت زمستان، بهار، تابستان، پاییز خواهد بود. به این ترتیب، تصاویر مربوط به فصول پاییز و زمستان در اغلب شاخص‌ها عدد آستانه بالاتری نسبت به تصاویر مربوط به فصول بهار و تابستان دارند. لازم به ذکر است که انحراف معیار حدود آستانه بهینه مستخرج از شاخص‌های WRI، NWI، MNDWI و EWI به ترتیب برابر با ۰/۳۲، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۰۵ هستند. این مسئله نشان‌دهنده انحراف نسبتاً بالاتر مقادیر آستانه شاخص طیفی WRI نسبت به دیگر شاخص‌های مطالعاتی است که در نگاره ۶ نیز کاملاً مشهود است. بنابراین، نتایج حاصل از مقایسه مقادیر آستانه مربوط به شاخص‌های طیفی متفاوت در فصل‌های مختلف در بازه زمانی شش ساله، نشان‌دهنده تأثیر تغییرات فصلی و محیطی بر روی مقدار دقیق آستانه است. همچنین، به واسطه تفاوت فاحش مقادیر آستانه برای شاخص‌های مورد مطالعه در طول زمان،



نگاره ۷: نقشه پهنه آبی تهیه شده از شاخص‌های طیفی MNDWI و WRI و EWI و NWI با استفاده از روش آستانه‌گذاری Edge Otsu و حدود آستانه ثابت

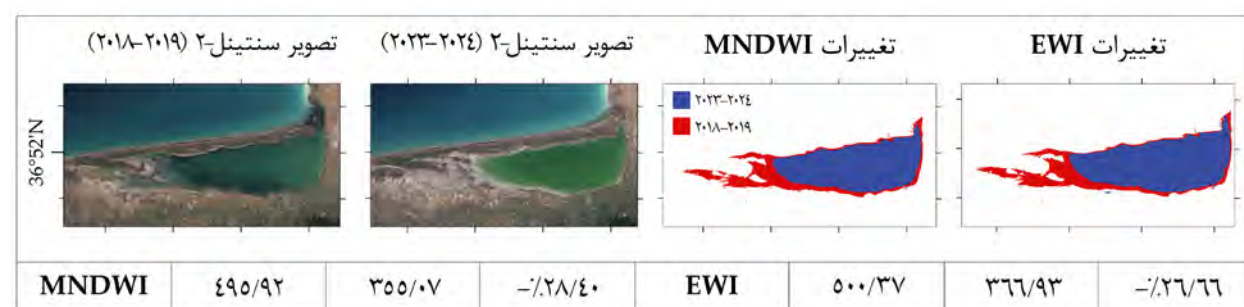
با توجه به نگاره ۸، در سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹، محدوده مطالعاتی از وضعیت مطلوبی برخوردار بوده است. به‌طوری که تمامی شاخص‌های طیفی از حضور آب سطحی در این تالاب خبر می‌دهند. همچنین، در این سال و در حالت استفاده از آستانه‌های ثابت، شاخص MNDWI بیشترین مساحت از پهنه آبی را استخراج کرده است. در حالت کلی، نتایج استخراج آب با به‌کارگیری حدود آستانه بهینه در مقایسه با شرایط اعمال حدود آستانه ثابت، نزدیک‌تر به یکدیگر بوده و مقادیر آن (بالعکس نتایج اعمال حدود آستانه ثابت)، تفاوت‌های بسیار بالایی ندارند. همچنین، در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ و ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نیز شرایط مشابهی حاکم بوده و شاخص‌های طیفی MNDWI و WRI مساحت‌های بالاتری را استخراج کرده‌اند. علاوه بر این، در

در هر دو حالت آستانه‌گذاری، وضعیت پایدار و تقریباً یکسان بوده و عمده تغییرات مربوط به قسمت شمال-غرب خلیج گرگان هستند. همانطور که در نگاره ۹ نشان داده شده است، در تصویر مربوط به سال آخر (۲۰۲۳-۲۰۲۴)، شاخص MNDWI و WRI در حالت اعمال آستانه ثابت، عملکرد مطلوبی ارائه نکرده و برخی مناطق غیر آبی به اشتباه به کلاس آبی اختصاص داده شده‌اند. این در حالی است که پهنه‌های آبی استخراج شده در کل بازه زمانی توسط اعمال آستانه بهینه از صحت بسیار بالایی برخوردار است. بنابراین، به‌کارگیری روش آتسو لبه منجر به افزایش صحت‌شناسایی پهنه‌های آبی در این منطقه مورد مطالعه شده است.



نگاره ۸: عملکرد شاخص‌های طیفی NWI، EWI، MNDWI و WRI برای استخراج پهنه‌های آبی در محدوده تالاب میانکاله با استفاده از روش آستانه‌گذاری Edge Otsu و حدود آستانه ثابت

نگاره ۹ نقشه تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان و تالاب میانکاله استخراج شده از تصویر میانگین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. تغییرات کاهشی چشم‌گیر و قابل توجه مساحت آب سطحی خلیج گرگان و به خصوص تالاب میانکاله در نگاره ۹ به وضوح قابل مشاهده است.



نگاره ۹: نقشه تغییرات پهنه آبی خلیج گرگان و تالاب میانکاله در بازه زمانی میانگین ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۲۳-۲۰۲۴

۳-۴- ارزیابی کمی صحت

نتایج ارزیابی صحت مربوط به استخراج آب سطحی در خلیج گرگان و تالاب میانکاله توسط شاخص‌های طیفی و با استفاده از حدود آستانه بهینه Edge Otsu و حدود آستانه پیش‌فرض به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. در جداول مذکور، مقادیر بیشینه و کمینه صحت کلی و ضریب کاپا نیز به صورت بارز نشان داده شده‌اند.

با توجه به جدول ۵، با استفاده از حدود آستانه بهینه، در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله، شاخص طیفی WRI با صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۹ بیشترین و شاخص طیفی MNDWI با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ کمترین صحت را کسب کرده‌اند. شاخص‌های طیفی NWI و EWI علاوه بر اینکه مساحت‌های مشابهی را استخراج می‌کنند، صحت‌های کلی (۹۸ درصد) و ضرایب کاپای (۰/۹۷) مشابهی را نیز کسب کرده‌اند و به همین دلیل می‌توانند به جای یکدیگر مورد استفاده قرار بگیرند. از طرفی، در حالت اعمال حدود آستانه پیش‌فرض (جدول

۶)، شرایط برای شاخص طیفی NWI کاملاً تغییر کرده و این شاخص با صحت کلی ۸۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۵ کمترین صحت را کسب کرده‌است. بنابراین، شاخص طیفی NWI در حالت استفاده از حد آستانه بهینه برخلاف حد آستانه پیش‌فرض، عملکرد مطلوبی برای استخراج پهنه آبی ارائه داده است. همچنین، شاخص طیفی WRI که در شرایط اعمال حدود آستانه بهینه بهترین عملکرد را داشت، در شرایط اعمال حدود آستانه پیش‌فرض نیز از بالاترین صحت کلی (۹۴ درصد) و ضریب کاپا (۰/۸۸) برخوردار است. وضعیت تبادلی و نزدیکی بالای صحت‌های کلی و ضرایب کاپا در شرایط اعمال حدود آستانه پیش‌فرض نیز برای شاخص‌های طیفی NWI و EWI به ترتیب با صحت‌های کلی ۸۳ و ۸۵ درصد و ضرایب کاپای ۰/۶۵ و ۰/۷۰ پابرجاست.

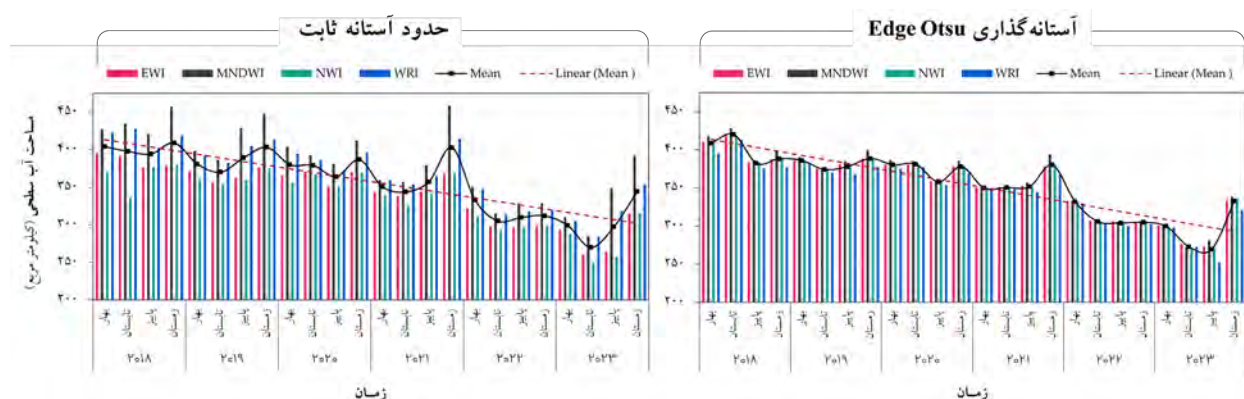
در مقایسه با روش‌های اخیر استخراج آب، الگوریتم Edge Otsu که با استفاده از الگوریتم Canny Edge ایجاد شده است، مزایای ویژه‌ای را در پهنه‌های آبی پیچیده و

جدول ۵: نتایج ارزیابی صحت پهنه‌های آبی استخراج‌شده توسط شاخص‌های طیفی (با استفاده از حدود آستانه بهینه Edge Otsu)

MNDWI		EWI		NWI		WRI		خلیج گرگان و تالاب میانکاله
غیر آب	آب	غیر آب	آب	غیر آب	آب	غیر آب	آب	
۹۹	۹۶	۹۹	۹۸	۹۹	۹۸	۹۹	۱۰۰	PA (%)
۹۶	۹۹	۹۸	۹۹	۹۸	۹۹	۱۰۰	۹۹	UA (%)
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	۹۹	۹۹	F1-Score (%)
۹۸		۹۸		۹۸		۹۹		OA (%)
۰/۹۶		۰/۹۷		۰/۹۷		۰/۹۹		KC

جدول ۶: نتایج ارزیابی صحت پهنه‌های آبی استخراج‌شده توسط شاخص‌های طیفی (با استفاده از حدود آستانه پیش‌فرض)

MNDWI		EWI		NWI		WRI		خلیج گرگان و تالاب میانکاله
غیر آب	آب	غیر آب	آب	غیر آب	آب	غیر آب	آب	
۱۰۰	۸۱	۷۰	۱۰۰	۶۵	۱۰۰	۱۰۰	۸۸	PA (%)
۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۷۷	۱۰۰	۷۴	۸۹	۱۰۰	UA (%)
۹۱	۹۰	۸۳	۸۷	۷۹	۸۵	۹۴	۹۳	F1-Score (%)
۹۰		۸۵		۸۳		۹۴		OA (%)
۰/۸۱		۰/۷۰		۰/۶۵		۰/۸۸		KC



نگاره ۱۰: مساحت آب سطحی محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله استخراج‌شده توسط شاخص‌های طیفی با استفاده از آستانه‌گذاری Edge Otsu و حدود آستانه ثابت

مطالعه را در طی شش سال اخیر (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴) به تفکیک فصل و با استفاده از شاخص‌های طیفی EWI، MNDWI، NWI و WRI را نمایش می‌دهد. در نگاره ۱۰، مساحت‌ها با استفاده از روش آستانه‌گذاری ابتکاری Edge Otsu و همچنین حدود آستانه ثابت و پیش‌فرض استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است که برای شاخص‌های طیفی MNDWI، EWI و NWI، به ترتیب حدود آستانه پیش‌فرض صفر و برای شاخص طیفی WRI حد آستانه ۱ (به صورت تجربی) در نظر گرفته شده است. در نهایت، مقادیر مستخرج از حدود آستانه بهینه با روش Edge Otsu به دلیل خودکار و ابتکاری بودن، بسیار پایدار و منطقی‌تر از روش حدود آستانه پیش‌فرض است. بنابراین، این مسئله باعث می‌شود که روش تعیین حدود آستانه به روش Edge Otsu به عنوان روشی مناسب‌تر در استخراج پهنه‌های آبی از شاخص‌های طیفی انتخاب شود.

با توجه به نگاره ۱۰، در هر دو روش مورد بررسی به وضوح مشاهده می‌شود که وضعیت تغییرات کلی مساحت آب سطحی خلیج گرگان و تالاب میانکاله در شش سال اخیر (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴) نزولی بوده و نشان‌دهنده یک وضعیت کاهش است. این تغییرات کاهش در زمستان ۲۰۲۳ به میزان چشم‌گیر و قابل توجهی بهبود یافته و افزایش مساحت پهنه آبی را در پیش گرفته است. همچنین،

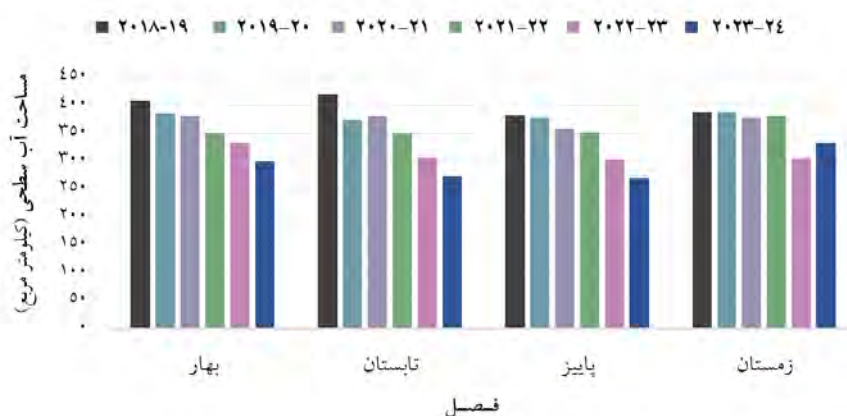
متغیری مانند خلیج گرگان و تالاب میانکاله نشان می‌دهد. روش‌های MTWDR (Yang & Hong, 2024) و MFTSA (Guo et al., 2023) که برای محیط‌های پرنویز نظیر مناطق کوهستانی یا پهنه‌های کوچک آبی طراحی شده‌اند، به ترتیب به صحتی بین ۹۴/۰۸٪ تا ۹۸/۱۴٪ دست یافتند. همچنین، روش TWI (W. Tang et al., 2022) که برای شرایط خاصی همچون خطوط ساحلی گل‌آلود طراحی شده است به صحتی تا ۸۴٪ دست یافته است. در مقابل، الگوریتم Edge Otsu، با دستیابی به صحت کلی ۹۹٪ و ضریب کاپا ۰/۹۹، نه تنها صحت بالایی را نشان می‌دهد، بلکه در کنترل تأثیر عوامل مزاحم تصویر نوری، تغییرات فصلی و انواع مختلف پهنه‌های آبی در مناطق ساحلی و تالابی، قابلیت اطمینان و تطبیق‌پذیری بالایی را نشان می‌دهد.

۴-۴- بررسی تغییرات مساحت پهنه‌های آبی

در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی و بررسی آماری تغییرات مساحت محدوده مورد مطالعه طی شش سال اخیر، تصاویر میانگین مربوط به ۲۴ فصل از ماهواره سنتینل-۲ به کار گرفته شد.

نگاره ۱۰، مساحت پهنه‌های آبی مربوط به منطقه مورد

- 1- Multiple Threshold Water Detection Rule
- 2- Multi-Index Fusion Threshold Segmentation Algorithm
- 3- Improved Water Index



نگاره ۱۱: مساحت آب سطحی خلیج گرگان و تالاب میانکاله به تفکیک فصول

۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۴ به ترتیب معادل با ۴/۵۵٪، ۱/۹۲٪، ۴/۳۲٪، ۱۲/۹۴٪ و ۵/۷۸٪ هستند. با توجه به نتایج مذکور، شدیدترین و قابل توجه ترین کاهش در مساحت پهنه آبی بین بازه زمانی ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ مشاهده می شود. شاخص طیفی WRI در اغلب موارد کمترین و شاخص طیفی MNDWI نیز در بیشتر فصل ها بیشترین مساحت از پهنه آبی را استخراج کرده است؛ همان طور که انتظار می رود، به دلیل این که شاخص طیفی MNDWI ویژگی های آبی را تقویت می کند، این شاخص در اکثر فصول مساحت بیشتری را نسبت به شاخص های دیگر استخراج کرده است (Xu, 2006). نتایج حاصل از استخراج پهنه آبی توسط شاخص های طیفی NWI و EWI در اکثر موارد نزدیک به یکدیگر بوده و این دو شاخص طیفی می توانند به صورت متبادل پذیر^۱ استفاده شوند.

با توجه به نگاره ۱۰، با مقایسه نتایج حاصل از اعمال حدود آستانه ثابت و آستانه گذاری Edge Otsu برای استخراج پهنه آبی، می توان دریافت که انتخاب آستانه بهینه به جای آستانه پیش فرض، تأثیر قابل توجهی در استخراج صحیح مساحت پهنه های آبی دارد. همان طور که در نگاره ۱۰ نشان داده شده است، نتایج مساحت های پهنه آبی مستخرج از شاخص طیفی MNDWI توسط دو روش آستانه گذاری بهینه و ثابت بسیار متفاوت هستند. شاخص MNDWI که در

پاییز ۲۰۲۳ با مساحت ۲۶۹/۶۲ کیلومتر مربع و تابستان ۲۰۱۸ با مساحت ۴۱۹/۹۸ کیلومتر مربع، به ترتیب کمترین و بیشترین مساحت های آب سطحی در منطقه مورد مطالعه و در محدوده زمانی شش سال اخیر را ثبت کرده اند. نگاره ۱۱ مساحت آب سطحی محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله را به تفکیک فصول نشان می دهد.

مساحت پهنه آبی براساس میانگین مقادیر فصلی حاصل از چهار شاخص طیفی در هر سال محاسبه شده است. به این ترتیب، برای هر یک از چهار شاخص طیفی، مساحت های فصلی (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) در هر سال محاسبه و سپس مجموع این مقادیر به دست آمده و از این مجموع، یک مقدار میانگین سالانه استخراج شده است. به عنوان نمونه، برای شاخص WRI، مساحت پهنه های آبی فصول مختلف سال ۲۰۱۸ محاسبه و سپس این مقادیر با یکدیگر جمع شده اند تا میانگین سالانه شاخص WRI برای آن سال به دست آید. این روند برای تمامی شاخص ها و سال ها تکرار شده و مقادیر میانگین سالانه به عنوان مبنای تحلیل تغییرات سالانه مورد استفاده قرار گرفته اند. براساس نتایج حاصل، میانگین مساحت پهنه آبی خلیج گرگان و تالاب میانکاله در این دوره شش ساله به ترتیب برابر با ۲۹۳/۷۳، ۳۸۱/۵۲، ۳۷۴/۱۸، ۳۵۷/۹۹، ۳۱۱/۶۳ و ۲۹۳/۶۰ کیلومتر مربع ثبت شده است. با بررسی نتایج می توان دریافت که تغییرات سالانه مساحت آب سطحی از سال

1- Interchangeable

در روش آستانه‌گذاری Edge Otsu مساحت‌های تقریباً نزدیک و کمی بالاتر از دیگر شاخص‌های طیفی استخراج می‌کرد، در روش آستانه‌گذاری پیش‌فرض، مساحت‌هایی بسیار بالاتر و متفاوت‌تری را نشان می‌دهد. همچنین، شاخص WRI نیز در روش حدود آستانه ثابت مساحت‌های بسیار بالاتری را نسبت به روش Edge Otsu ارائه می‌کند. مقادیر ارائه‌شده توسط شاخص‌های WRI و MNDWI در شرایط اعمال حدود آستانه ثابت، نسبت به شرایط اعمال حدود آستانه بهینه، بسیار نزدیک‌تر به یکدیگر هستند. شاخص‌های طیفی EWI و NWI در شرایط اعمال حدود آستانه ثابت نیز نتایج نزدیک به یکدیگر را ارائه می‌کنند؛ این مسئله بیان‌گر همبستگی و ویژگی‌های این دو شاخص طیفی است.

۵- نتیجه‌گیری

خلیج گرگان یکی از مهم‌ترین و ارزشمندترین پهنه‌های آبی موجود در حوضه دریای خزر و ایران به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، خلیج گرگان و تالاب میانکاله که در غرب آن قرار دارد، با بحران‌های خشکسالی و کاهش آب شدید مواجه شده‌اند. این مسئله اهمیت پایش مستمر و صحیح این پهنه آبی را برجسته‌تر کرده است. بنابراین، مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های سنتینل-۲ به صورت سری زمانی از سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ (به تفکیک فصل) به بررسی رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی با به کارگیری آستانه‌گذاری خودکار آتسو با روش جدید آتسو لبه می‌پردازد. پیاده‌سازی روش پیشنهادی در تحقیق حاضر به دلیل تسریع در فرآیند محاسبات در محیط سامانه گوگل ارث انجین انجام گرفته است. به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی، پس از انجام پیش‌پردازش ضروری بر روی تصاویر سنتینل-۲ و حذف پیکسل‌های نامطلوب (مانند ابر و برف)، شاخص‌های طیفی مختلف مربوط به بازه زمانی مورد نظر محاسبه شده و سپس الگوریتم آتسو لبه اعمال شد. پس از اعمال حدود آستانه بهینه، پهنه‌های آبی موجود در منطقه مورد مطالعه با صحت بالایی استخراج شدند.

در تحقیق حاضر، پهنه‌های آبی استخراج‌شده توسط روش پیشنهادی به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. ارزیابی صحت به صورت کمی با معیارهای OA، UA، PA، KC و F1-Score حاصل از ماتریس ابهام صورت گرفته و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج ارزیابی کمی صحت استخراج پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی مختلف نشان داد که شاخص طیفی WRI با صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۹ بیشترین صحت و شاخص MNDWI با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۶ کمترین صحت را در حالت استفاده از حدود آستانه بهینه ثبت کرده‌اند. همچنین، در شرایط اعمال حدود آستانه پیش‌فرض، شاخص‌های طیفی WRI و NWI به ترتیب با صحت‌های کلی ۹۴ درصد و ۸۶ درصد و ضرایب کاپای ۰/۸۸ و ۰/۶۵ بیشترین و کمترین صحت‌ها را ثبت کرده‌اند. براساس نتایج ارزیابی صحت، شاخص‌های طیفی NWI و EWI به ترتیب با صحت‌های کلی ۹۸ درصد (در شرایط اعمال حدود آستانه بهینه) و ۸۳ و ۸۵ درصد (در شرایط اعمال حدود آستانه پیش‌فرض) می‌توانند به صورت متبادل پذیر مورد استفاده قرار بگیرند. نتایج حاصل از استخراج پهنه‌های آبی حاکی از تأثیر مقادیر آستانه تعیین‌شده با استفاده از الگوریتم ابتکاری آتسو لبه در افزایش قابل توجه میزان صحت است. علاوه بر این، مساحت پهنه‌های آبی و نرخ تغییرات در منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی وضعیت مساحت آب سطحی در منطقه مورد مطالعه، نشان‌دهنده تغییرات نزولی بوده و این تغییرات در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ به طور قابل توجهی تشدید شده‌اند. میانگین سالانه مساحت پهنه آبی در بازه زمانی شش ساله به ترتیب برابر با ۳۹۹/۷۳، ۳۸۱/۵۲، ۳۷۴/۱۸، ۳۵۷/۹۹، ۳۱۱/۶۳، ۲۹۳/۶۰ کیلومتر مربع برآورد شد. همچنین، نرخ تغییرات سالانه در این بازه زمانی به ترتیب معادل با ۴/۵۵-٪، ۱۹/۹۲-٪، ۴/۳۲-٪، ۱۲/۹۴-٪ و ۵/۷۸-٪ ثبت شده است. بررسی بصری نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش در گستره پهنه آبی، مربوط به محدوده تالاب میانکاله است.

References

- 1- Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors (Basel)*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/s18082580>
- 2- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- 3- Amini, A., Harami, R., Lahijani, H., & Mahboubi, A. (2012). Holocene Sedimentation Rate in Gorgan Bay and Adjacent Coasts in Southeast of Caspian Sea. *Journal of Basic and Applied scientific Research*, 2, 289-297.
- 4- Barsi, A., Kugler, Z., László, I., Szabó, G., & Abdulmuttalib, H. (2018). ACCURACY DIMENSIONS IN REMOTE SENSING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3, 61-67. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-61-2018>
- 5- Bhangale, U., More, S., Shaikh, T., Patil, S., & More, N. (2020). Analysis of Surface Water Resources Using Sentinel-2 Imagery. *Procedia Computer Science*, 171, 2645-2654. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.287>
- 6- Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6), 679-698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
- 7- Cao, H., Zhang, H., Wang, C., & Zhang, B. (2019). Operational flood detection using Sentinel-1 SAR data over large areas. *Water*, 11(4), 786.
- 8- Chen, Y., Xu, Y., & Zhou, K. (2022). The spatial stress of urban land expansion on the water environment of the Yangtze River Delta in China. *Scientific Reports*, 12(1), 17011. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21037-2>
- 9- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data.

با توجه به نتایج حاصل، پاییز ۲۰۲۳ کمترین و تابستان ۲۰۱۸ بیشترین مساحت از آب سطحی را ثبت کرده‌اند. از مهم‌ترین ویژگی‌های تحقیق حاضر می‌توان به بهره‌گیری از شاخص‌های طیفی پرکاربرد در زمینه استخراج پهنه‌های آبی اشاره کرد. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم ابتکاری آستانه‌گذاری آتسو لبه در محدوده خلیج گرگان و تالاب میانکاله از مهم‌ترین مزایای تحقیق حاضر بود. همچنین، بررسی تغییرات پهنه آبی به صورت سری زمانی شش ساله و به تفکیک فصول مختلف با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، از دیگر مزایای تحقیق حاضر به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی در پایش تغییرات پهنه‌های آبی خلیج گرگان و تالاب میانکاله مواجه است. نخست، کمبود تصاویر با کیفیت و تأثیرات جوئی، مانند ابر و سایه، صحت ارزیابی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود اغلب پژوهش‌ها به بررسی سالانه بسنده کنند. همچنین، استفاده از شاخص‌های طیفی غیرمرسوم و انطباق آن‌ها با شرایط نوری و فصلی پیچیده است و نیاز به آستانه‌گذاری دقیق‌تر برای دستیابی به صحت بالا دارد. فرایند پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای کاهش عوامل مزاحم و تعیین پارامتر اولیه شاخص‌های طیفی غیرمرسوم زمان‌بر و چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، استفاده از آستانه ثابت در مناطق کم‌عمق خطای تشخیص پهنه آبی را افزایش می‌دهد. با این حال، الگوریتم آتسو لبه به علت پویایی زمانی-مکانی خود به عنوان یک راه‌حل نوآورانه می‌تواند صحت استخراج را بهبود بخشد و مدیریت منابع آبی را تسهیل کند. مطالعات آینده می‌توانند با ادغام رویکرد مبتنی بر شاخص‌های طیفی و مدل‌های یادگیری ماشین، تشخیص پهنه‌های آبی را بهبود داده و سطح اتوماسیون پردازش را افزایش دهند.

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

- Extraction of Water Bodies Using Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Technology and Application*, 24, 167-171.
- 19- Gharibreza, M., Nasrollahi, A., Afshar, A., Amini, A., & Eisaei, H. (2018). Evolutionary trend of the Gorgan Bay (southeastern Caspian Sea) during and post the last Caspian Sea level rise. *CATENA*, 166, 339-348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.016>
- 20- Goutte, C., & Gaussier, E. (2005, 2005/). A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-Score, with Implication for Evaluation. *Advances in Information Retrieval*, Berlin, Heidelberg.
- 21- Guo, J., Wang, X., Liu, B., Liu, K., Zhang, Y., & Wang, C. (2023). Remote-Sensing Extraction of Small Water Bodies on the Loess Plateau. *Water*, 15(5), 866. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/5/866>
- 22- Guo, T., Li, R., Xiao, Z., Cai, P., Guo, J., Fu, H., Zhang, X., & Song, X. (2024). The Divergent Changes in Surface Water Area after the South-to-North Water Diversion Project in China. *Remote Sensing*, 16(2), 378. <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/2/378>
- 23- Habibi, M., Babaeian, I., & Schöner, W. (2021). Changing Causes of Drought in the Urmia Lake Basin—Increasing Influence of Evaporation and Disappearing Snow Cover. *Water*, 13(22).
- 24- Han-qiu, X. (2008). Comment on the Enhanced Water Index(EWI):A Discussion on the Creation of a Water Index. *Geo-information Science*.
- 25- Huang, D., Xu, L., Zou, S., Liu, B., Li, H., Pu, L., & Chi, H. (2024). Mapping Paddy Rice in Rice–Wetland Coexistence Zone by Integrating Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. *Agriculture*, 14(3).
- 26- Jin, H., Fang, S., & Chen, C. (2023). Mapping of the Spatial Scope and Water Quality of Surface Water Based on the Google Earth Engine Cloud Platform and Landsat Time Series. *Remote Sensing*, 15(20), 4986. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/20/4986>
- 27- Kapur, J. N., Sahoo, P. K., & Wong, A. K. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics, and image processing*, 29(3), 273-285.
- 28- Khoshravan, H., Alinejad-Tabrizi, T., & Naqinezhad, Remote Sensing of Environment, 37(1), 35-46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- 10- Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., & Van de Giesen, N. (2016). A 30 m Resolution Surface Water Mask Including Estimation of Positional and Thematic Differences Using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A Case Study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing*, 8(5).
- 11- European Space, A. (2022). Sentinel-2 MSI Level-1C TOA Reflectance (European Space Agency. https://doi.org/10.5270/s2_-742ikth
- 12- Farhadi, H., Ebadi, H., & Kiani, A. (2023). F2BFE: development of feature-based building footprint extraction by remote sensing data and GEE. *International Journal of Remote Sensing*, 44(19), 5845-5875. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2255351>
- 13- Farhadi, H., Ebadi, H., Kiani, A., & Asgary, A. (2024). A novel flood/water extraction index (FWEI) for identifying water and flooded areas using sentinel-2 visible and near-infrared spectral bands. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(5), 1873-1895. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02660-z>
- 14- Farhadi, H., Esmaeily, A., & Najafzadeh, M. (2022). Flood monitoring by integration of Remote Sensing technique and Multi-Criteria Decision Making method. *Computers & Geosciences*, 160, 105045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105045>
- 15- Farhadi, H., Managhebi, T., & Ebadi, H. (2022). Buildings extraction in urban areas based on the radar and optical time series data using Google Earth Engine. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(120), 43-63. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.251053>
- 16- Farhadi, H., & Najafzadeh, M. (2021). Flood Risk Mapping by Remote Sensing Data and Random Forest Technique. *Water*, 13(21).
- 17- Farzanmanesh, R., Khoshelham, K., Volkova, L., Thomas, S., Ravelonjatovo, J., & Weston, C. J. (2024). Temporal Analysis of Mangrove Forest Extent in Restoration Initiatives: A Remote Sensing Approach Using Sentinel-2 Imagery. *Forests*, 15(3).
- 18- Feng, D. (2012). A New Method for Fast Information

- Band Downscaling Methods for Water Bodies Mapping from Sentinel-2 Imagery at 10-M Resolution. *Water*, 14(17).
- 38- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- 39- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997-1016. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286>
- 40- Markert, K. N., Markert, A. M., Mayer, T., Nauman, C., Haag, A., Poortinga, A., Bhandari, B., Thwal, N. S., Kunlamai, T., Chishtie, F., Kwant, M., Phongsapan, K., Clinton, N., Towashiraporn, P., & Saah, D. (2020). Comparing Sentinel-1 Surface Water Mapping Algorithms and Radiometric Terrain Correction Processing in Southeast Asia Utilizing Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(15).
- 41- 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. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- 42- Montero, D., Aybar, C., Mahecha, M. D., Martinuzzi, F., Söchting, M., & Wieneke, S. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Scientific Data*, 10(1), 197. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0>
- 43- Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J., Lymburner, L., McIntyre, A., Tan, P., Curnow, S., & Ip, A. (2016). Water observations from space: Mapping surface water from 25years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 174, 341-352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>
- 44- Mukherjee, N., & Samuel, C. (2016). Assessment of the Temporal Variations of Surface Water Bodies in and around Chennai using Landsat Imagery. *Indian Journal of Science and Technology*, 9. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i18/92089>
- 45- Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., A. (2022). Hydromorphology and environmental restoration of Gorgan Bay, the Southeast Caspian Sea. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 17-28. <https://doi.org/10.22124/cjes.2022.5388>
- 29- Kolli, M. K., Opp, C., Karthe, D., & Pradhan, B. (2022). Automatic extraction of large-scale aquaculture encroachment areas using Canny Edge Otsu algorithm in Google earth engine – the case study of Kolleru Lake, South India. *Geocarto International*, 37(26), 11173-11189. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2046872>
- 30- Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sensing*, 10(10).
- 31- Li, J., Ma, R., Cao, Z., Xue, K., Xiong, J., Hu, M., & Feng, X. (2022). Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. *Water*, 14(7).
- 32- Li, J., Meng, Y., Li, Y., Cui, Q., Yang, X., Tao, C., Wang, Z., Li, L., & Zhang, W. (2022). Accurate water extraction using remote sensing imagery based on normalized difference water index and unsupervised deep learning. *Journal of Hydrology*, 612, 128202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128202>
- 33- Li, J., Peng, B., Wei, Y., & Ye, H. (2021). Accurate extraction of surface water in complex environment based on Google Earth Engine and Sentinel-2. *PLOS ONE*, 16, e0253209. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253209>
- 34- Li, W., Li, D., & Fang, Z. N. (2023). Intercomparison of Automated Near-Real-Time Flood Mapping Algorithms Using Satellite Data and DEM-Based Methods: A Case Study of 2022 Madagascar Flood. *Hydrology*, 10(1).
- 35- Li, X., Zhang, F., Chan, N. W., Shi, J., Liu, C., & Chen, D. (2022). High Precision Extraction of Surface Water from Complex Terrain in Bosten Lake Basin Based on Water Index and Slope Mask Data. *Water*, 14(18), 2809. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/18/2809>
- 36- Liang, J., Xie, Y., Sha, Z., & Zhou, A. (2020). Modeling urban growth sustainability in the cloud by augmenting Google Earth Engine (GEE). *Computers, Environment and Urban Systems*, 84, 101542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101542>
- 37- Liu, H., Hu, H., Liu, X., Jiang, H., Liu, W., & Yin, X. (2022). A Comparison of Different Water Indices and

architectures, applications and recent trends. Knowledge-Based Systems, 194, 105596. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105596>

55- Shen, L., & Li, C. (2010, 18-20 June 2010). Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm. 2010 18th International Conference on Geoinformatics,

56- Story, M., & Congalton, R. G. (1986). Accuracy assessment: a user's perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52, 397-399.

57- Tan, J., Tang, Y., Liu, B., Zhao, G., Mu, Y., Sun, M., & Wang, B. (2023). A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm and Distance Block. Remote Sensing, 15(10).

58- Tan, W., Xing, J., Yang, S., Yu, G., Sun, P., & Jiang, Y. (2020). Long Term Aquatic Vegetation Dynamics in Longgan Lake Using Landsat Time Series and Their Responses to Water Level Fluctuation. Water, 12(8), 2178. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2178>

59- Tang, H., Lu, S., Ali Baig, M. H., Li, M., Fang, C., & Wang, Y. (2022). Large-Scale Surface Water Mapping Based on Landsat and Sentinel-1 Images. Water, 14(9).

60- Tang, W., Zhao, C., Lin, J., Jiao, C., Zheng, G., Zhu, J., Pan, X., & Han, X. (2022). Improved Spectral Water Index Combined with Otsu Algorithm to Extract Muddy Coastline Data. Water, 14(6).

61- Ticehurst, C., Teng, J., & Sengupta, A. (2022). Development of a Multi-Index Method Based on Landsat Reflectance Data to Map Open Water in a Complex Environment. Remote Sensing, 14(5).

62- Tran, T. V., Reef, R., & Zhu, X. (2022). A Review of Spectral Indices for Mangrove Remote Sensing. Remote Sensing, 14(19).

63- Van Rijsbergen, C. J. (1979). Information Retrieval. Butterworths. <https://books.google.fr/books?id=t-pTAAAAMAAJ>

64- Wang, C., Jia, M., Chen, N., & Wang, W. (2018). Long-Term Surface Water Dynamics Analysis Based on Landsat Imagery and the Google Earth Engine Platform: A Case Study in the Middle Yangtze River Basin. Remote Sensing, 10(10).

Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., & AghaKouchak, A. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. Nature Communications, 14(1), 6674. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>

46- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>

47- Pang, Y., Yu, J., Xi, L., Ge, D., Zhou, P., Hou, C., He, P., & Zhao, L. (2024). Remote Sensing Extraction of Lakes on the Tibetan Plateau Based on the Google Earth Engine and Deep Learning. Remote Sensing, 16(3).

48- Pei, Y. (2007). A Study on Information Extraction of Water System in Semi-arid Regions with the Enhanced Water Index(EWI) and GIS Based Noise Remove Techniques. Remote Sensing Information.

49- Rad, A. M., Kreidler, J. R., Abatzoglou, J. T., Fallon, K., Roche, K., & Sadegh, M. (2022). Anthropogenic stressors compound climate impacts on inland lake dynamics: The case of Hamun Lakes. Science of the Total Environment, 829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154419>

50- Rahimi, A., & Breuste, J. (2021). Why is Lake Urmia Drying up? Prognostic Modeling With Land-Use Data and Artificial Neural Network [Original Research]. Frontiers in Environmental Science, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.603916>

51- Rambabu, P., & Nagaraju, C. (2015). The optimal thresholding technique for image segmentation using fuzzy ostu method. International Journal of Applied Engineering Research, 10(13), 33842-33846.

52- Rosenfield, G. H., & Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(2), 223-227. <https://pubs.usgs.gov/publication/70014667>

53- Sahoo, P. K., Soltani, S., & Wong, A. K. (1988). A survey of thresholding techniques. Computer vision, graphics, and image processing, 41(2), 233-260.

54- Sengupta, S., Basak, S., Saikia, P., Paul, S., Tsalavoutis, V., Atiah, F., Ravi, V., & Peters, A. (2020). A review of deep learning with special emphasis on

Water, 16(7).

71- Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N., & Liang, L. (2017). Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening. *Remote Sensing*, 9(6).

72- Zhou, J., Ke, L., Ding, X., Wang, R., & Zeng, F. (2024). Monitoring Spatial-Temporal Variations in River Width in the Aral Sea Basin with Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 16(5).

65- Wang, W., Teng, H., Zhao, L., & Han, L. (2023). Long-Term Changes in Water Body Area Dynamic and Driving Factors in the Middle-Lower Yangtze Plain Based on Multi-Source Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 15(7), 1816. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/7/1816>

66- Wang, X., Xie, S., Zhang, X., Chen, C., Guo, H., Du, J., & Duan, Z. (2018). A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 73-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.018>

67- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J.,...Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

68- 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. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

69- Yang, L., Driscoll, J., Sarigai, S., Wu, Q., Chen, H., & Lippitt, C. D. (2022). Google Earth Engine and Artificial Intelligence (AI): A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 14(14).

70- Yang, X., & Hong, L. (2024). A New Classification Rule-Set for Mapping Surface Water in Complex Topographical Regions Using Sentinel-2 Imagery.

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

