

Spatiotemporal Assessment of Water Inundation Changes in the Mighan Wetland Based on Satellite Image Time Series in the Google Earth Engine Platform

Samaneh Razavizadeh¹

1. Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Terhran, Iran. E-mail: srazavizadeh@ymail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 05 Jun 2026

Received in revised form:
21 Jul 2026

Accepted: 17 Aug 2026

Available online: 23 Sep 2026

Keywords:

Mighan Wetland,
Remote Sensing,
Hydrological Stability,
Google Earth Engine,
NDWI Index.

ABSTRACT

Mighan Wetland has experienced severe hydrological fluctuations and declining water stability in recent decades. In this study, the wetland was monitored over the period 1995–2024 using Landsat 5, 7, and 8 imagery within the Google Earth Engine (GEE) platform. The aim was to analyze the spatiotemporal changes of the water body and assess hydrological instability using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Transition and Seasonality algorithms from the JRC Global Surface Water dataset. The results showed that the average water body area decreased from 10.7 km² (1995–2004) to 3.9 km² (2005–2014), representing a 63% decline, then increased to 19.8 km² (2015–2024). More than 80% of annual inundation occurs in winter and spring, corresponding to snowmelt and higher precipitation periods. The Seasonality algorithm revealed that 25% of the wetland is permanently dry, approximately 70% holds water for only 1 to 5 months per year, and only 4.5% has persistent water cover. The Transition results indicated the conversion of some seasonal areas to permanent zones and the emergence of new seasonal water bodies. Overall, the hydrological regime of the wetland has become highly unstable over three decades, transforming into a seasonal system dependent on short-term climatic events, posing a serious threat to its ecological functions, including habitat loss for migratory birds and increased dust emission from dry playa surfaces. The novelty of this research lies in integrating long-term monthly analyses with the NDWI index and the Transition and Seasonality algorithms within the GEE platform, enabling continuous monitoring, improved water resource management, and effective wetland restoration planning.

Cite this article: Razavizadeh, S. (2026). Spatiotemporal Assessment of Water Inundation Changes in the Mighan Wetland Based on Satellite Image Time Series in the Google Earth Engine Platform. *Geography and Environmental Sustainability*, 16(3), 111-130. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.14018.2992>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.14018.2992>

Publisher: Razi University

Introduction

Wetlands in arid and semi-arid regions are among the most vulnerable natural ecosystems due to their high dependence on limited precipitation and intermittent runoff. These ecosystems provide critical ecological services, including groundwater recharge, flood regulation, biodiversity conservation, and climate moderation. However, they are increasingly threatened by anthropogenic pressures such as excessive groundwater extraction, land-use changes, upstream water diversion, and climate change. Mighan Wetland, located in the central plateau of Iran near Arak City, is one of the most important salt wetlands in the region, which has experienced severe hydrological fluctuations and declining inundation stability in recent decades. The desiccation of this wetland can lead to widespread environmental consequences, including the activation of dust sources, increased wind erosion, degradation of surrounding agricultural lands, loss of habitat for migratory birds, and weakening of ecological functions. Despite its ecological and economic significance, long-term monitoring of its hydrological dynamics has been limited. The main purpose of this study is to monitor and analyze the spatiotemporal changes in the water body area of Mighan Wetland over a 30-year period (1995–2024) and assess its hydrological instability trend using remote sensing data within the Google Earth Engine platform.

Materials and Methods

In this study, Landsat 5, 7, and 8 satellite images (time series from 1995 to 2024) were used to extract and analyze water body changes. The Google Earth Engine platform was employed for all processing due to its powerful cloud-computing capabilities, access to extensive satellite archives, and efficient handling of large-scale time-series data. The Normalized Difference Water Index (NDWI), a widely used spectral index for water body extraction, was applied with a threshold of 0.2 to delineate water surfaces. The NDWI leverages the reflectance differences between visible green and near-infrared bands to effectively distinguish water bodies from other land cover types. To analyze the stability and structural changes of water bodies, the Transition and Seasonality algorithms from the JRC Global Surface Water dataset were used. These algorithms provide detailed classification of water presence over time, identifying patterns such as permanent, seasonal, ephemeral, and transitional water bodies. Water surface areas were calculated at monthly, seasonal, annual, and decadal scales, and their trends were analyzed to understand both short-term fluctuations and long-term patterns. Additionally, inundation classification maps were prepared based on 11 Transition classes and 12 Seasonality classes, enabling a comprehensive assessment of hydrological stability and change dynamics across the wetland.

Results and Discussion

The results showed that the average water body area of Mighan Wetland decreased from 10.7 km² in the first decade (1995–2004) to 3.9 km² in the second decade (2005–2014), representing a 63% decline. This significant reduction reflects the combined effects of prolonged drought, upstream water diversion, and increased groundwater extraction. However, the wetland area then increased to 19.8 km² in the third decade (2015–2024), largely due to wetter climatic conditions and increased rainfall events. The maximum inundation area was recorded in 2019 with 29.5 km², while the minimum was recorded in 1999 with only 0.1 km², indicating extreme interannual variability. Seasonal analysis indicated that the largest water area occurs in winter (15 km²) and spring (14.6 km²), corresponding to snowmelt and higher precipitation periods, while the smallest occurs

in summer (1.5 km²) and autumn (4.4 km²), reflecting high evaporation rates and reduced runoff. Seasonality algorithm results revealed that 25% of the wetland area remains permanently dry, approximately 70% is inundated for only 1–5 months annually, and stable inundation areas (more than 6 months) comprise merely 4.5% of the total area. Transition algorithm results showed that the "No Change" class (21.9 km²), "Permanent" class (24.5 km²), "New Seasonal" class (2 km²), "New Permanent" class (2 km²), and "Seasonal to Permanent" class (6.4 km²) are among the most important change classes, highlighting the dynamic nature of wetland hydrology.

Conclusion

The findings of this study indicate that the hydrological regime of Mighan Wetland has become extremely unstable over the past three decades, and the wetland has transformed into a seasonal system dependent on short-term climatic events rather than a stable, permanent water body. Although the increase in water area in the third decade is significant, it is mainly due to the expansion of seasonal zones and the wetland's response to short-term wet periods, not the return of structural stability to the permanent cores of the wetland. The novelty of this research lies in the integration of long-term monthly analyses with NDWI and Transition and Seasonality algorithms within the Google Earth Engine environment, enabling continuous monitoring, improved water resource management, and restoration planning for Mighan Wetland. Based on the results, determining and providing sustainable environmental water rights, integrated watershed management, controlling excessive groundwater extraction, and improving water use efficiency in the agricultural sector are among the most essential actions needed to preserve the stability of this valuable ecosystem. Without timely intervention, the wetland faces the risk of permanent desiccation, with severe environmental and socio-economic consequences for the region.

ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی آبگیری تالاب میقان بر پایه سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای در

محیط Google Earth Engine

سمانه رضوی زاده^۱

۱. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
رایانامه: srazavizadeh@ymail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: تالاب میقان سنجش از دور پایداری هیدرولوژیکی Google Earth Engine	تالاب میقان طی دهه‌های اخیر با تغییرپذیری هیدرولوژیکی و کاهش تداوم آبگیری مواجه بوده است. در این پژوهش، تالاب میقان طی بازه ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ در محیط Google Earth Engine پایش شده است. هدف، تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پهنه آبی و ارزیابی ناپایداری هیدرولوژیکی با بهره‌گیری از شاخص NDWI و الگوریتم‌های Seasonality و Transition از مجموعه داده GSW-JRC بود. نتایج نشان داد متوسط مساحت پهنه آبی از ۱۰،۷ کیلومترمربع (۱۹۹۵-۲۰۰۴) به ۳،۹ کیلومترمربع (۲۰۰۵-۲۰۱۴) کاهش و سپس به ۱۹،۸ کیلومترمربع (۲۰۲۴-۲۰۱۵) افزایش یافته است. بیش از ۸۰ درصد آبگیری سالانه در زمستان و بهار رخ می‌دهد. الگوریتم Seasonality مشخص کرد ۲۵ درصد تالاب همیشه خشک، حدود ۷۰ درصد تنها ۱ تا ۵ ماه در سال آبدار و فقط ۴،۵ درصد دارای پوشش آبی پایدار است. نتایج Transition نیز نشان‌دهنده تبدیل بخشی از پهنه‌های فصلی به دائمی و ظهور پهنه‌های فصلی جدید است. به‌طور کلی، رژیم هیدرولوژیکی تالاب طی سه دهه شدیداً ناپایدار شده و به سیستمی فصلی و وابسته به رویدادهای کوتاه‌مدت اقلیمی تبدیل گردیده که تهدیدی جدی برای کارکردهای اکولوژیکی آن به شمار می‌رود. نوآوری پژوهش در تلفیق تحلیل‌های ماهانه بلندمدت با NDWI و الگوریتم‌های Transition و Seasonality در بستر GEE است که پایش مستمر، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی احیای تالاب را فراهم می‌سازد.

استناد: رضوی زاده، سمانه (۱۴۰۵). ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی آبگیری تالاب میقان بر پایه سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای در محیط Google Earth Engine. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۶ (۳)، ۱۱۱-۱۳۰. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.14018.2992>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.14018.2992>



مقدمه

پهنه‌های آبی واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله تالاب‌ها و دریاچه‌های شور، از ارکان اصلی سامانه‌های محیطی به شمار می‌روند که نقش مؤثری در تنظیم چرخه‌های هیدرولوژیکی، تعدیل شرایط اقلیمی محلی، کنترل کانون‌های گرد و غبار و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند (میچ و گوسلینک^۱، ۲۰۱۵). این پهنه‌ها با وجود محدودیت‌های طبیعی ناشی از کمبود بارش و تبخیر بالا، خدمات اکوسیستمی متعددی از جمله ذخیره‌سازی کربن، پشتیبانی از زیستگاه‌های جانوری و تنظیم فرایندهای زیست‌ژئوشیمیایی ارائه می‌دهند. در کشورهایی با اقلیم غالباً خشک مانند ایران، اهمیت این سامانه‌ها دوچندان است، زیرا کوچک‌ترین اختلال در تعادل آبی آن‌ها می‌تواند پیامدهای گسترده زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی به همراه داشته باشد.

تالاب‌ها و پهنه‌های آبی مناطق خشک به دلیل وابستگی به بارش‌های محدود، رواناب‌های مقطعی و تعادل شکننده میان تغذیه و تبخیر، از آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌روند. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، کاهش بارش، افزایش دما و تشدید فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، توسعه کشاورزی و تغییر کاربری اراضی، سبب تسریع روند خشکیدگی بسیاری از تالاب‌های داخلی ایران شده است. پیامد این روند، بروز پدیده‌هایی همچون افزایش شوری خاک، تشدید فرسایش بادی، افزایش فراوانی طوفان‌های گرد و غبار، کاهش تنوع زیستی و تهدید سلامت عمومی بوده است (بلورانی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ یوسفی کبریآ^۳ و همکاران، ۲۰۲۵؛ جلیوند و همکاران، ۲۰۲۱؛ طاهری دهکردی^۴ و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به این پیامدها، پایش تغییرات پهنه‌های آبی دریاچه‌ها و تالاب‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک و ارزیابی الگوهای آبرگیری و خشکیدگی آن‌ها از ضروریات پژوهش‌های هیدرولوژیکی و مدیریت اکوسیستم‌های آبی به شمار می‌رود (احراری^۵ و همکاران، ۲۰۲۴؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۶). هدف از این پایش‌ها، شناسایی روندهای هیدرولوژیک حاکم بر این پیکره‌های آبی، تعیین الگوهای زمانی-مکانی آبرگیری و خشکیدگی و تشخیص زودهنگام نشانه‌های خشکیدگی پیش از بروز پیامدهای جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی است (آلونسو^۶ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هالابیسکی^۷ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ایگلار و شلافر^۸، ۲۰۲۳).

ماهیت پویای تالاب‌ها و نوسانات سطح آب آن‌ها، مطالعه این اکوسیستم‌ها را با چالش مواجه ساخته است (وارد^۹ و همکاران، ۲۰۱۳). از این رو، بهره‌گیری از فناوری سنجش‌ازدور با امکان پایش مستمر و بلندمدت، ابزاری کارآمد برای شناسایی تغییرات سطح آب، محاسبه شاخص‌های رطوبتی و استخراج نقشه‌های آبرگیری در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌آورد (دانلی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۵؛ کوهانی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۵). این داده‌ها می‌توانند مبنایی برای تحلیل روندها، پیش‌بینی وضعیت آتی تالاب‌ها و اطلاع‌رسانی به‌موقع به مدیران و سیاست‌گذاران جهت اتخاذ تدابیر حفاظتی و احیایی پیش از رسیدن به آستانه‌های بحرانی خشکیدگی قرار گیرند.

فلات مرکزی ایران به‌دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، میزبان تالاب‌ها و دریاچه‌های شور متعددی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دریاچه نمک، حوض سلطان و تالاب میقان اشاره کرد. این پهنه‌های آبی طی دهه‌های اخیر

1. Mitsch & Gosselink
2. Boloorani
3. Yousefi-Kebriya
4. Taheri Dehkordi
5. Ahrari
6. Alonso
7. Halabisky
8. Iglar & Schlaffer
9. Ward
10. Donnelly
11. Koohani

با کاهش تدریجی منابع آب و تغییرات هیدرولوژیکی قابل توجه مواجه شده‌اند. مطالعات انجام‌شده بر روی دریاچه‌های نمکی فلات مرکزی نشان می‌دهد که حیات این پهنه‌ها به بارش‌های رگباری و فصلی وابسته است؛ الگویی مشترک و نگران‌کننده که بیانگر شکنندگی این اکوسیستم‌ها در برابر تغییرات اقلیمی است (روحانی و همکاران، ۱۴۰۰).

در این میان، تالاب میقان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تالاب‌های شور منطقه، نمونه‌ای شاخص از سامانه‌های آبی-بیابانی حساس به تغییرات طبیعی و انسانی به شمار می‌رود. این تالاب در یک حوضه بسته داخلی واقع شده و رژیم هیدرولوژیکی آن شدیداً تحت تأثیر نوسانات اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناختی و مداخلات انسانی قرار دارد (فرم‌هینی فراهانی و درویش، ۱۳۹۰). بررسی‌های انجام‌شده در حوضه میقان نیز نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و فعالیت‌های انسانی، از عوامل مؤثر بر تغییرات محیطی و هیدرولوژیکی تالاب هستند (انصاری و گلابی، ۲۰۱۹).

پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه میقان نشان می‌دهد که این تالاب طی چند دهه اخیر با تغییرات قابل توجه در وضعیت رطوبتی و دوره‌های خشکی مواجه بوده است. نتایج حاصل از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای لندست در دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ نشان داد که روند خشک شدن تالاب افزایش یافته و میانگین شاخص رطوبت سطحی از حدود ۰/۳۶ در سال‌های ابتدایی دوره به حدود ۰/۰۴- در سال‌های پایانی کاهش یافته است. همچنین، ارتباط معناداری میان تغییرات رطوبت سطح تالاب و شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI مشاهده شد که بیانگر حساسیت وضعیت رطوبتی تالاب به نوسانات خشکسالی اقلیمی است (ابراهیمی خسفی و همکاران، ۲۰۱۹).

این تغییرات در کنار کاهش ورودی‌های آبی و بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب، زمینه را برای تشدید فرایندهای بیابان‌زایی و بحرانی شدن وضعیت اکولوژیکی تالاب فراهم کرده است (انصاری، ۱۳۹۷؛ خالدی، ۱۳۸۵). پژوهش‌های جدیدتر نیز روند کاهشی پهنه آبی تالاب میقان را تأیید کرده و بر اهمیت پایش مستمر آن تأکید دارند (فیض‌الله‌پور، ۱۴۰۲).

تالاب میقان افزون بر اهمیت هیدرولوژیکی، از نظر زیست‌محیطی و اجتماعی نیز جایگاه ویژه‌ای دارد. خشکیدگی این تالاب سبب فعال شدن کانون‌های گرد و غبار شده و می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای سکونتگاه‌های انسانی اطراف و شهرهای منطقه به همراه داشته باشد. از سوی دیگر، وجود گونه‌های گیاهی و جانوری سازگار با شرایط شور، ارزش اکولوژیکی این پهنه را افزایش داده و ضرورت پایش مستمر و مدیریت پایدار آن را برجسته می‌سازد (خالدی، ۱۳۸۵). این وضعیت نه مختص تالاب میقان، بلکه مشابه بسیاری از تالاب‌ها و دریاچه‌های شور فلات مرکزی است؛ حساسیت بالای این سامانه‌ها به تغییرات اقلیمی و انسانی، اهمیت مدیریت علمی و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب را بیش از پیش آشکار می‌کند (طاهری دهکردی و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات بین‌المللی نیز نشان می‌دهد که کاهش پایداری آب‌گیری از عوامل اصلی نابودی جوامع پرندگان آبی در تالاب‌های جهان است (بینو^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

در چنین شرایطی، پایش دقیق و بلندمدت تغییرات پهنه‌های آبگیر تالاب میقان به‌عنوان یک ضرورت علمی و مدیریتی مطرح می‌شود. پایش مستمر سطح آب امکان شناسایی روندهای کوتاه‌مدت، تغییرات میان‌مدت و الگوهای بلندمدت خشکیدگی را فراهم کرده و نقش مهمی در ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی ایفا می‌کند. داده‌های سنجش‌ازدور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای لندست، به‌دلیل پوشش زمانی طولانی، قدرت تفکیک مکانی مناسب و دسترسی آزاد، یکی از کارآمدترین ابزارها برای تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پهنه‌های آبی در بازه‌های زمانی بلندمدت به شمار می‌روند (اوزسمی و باوئر^۲، ۲۰۰۲؛ کائو^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

در سال‌های اخیر، توسعه سکوها برای پردازش ابری نظیر موتور پردازش ابری گوگل ارث^۴ تحول چشم‌گیری در تحلیل

1. Bino

2. Ozesmi & Bauer

3. Cao

4. Google Earth Engine

داده‌های سنجش‌ازدور ایجاد کرده است. این سامانه با فراهم کردن امکان پردازش هم‌زمان حجم عظیمی از تصاویر ماهواره‌ای و سری‌های زمانی بلندمدت، زمینه را برای پایش پیوسته و چندمقیاسی پهنه‌های آبی فراهم ساخته است. بهره‌گیری از شاخص‌های شناسایی آب مانند شاخص تفاضل نرمال‌شده آب^۱، شاخص تفاضل نرمال‌شده تعدیل‌یافته آب^۲ و شاخص خودکار بدنه‌های آبی^۳ در کنار محصولات جهانی آب‌های سطحی شامل نقشه تغییرات^۴ و نقشه فصلی بودن^۵، امکان تحلیل دقیق پایداری، تداوم و ناپایداری آبگیری تالاب‌ها را در مقیاس‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند (پکل^۶ و همکاران، ۲۰۱۶؛ فیض‌الله‌پور، ۱۴۰۲).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پایش و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پهنه آبی تالاب میقان در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه طی یک دوره ۳۰ ساله و با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست و توان پردازشی سامانه موتور پردازش ابری گوگل‌ارث انجام شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی احیای تالاب و مدیریت پایدار منابع آب در یکی از حساس‌ترین سامانه‌های آبی-بیابانی فلات مرکزی ایران فراهم آورد.

یکی از جنبه‌های نوآورانه و متمایز این پژوهش، تمرکز بر پایش دقیق و سیستماتیک آبگیری و خشکیدگی تالاب میقان در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه در یک دوره بلندمدت است. در این راستا، برای نخستین‌بار در مطالعات داخلی، از محصولات جهانی نقشه تغییرات و نقشه فصلی بودن متعلق به مجموعه داده‌های لایه‌های نقشه‌برداری جهانی آب‌های سطحی مرکز پژوهش‌های مشترک اتحادیه اروپا^۷ به‌صورت مستقیم و نظام‌مند در تحلیل تغییرات مکانی و زمانی سطوح آبی تالاب میقان استفاده شده است؛ در حالی که بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد کاربرد این محصولات در پایش پهنه‌های آبی کشور، به‌ویژه تالاب میقان، بسیار محدود بوده یا مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از آرشیو بلندمدت تصاویر ماهواره‌ای لندست و توان پردازشی سامانه پردازش ابری گوگل‌ارث، تغییرات پهنه‌های آبگیر تالاب میقان به‌صورت کمی و چندمقیاسی تحلیل شده و نوسانات کوتاه‌مدت، تغییرات میان‌مدت و روندهای بلندمدت آبگیری به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ترکیب نتایج حاصل از شاخص تفاضل نرمال‌شده آب با خروجی‌های الگوریتم‌های نقشه تغییرات و نقشه فصلی بودن، امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای زمانی و مکانی آبگیری و خشکیدگی تالاب میقان را فراهم کرده و چارچوبی یکپارچه برای پایش پیوسته پهنه‌های آبی ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان الگویی قابل تعمیم در مطالعات مشابه مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد.

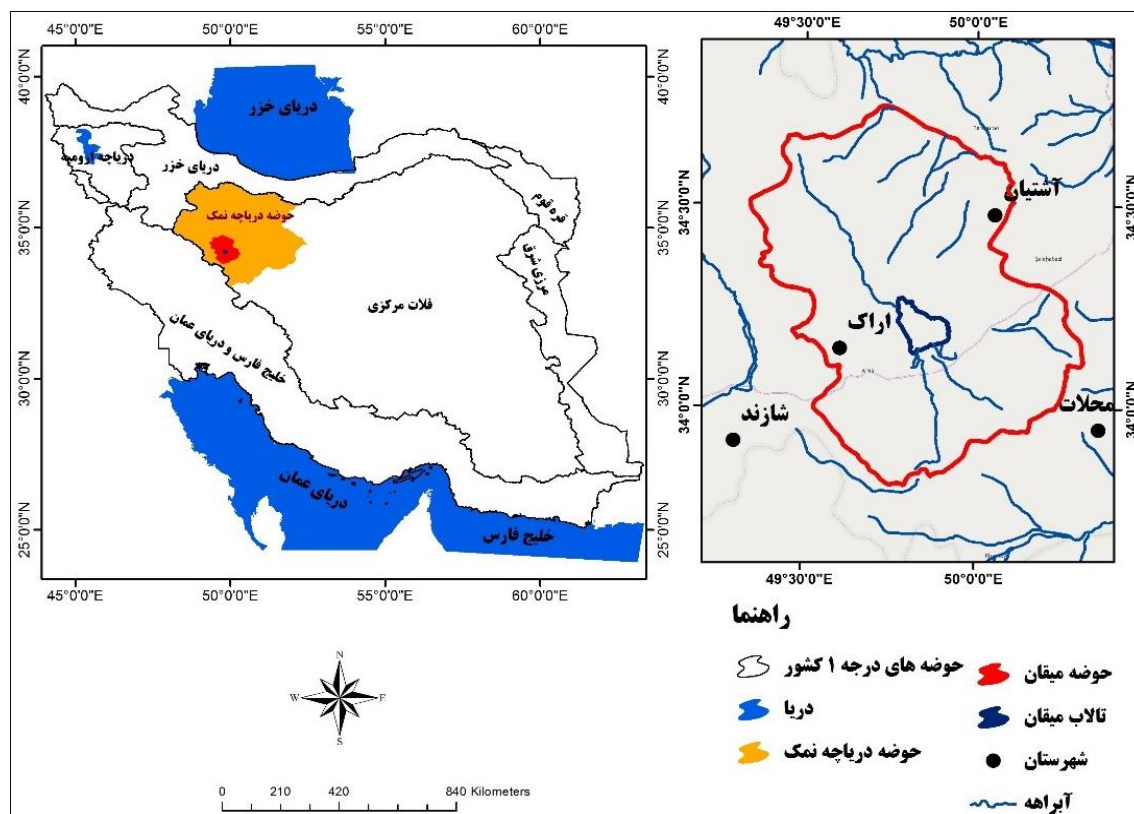
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تالاب میقان

حوزه آبخیز تالاب میقان بین $48^{\circ} 08'$ تا $52^{\circ} 30'$ طول شرقی و $33^{\circ} 00'$ تا $36^{\circ} 22'$ عرض شمالی واقع شده است و با وسعت ۵۴۴۰ کیلومتر مربع، در فلات مرکزی ایران و در حوضه دریاچه نمک، واقع شده است. این حوضه یک حوضه بسته داخلی است که هیچ رودخانه دائمی نداشته و مهم‌ترین مسیل‌های آن عبارت از آبراهه‌های کوهرود، آشتیان و ساروق هستند (شکل ۱).

1. NDWI
2. MNDWI
3. AWEI
4. Transition
5. Seasonality
6. Pekel
7. JRC Global Surface Water Mapping Layers



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تالاب میقان

روش پژوهش

استخراج و پایش پهنه‌های آبیگر تالاب میقان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

به‌منظور استخراج و پایش پهنه‌های آبیگر و خشک تالاب میقان در بازه زمانی ۳۰ ساله مورد مطالعه (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴)، پردازش و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای در محیط GEE انجام شد. این سامانه با بهره‌گیری از زیرساخت ابری، امکان دسترسی به آرشیو بلندمدت تصاویر سنجنش‌ازدور و اجرای تحلیل‌های زمانی-مکانی را با سرعت و دقت بالا فراهم می‌سازد.

در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ به‌دلیل پوشش زمانی مناسب و پیوستگی داده‌ها در کل دوره مطالعه انتخاب شدند. به‌منظور یکنواخت‌سازی داده‌ها و کاهش اثر اختلاف سنجنده‌ها، از محصولات سطح بازتاب استفاده شد. همچنین با اعمال ماسک ابر و سایه ابر، تصاویر دارای کیفیت مناسب برای تحلیل انتخاب شدند. با طراحی و پیاده‌سازی کد اختصاصی در محیط گوگل‌ارث انجین تصاویر ماهانه لندست در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استخراج شد که در مجموع شامل ۳۶۰ تصویر ماهانه است. این رویکرد امکان بررسی تغییرات زمانی پیوسته و تحلیل روندهای بلندمدت پهنه‌های آبیگر تالاب میقان را فراهم کرد.

استخراج پهنه‌های آبیگر با استفاده از شاخص NDWI

در گام بعدی، به‌منظور تفکیک پهنه‌های آبیگر تالاب میقان از سطوح خشک و نمکی اطراف، از شاخص تفاضل نرمال‌شده آب (NDWI) استفاده شد (رابطه ۱). این شاخص یکی از متداول‌ترین شاخص‌های طیفی برای شناسایی سطوح آبی بوده و حساسیت بالایی نسبت به حضور آب سطحی دارد.

$$NDWI = \frac{B_{Green} - B_{NIR}}{B_{Green} + B_{NIR}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این شاخص، باند سبز به دلیل بازتاب بالای آب و باند مادون قرمز نزدیک (NIR) به دلیل جذب شدید توسط آب انتخاب شده‌اند. در نتیجه، مقادیر مثبت NDWI معرف پهنه‌های آبی و مقادیر منفی یا نزدیک به صفر نشان‌دهنده سایر پدیده‌های سطحی از جمله خاک، نم‌زار و پوشش گیاهی می‌باشند. این ویژگی، شاخص NDWI را به ابزاری مناسب برای تفکیک پهنه‌های آبیگر در محیط‌های خشک و شور مانند تالاب میقان تبدیل کرده است.

باند‌های مورد استفاده در شاخص NDWI

باند‌های طیفی مورد استفاده در محاسبه شاخص NDWI برای سنجنده‌های مختلف لندست در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. باند‌های مورد استفاده در محاسبه شاخص NDWI

باند مادون قرمز نزدیک	باند سبز	سنجنده لندست
SR_B4	SR_B2	Landsat 5
SR_B4	SR_B2	Landsat 7
SR_B5	SR_B2	Landsat 8

پس از محاسبه شاخص NDWI برای هر تصویر ماهانه، آستانه‌گذاری مناسب (در این پژوهش آستانه ۰/۲ مناسب بود) جهت تبدیل نقشه پیوسته NDWI به نقشه دودویی آب/غیر آب انجام شد. بدین ترتیب، پهنه‌های آبیگر ماهانه تالاب میقان برای کل دوره زمانی استخراج گردید.

تحلیل تغییرات زمانی پهنه‌های آبیگر

به منظور استخراج نقشه‌های ماهانه پهنه آبی تالاب میقان، از پهنه آبی تصاویر موجود در هر ماه (بر اساس تعداد تصاویر موجود) میانگین گرفته شد و مساحت هر پهنه به صورت کمی محاسبه شد. سپس به منظور ارزیابی پهنه‌های آبی سالانه، در هر سال پیکسل‌هایی که ۵۰ درصد ماه‌های سال و بیشتر، آبدار بوده به عنوان پیکسل آبی در نظر گرفته شده و پهنه آبی سالانه برآورد شد. همچنین به منظور بررسی پهنه‌های آبی دهه‌ای (در سه دهه مطالعاتی ۲۰۰۴-۱۹۹۵، ۲۰۱۴-۲۰۰۵ و ۲۰۲۴-۲۰۱۵)، پیکسل‌هایی که در ۵۰ درصد سال‌های آن دهه و بیشتر، آبدار بوده به عنوان پیکسل آبی در نظر گرفته شده و پهنه آبی دهه‌ای برآورد شد.

سپس روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبیگر در مقیاس‌های زمانی مختلف شامل ماهانه، سالانه و دهه‌ای مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها به منظور بررسی نوسانات زمانی، شناسایی دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی و ارزیابی روند کلی تغییرات سطح آب دریاچه، به صورت نمودارها و جدول‌ها آماری ارائه شد.

پهنه‌بندی آبیگری تالاب میقان با استفاده از الگوریتم Transition

به منظور ارزیابی پتانسیل آبیگری تالاب میقان، از الگوریتم Transition که یکی از محصولات مجموعه داده‌های جهانی آب‌های سطحی است، استفاده شد. این الگوریتم توسط مرکز تحقیقات مشترک اتحادیه اروپا و در قالب همکاری مشترک با برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد و شرکت گوگل توسعه یافته است.

الگوریتم Transition با استفاده از تصاویر چنددهه‌ای لندست، تغییرات وضعیت آبیگری هر پیکسل را در طول زمان تحلیل می‌کند. در این پژوهش، هر پیکسل به صورت مستقل به دو کلاس آب و غیر آب طبقه‌بندی شد و نقشه‌های ماهانه وضعیت آبیگری برای دوره مورد مطالعه استخراج گردید. سپس با به کارگیری فرایند آشکارسازی تغییرات^۱، تغییرات مکانی و زمانی پهنه‌های آبیگر تالاب میقان مورد ارزیابی قرار گرفت. خروجی این الگوریتم به صورت طبقات مختلف پتانسیل آبیگری ارائه شد که نشان‌دهنده استعداد نسبی بخش‌های مختلف دریاچه برای آب‌گرفتگی در بازه‌های زمانی متفاوت است (جدول ۲).

جدول ۲. کلاس‌های تغییرات پهنه آبی بر اساس نقشه روش Transition

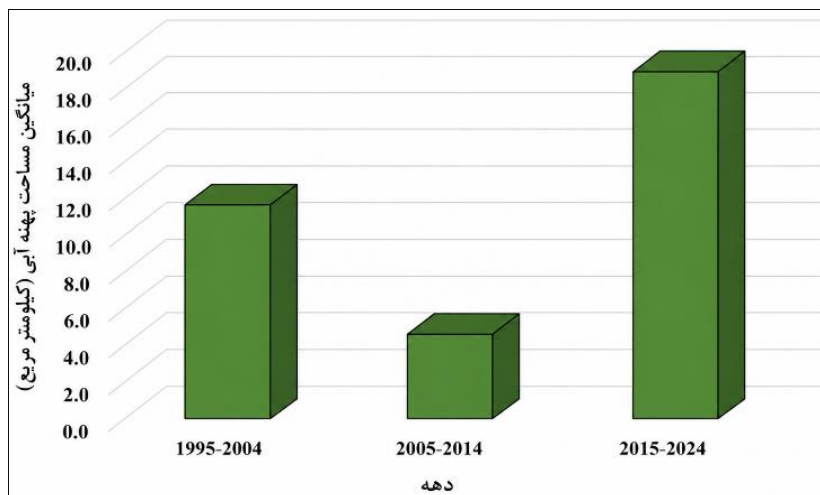
توضیحات	کلاس
نواحی که در طول زمان تغییرات قابل توجهی نداشته‌اند.	No Change
نواحی که همواره در حالت آبیگری یا تالاب باقی مانده‌اند.	Permanent
نواحی که به‌تازگی به وضعیت دائمی تغییر کرده‌اند.	New Permanent
نواحی که قبلاً دائمی بوده‌اند و اکنون از وضعیت دائمی خارج شده‌اند.	Lost Permanent
نواحی که آب در آن‌ها فقط در فصول خاصی از سال حضور دارد.	Seasonal
نواحی که به‌تازگی به وضعیت فصلی تغییر کرده‌اند.	New Seasonal
نواحی که قبلاً فصلی بوده‌اند و اکنون از وضعیت فصلی خارج شده‌اند.	Lost Seasonal
نواحی که از وضعیت فصلی به دائمی تغییر یافته‌اند.	Seasonal to Permanent
نواحی که از وضعیت دائمی به فصلی تغییر یافته‌اند.	Permanent to Seasonal
نواحی که به‌طور موقت به وضعیت دائمی درآمده‌اند، اما این تغییرات نمی‌توانند پایدار باشند.	Ephemeral Permanent
نواحی که به‌طور موقت به وضعیت فصلی درآمده‌اند، اما این تغییرات نمی‌توانند پایدار باشند.	Ephemeral Seasonal

پهنه‌بندی آبیگری تالاب میقان با استفاده از الگوریتم Seasonality

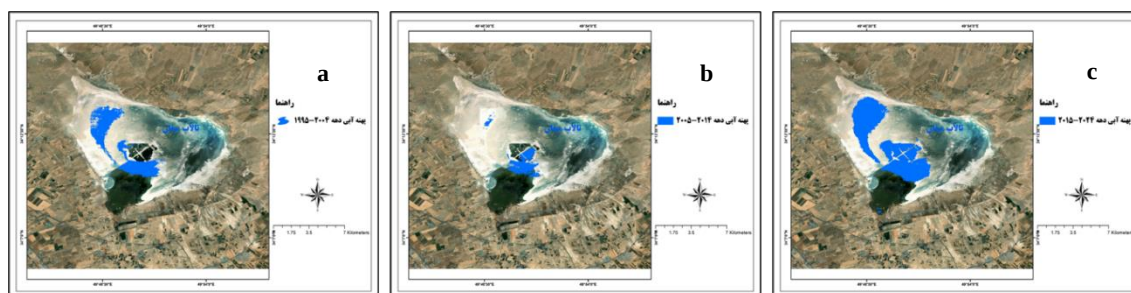
در ادامه، به‌منظور بررسی الگوی زمانی و تداوم آبیگری پهنه‌های مختلف تالاب میقان، از الگوریتم Seasonality استفاده شد. این الگوریتم نیز یکی از محصولات مجموعه داده‌های جهانی آب‌های سطحی JRC بوده و تعداد ماه‌هایی از سال را که هر پیکسل در وضعیت آب‌گرفتگی قرار دارد، در قالب مقادیری بین صفر تا ۱۲ نمایش می‌دهد. به‌کارگیری الگوریتم Seasonality امکان تفکیک پهنه‌های دارای آبیگری دائمی، فصلی و موقت را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از این بخش، درک دقیق‌تری از رفتار هیدرولوژیکی تالاب میقان، نوسانات زمانی سطح آب و تأثیر عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی بر گسترش یا پس‌روی پهنه‌های آبی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مدیریت پایدار و ارزیابی مخاطرات محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از استخراج متوسط پهنه آبی تالاب میقان در سه بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که میزان آبیگری تالاب در سه دهه اخیر دچار تغییرات چشم‌گیری بوده به‌طوری که متوسط پهنه آبی در دهه اول (۱۹۹۵-۲۰۰۴) ۱۰/۷ کیلومتر مربع بوده و در دهه دوم (۲۰۰۵-۲۰۱۴) با کاهشی چشم‌گیر به ۳/۹ کیلومتر مربع رسیده و در دهه سوم (۲۰۱۵-۲۰۲۴) با افزایشی دوباره به مقدار ۱۹/۸ کیلومتر مربع رسیده است (شکل ۲). این تغییرات تابعی از تغییرات بارش و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در دهه‌های مورد مطالعه است.

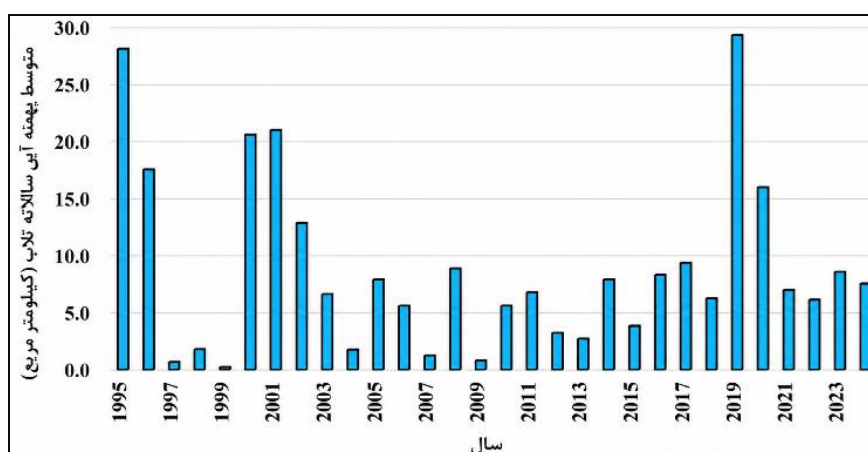


شکل ۲. روند تغییرات میانگین مساحت پهنه آبی تالاب میقان در سه دوره مطالعاتی



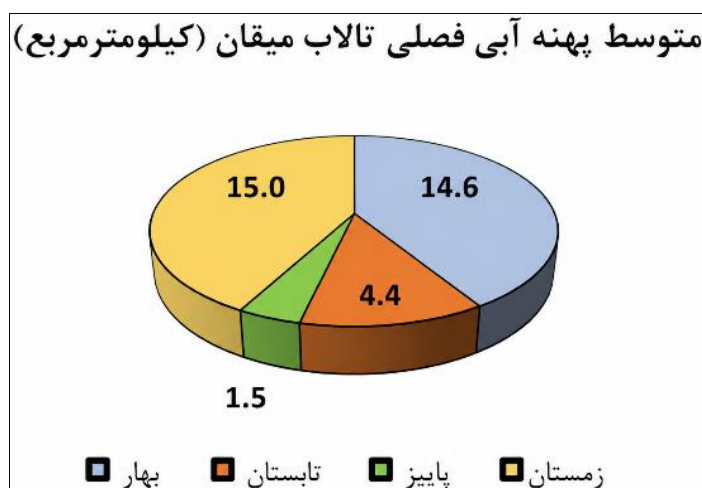
شکل ۳. مقایسه میانگین پهنه آبی تالاب میقان در سه دهه مطالعاتی شامل دوره‌های (a) ۱۹۹۵-۲۰۰۴، (b) ۲۰۰۴-۲۰۱۴ و (c) ۲۰۱۴-۲۰۲۴

همچنین نتایج به‌دست‌آمده از روند تغییرات متوسط پهنه آبی سالانه تالاب میقان، در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میزان آبیگیری دریاچه به‌ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۱۹۹۹ بوده و مساحت متوسط پهنه آبی سالانه در این سال‌ها معادل ۲۹/۵ و ۰/۱ کیلومتر مربع بوده است.



شکل ۴. پهنه آبی متوسط سالانه؛ (الف) بیشترین آبیگیری (ب) کمترین آبیگیری

شکل (۵) مساحت آبیگیری تالاب میقان در هر فصل به‌دست‌آمده از آمار ۳۰ ساله آبیگیری تالاب میقان (۱۹۹۵-۲۰۲۴)، نمایش می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است بیشترین میزان آبیگیری تالاب میقان مربوط به فصل زمستان است که به‌طور متوسط ۱۵ کیلومتر مربع بوده است. پس از آن، بیشترین میزان آبیگیری تالاب میقان مربوط به فصل بهار است که به‌طور متوسط ۱۴/۶ کیلومتر مربع از تالاب میقان آبدار بوده است. همچنین کمترین میزان آبیگیری تالاب میقان مربوط به فصل پاییز و پس از آن مربوط به تابستان است که به‌ترتیب متوسط آبیگیری ۴/۴ و ۱/۵ کیلومتر مربع را نشان می‌دهد.

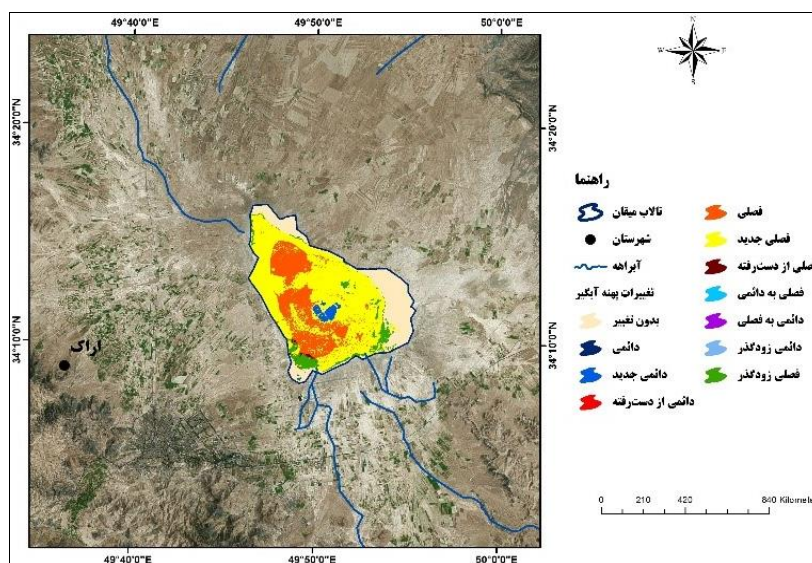


شکل ۵. میانگین مساحت پهنه آبی تالاب میقان در فصول مختلف سال (km²)

ماه	متوسط پهنه آبی ماهانه تالاب میقان (کیلومتر مربع)
ژانویه	26.5
فوریه	18.5
مارس	16.0
آوریل	18.5
مه	10.5
ژوئن	9.0
ژوئیه	4.0
اوت	1.5
سپتامبر	1.0
اکتبر	1.5
نوامبر	2.5
دسامبر	6.5

نتائج تحليل بهنه آیه، **تالاب** میزان، **با** الگوریتم **Transition**

نقشه تغییرات استخراج شده در محیط گوگل ارث، پهنه‌های آبیگیر را در ۱۱ کلاس مختلف طبقه‌بندی می‌کند: بدون تغییر، دائمی جدید، دائمی موقت، ازدست‌رفته دائمی، ازدست‌رفته فصلی، فصلی، فصلی جدید، فصلی موقت، فصلی به دائمی، دائمی به فصلی. این طبقه‌بندی به شناسایی و تحلیل تغییرات در وضعیت آبیگیر تالاب کمک کرده و اطلاعات مفیدی در زمینه روند تغییرات هیدرولوژیک، در این منطقه فراهم می‌آورد.



شکل ۷. تغییرات پهنه آبی تالاب میقان در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۸۴

نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که کلاس بدون تغییر با مساحت ۲۱٫۹ کیلومتر مربع، به نواحی پایدار و بدون تغییر آبرگیری در تالاب اشاره دارد که در طول زمان تغییری در وضعیت آن‌ها ایجاد نشده است. کلاس فصلی که مساحت آن صفر است، به نواحی اشاره دارد که آبرگیری آن وابسته به بارش‌های فصلی است و در فصول خاصی از سال پر آب می‌شوند. این نواحی به‌طور موقت آبرگیری شده و تغییرات آن معمولاً با بارش‌ها و شرایط فصلی مرتبط است. کلاس فصلی جدید با مساحت ۲ کیلومتر مربع نیز به نواحی جدیدی اشاره دارد که به‌تازگی وضعیت فصلی را تجربه کرده‌اند یا تغییرات فصلی در آن‌ها به‌تازگی ایجاد شده است.

کلاس فصلی موقت که مساحت صفر دارد، مشابه کلاس فصلی، به نواحی اشاره دارد که با تغییرات موقتی در آبرگیری آن‌ها در وضعیت فصلی قرار گرفته‌اند و این تغییرات ممکن است به دلایل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی یا تغییرات در بارش‌ها باشد. کلاس دائمی با مساحت ۲۴٫۵ کیلومتر مربع نشان‌دهنده نواحی دائمی تالاب است که همواره در حالت آبرگیر باقی مانده‌اند و وضعیت آن‌ها به‌طور پایدار حفظ شده است؛ بنابراین، این کلاس به نواحی که در گذشته و حال وضعیت دائمی خود را حفظ کرده‌اند مربوط می‌شود و به تغییرات فصلی یا موقتی اشاره ندارد.

کلاس دائمی جدید که مساحت ۲/۰ کیلومتر مربع دارد، به نواحی اشاره دارد که اخیراً تغییرات فصلی به دائمی را تجربه کرده‌اند. این کلاس نشان‌دهنده نواحی است که به‌دلیل تغییرات اقلیمی یا تغییرات در میزان بارش‌ها یا دیگر عوامل هیدرولوژیکی، به حالت دائمی درآمده‌اند؛ بنابراین، این کلاس به نواحی جدیدی اشاره دارد که به‌تازگی وضعیت دائمی پیدا کرده‌اند و در گذشته به‌صورت فصلی یا موقتی بودند.

کلاس دائمی موقت با مساحت ۰/۴ کیلومتر مربع، نشان‌دهنده نواحی است که به‌طور موقت به وضعیت دائمی درآمده‌اند، اما این تغییرات به‌دلیل شرایط خاص موقتی هستند و نمی‌توانند پایدار بمانند. این به این معناست که این نواحی ممکن است به‌طور موقت به‌دلیل تغییرات آب و هوایی، بارش‌ها یا سایر شرایط هیدرولوژیکی دائمی شده‌اند، اما در بلندمدت احتمالاً به وضعیت فصلی یا موقتی بازمی‌گردند.

کلاس‌های ازدست‌رفته دائمی و ازدست‌رفته فصلی (با مساحت صفر)، به نواحی اشاره دارند که قبلاً وضعیت دائمی یا فصلی داشته‌اند، اما اکنون به‌دلیل تغییرات زیست‌محیطی، انسانی، یا شرایط اقلیمی از بین رفته‌اند؛ به عبارت دیگر، نواحی که به‌طور قبلی دائمی یا فصلی بودند، به دلایل مختلف مانند تغییرات در الگوهای بارش، تغییرات اقلیمی، یا فعالیت‌های انسانی دیگر به حالت آبرگیری نرسیده یا تغییر کرده‌اند.

درنهایت، کلاس فصلی به دائمی با مساحت ۶/۴ کیلومتر مربع، نشان‌دهنده نواحی است که از وضعیت فصلی به دائمی تبدیل شده‌اند؛ به عبارت دیگر، نواحی که پیش‌تر فقط در فصول خاص از سال آبرگیری می‌شدند، به‌واسطه تغییرات در میزان بارش‌ها، شرایط هیدرولوژیکی یا تغییرات اقلیمی به نواحی دائمی تبدیل شده‌اند. این تغییرات معمولاً به‌دلیل تغییرات بلندمدت در الگوهای بارش، دما و شرایط محیطی است که باعث شده است این نواحی به‌طور مداوم آبرگیری شوند و حالت فصلی آن‌ها به وضعیت دائمی تغییر کند.

بیشترین مساحت در کلاس new seasonal (۵۹/۶ کیلومتر مربع) مربوط به نواحی فصلی جدید است که به‌تازگی از وضعیت دائمی یا موقتی به فصلی تبدیل شده‌اند. همچنین، نواحی با مساحت صفر (کلاس‌های فصلی، فصلی موقت، ازدست‌رفته دائمی، ازدست‌رفته فصلی) نشان‌دهنده تغییرات موقتی یا نواحی ازدست‌رفته هستند که ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی یا انسانی قرار گرفته باشند. این تحلیل می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا روند تغییرات پهنه تالاب را بهتر درک کرده و اقدامات مدیریتی مناسب برای حفاظت و بهبود وضعیت تالاب می‌تواند اتخاذ کنند.

جدول ۳. مساحت و درصد کلاس‌های تغییرات پهنه‌های آبرگیر تالاب می‌توان بر اساس محصول Transition

تعداد ماه‌های آبدار	مساحت پهنه (کیلومتر مربع)	درصد مساحت آبدار به مساحت کل
بدون تغییر	۲۱/۹	۱۹/۲
فصلی	۰	۰
فصلی جدید	۲	۱/۸

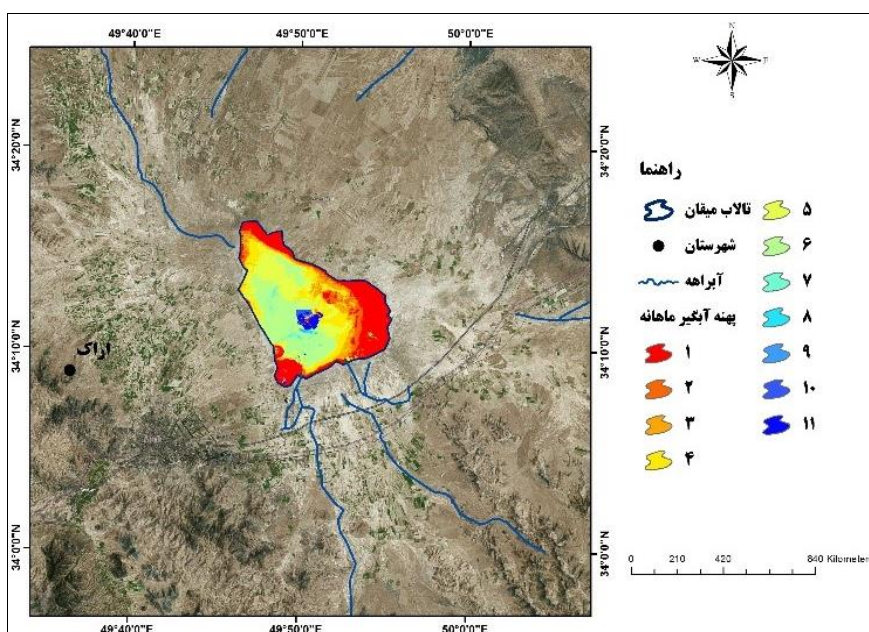
ادامه جدول ۳.

تعداد ماه‌های آبدار	مساحت پهنه (کیلومترمربع)	درصد مساحت آبدار به مساحت کل
فصلی موقت	۰	۰
دائمی	۲۴/۵	۲۱/۵
دائمی جدید	۲	۱/۸
دائمی موقت	۰/۲	۰/۴
دائمی ازدست‌رفته	۰	۰
فصلی ازدست‌رفته	۰	۰
فصلی به دائمی	۶/۴	۵/۶

* یادداشت: مساحت هر کلاس بر اساس تعداد پیکسل‌های هر کلاس و مساحت هر پیکسل (30×30 متر) محاسبه و به کیلومتر مربع تبدیل شده است.

نتایج تحلیل پهنه آبی تالاب میقان با الگوریتم Seasonality

نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی پهنه آبی ماهانه تالاب میقان با استفاده از روش Seasonality، در قالب نقشه توسط GSWE تهیه و در چارچوب برنامه کوپرنیک نمایه شده است. با اجرای کدهای دستوری طراحی‌شده در سامانه GEE، نقشه پهنه آبی ماهانه تالاب میقان به‌صورت ماهانه (شکل ۸) تهیه شد. این نقشه پهنه‌های آبیگر هامون‌ها را به‌صورت ماهانه و در قالب ۱۲ کلاس نمایش می‌دهد و کلاس‌های ۱ تا ۱۲، نمایش‌دهنده تعداد ماه آبیگری هر کلاس است.



شکل ۸. توزیع مکانی مدت آبیگری تالاب میقان بر اساس تعداد ماه‌های دارای آب

این شکل بر اساس تعداد ماه‌هایی از سال که هر پهنه از تالاب میقان، آبدار هستند طبقه‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش وسیعی از هامون‌ها کمتر از ۷ ماه از سال آبدار هستند. شایان ذکر است که نقشه ارائه شده، پهنه‌های آبیگر را بر اساس متوسط بلندمدت نشان می‌دهد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که کلاس صفر ماه آبداری (پهنه‌های دائماً خشک) با مساحت ۲۸/۸ کیلومترمربع (۰/۲۵) بیشترین سهم را از مساحت تالاب به خود اختصاص داده است. این امر بیانگر خشکی گسترده و غالب در بخش عمده‌ای از پهنه تالاب است.

پهنه‌هایی با یک تا پنج ماه آبداری (کلاس‌های ۱ تا ۵) در مجموع سهم بسیار قابل توجهی (حدود ۷۰٪) از مساحت دریاچه را تشکیل می‌دهند. این پهنه‌ها عمدتاً نمایانگر آب‌گرفتگی‌های فصلی، کوتاه‌مدت و ناپایدار هستند که به بارش‌های

موقت و رخدادهای مقطعی هیدرولوژیکی وابسته‌اند.

در مقابل، پهنه‌هایی با شش ماه آبداری یا بیشتر (کلاس‌های ۶ تا ۱۰) که نشان‌دهنده پایداری نسبی یا بالا هستند، سهم بسیار ناچیزی (مجموعاً تنها حدود ۴/۵٪) از کل مساحت دارند. این نتایج نشان می‌دهد که وسعت و تداوم پهنه‌های دارای آب‌گرفتگی پایدار و نیمه‌دائمی در تالاب میقان کاهش یافته است.

الگوریتم Seasonality به‌روشنی نشان می‌دهد که الگوی هیدرولوژیک حاکم بر تالاب میقان، الگویی کاملاً ناپایدار، فصلی و وابسته به تغذیه مقطعی است. غلبه کلاس‌های خشک و کم‌دوام (۰ تا ۵ ماه) و ناچیز بودن سهم پهنه‌های با پایداری آبی بالا (۶ ماه به بالا)، حاکی از فشار شدید بر منابع آب و تغییرات نامطلوب در رژیم هیدرولوژیکی این اکوسیستم ارزشمند است. این وضعیت، پیامدهایی همچون تشدید تبخیر، گسترش کانون‌های نمکی، فرسایش بادی و کاهش کارکردهای زیستی تالاب را در پی دارد؛ بنابراین، پایش مستمر این تغییرات با فناوری سنجش‌ازدور، برای مدیریت و احیای این تالاب ضروری است.

جدول ۴. مساحت پهنه‌های آبگیر تالاب میقان به روش Seasonality

تعداد ماه‌های آبدار	مساحت پهنه‌ها (کیلومتر مربع)	درصد مساحت آبدار به مساحت کل
۰	۲۸/۸	۲۵
۱	۷/۶	۶/۶
۲	۹	۷/۸
۳	۱۶/۶	۱۴/۵
۴	۲۰/۳	۱۷/۶
۵	۲۷/۵	۲۳/۹
۶	۱/۶	۱/۴
۷	۰/۵	۰/۵
۸	۰/۲	۰/۲
۹	۰/۷	۰/۶
۱۰	۲	۱/۸

بحث

بررسی تغییرات پهنه آبی تالاب میقان در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور لندست و شاخص NDWI در محیط گوگل‌ارث نشان داد که این تالاب طی سه دهه اخیر با کاهش معنادار در وسعت و پایداری هیدرولوژیک مواجه بوده است. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین در این تالاب همخوانی دارد. خانقلی و همکاران (۱۳۹۷) کاهش قابل توجه سطح آب تالاب میقان طی دو دهه را گزارش کرده و بر فاصله معنادار وضعیت فعلی با نیاز آبی بوم‌شناختی تالاب تأکید کرده‌اند. همچنین فیض‌اله‌پور (۱۴۰۲) با استفاده از شاخص‌های طیفی و مدل ماشین بردار پشتیبان، کاهش سطح آب تالاب میقان را طی دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ تأیید کرده است.

نتایج تحلیل دهه‌ای نشان داد میانگین مساحت پهنه آبی از ۱۰,۷ کیلومترمربع در دهه نخست به ۳,۹ کیلومترمربع در دهه دوم کاهش یافته و سپس در دهه سوم به ۱۹,۸ کیلومترمربع افزایش یافته است. با این حال، تحلیل هم‌زمان شاخص‌های Transition و Seasonality نشان داد که این افزایش عمدتاً ناشی از گسترش پهنه‌های فصلی و رخدادهای ترسالی کوتاه‌مدت، به‌ویژه در سال ۲۰۱۹، بوده و بیانگر بازپایی پایدار سامانه آبی تالاب نیست. حداقل مساحت ثبت‌شده (۰,۱ کیلومترمربع در سال ۱۹۹۹) نیز حساسیت زیاد تالاب نسبت به خشک‌سالی و شکنندگی هیدرولوژیکی آن را نشان می‌دهد. یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش‌های پیشین درباره پویایی تالاب میقان همخوانی دارد. انصاری و گلابی (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و مدل تغییرات کاربری اراضی نشان دادند که تالاب میقان و پهنه‌های پیرامون آن در طول زمان دچار تغییرات قابل توجهی شده‌اند و مساحت پهنه آبی آن‌ها کاهش یافته است. آنان همچنین تغییرات پوشش تالابی و توسعه برخی کاربری‌های انسانی، از جمله اثرات مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی، معدنی و ورود پساب تصفیه‌خانه اراک، را از عوامل مؤثر بر پویایی محیطی منطقه دانستند. این نتایج بر ناپایداری و حساسیت بالای سامانه تالاب میقان نسبت

به تغییرات هیدرولوژیکی و فشارهای انسانی تأکید دارد.

کارایی شاخص NDWI در استخراج پهنه‌های آبی نیز با مطالعات داخلی و بین‌المللی مطابقت دارد. خسرویان و همکاران (۱۳۹۶) دقت بالای این شاخص را در پایش دریاچه پریشان گزارش کردند. همچنین پکل و همکاران (۲۰۱۶) و گتانه و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که ترکیب تصاویر لندست با گوگل‌ارث امکان پایش دقیق و بلندمدت تغییرات پهنه‌های آبی را در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌کند.

الگوی کاهش بلندمدت سطح آب، همراه با تغییرات قابل توجه بین‌سالی، با نتایج فرجی و فاطمی (۱۴۰۱) مطابقت دارد که ارتباط رژیم هیدرولوژیکی تالاب میقان با تغییرات بارش و خشک‌سالی را نشان دادند. افزون بر این، روند مشاهده‌شده در میقان مشابه تغییرات ثبت‌شده در سایر تالاب‌های ایران از جمله دریاچه ارومیه، هامون، بختگان و گاوخونی است؛ به‌گونه‌ای که برهم‌کنش تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی موجب کاهش پایداری هیدرولوژیکی این سامانه‌ها شده است.

تحلیل فصلی نیز نشان داد بیشترین آبگیری در زمستان و بهار و کمترین آن در تابستان و پاییز رخ می‌دهد که با الگوی بارش و تبخیر مناطق نیمه‌خشک ایران سازگار است. همچنین نتایج Seasonality نشان داد بخش عمده تالاب تنها چند ماه در سال دارای آب است و پهنه‌های با آبگیری دائمی سهم اندکی دارند. این وضعیت نشان‌دهنده غلبه رژیم آبگیری موقت و ناپایدار بوده و با نتایج مطالعات انجام‌شده بر تالاب هامون و سایر تالاب‌های مناطق خشک ایران همخوانی دارد.

درنهایت، تحلیل الگوریتم Transition نشان داد که اگرچه هسته مرکزی تالاب تا حدودی پایداری خود را حفظ کرده است، گسترش کلاس فصلی جدید و جابه‌جایی کلاس‌های آبی بیانگر تغییر در دینامیک مکانی آب است. این تغییرات احتمالاً تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی، افزایش برداشت آب و افت سطح آب زیرزمینی قرار دارد که در مطالعات جباری و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از سری زمانی تصاویر لندست، شاخص NDWI و توان پردازشی سامانه گوگل‌ارث، تغییرات بلندمدت پهنه آبی تالاب میقان را طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ پایش و تحلیل کرد. نتایج نشان داد که اگرچه وسعت پهنه آبی تالاب در برخی سال‌های ترسالی به‌طور موقت افزایش یافته است، اما روند کلی بیانگر کاهش پایداری هیدرولوژیکی و افزایش وابستگی رژیم آبگیری تالاب به رخداد‌های بارشی کوتاه‌مدت است. تحلیل‌های دهه‌ای، فصلی و سالانه همراه با خروجی‌های Transition و Seasonality نشان دادند که بخش عمده تالاب تنها برای مدت محدودی از سال دارای آب بوده و سهم پهنه‌های با آبگیری پایدار بسیار محدود است؛ موضوعی که بیانگر تبدیل تدریجی تالاب از یک سامانه نسبتاً پایدار به یک اکوسیستم عمدتاً فصلی است.

این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب تغییرات اقلیمی، کاهش ورودی‌های سطحی، افت منابع آب زیرزمینی و فشارهای ناشی از توسعه فعالیت‌های انسانی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش تاب‌آوری هیدرولوژیکی تالاب میقان هستند. تداوم این روند می‌تواند مخاطرات زیست‌محیطی متعددی از جمله گسترش کانون‌های گرد و غبار نمکی، افزایش فرسایش بادی، کاهش تنوع زیستی و تضعیف خدمات اکوسیستمی تالاب را به دنبال داشته باشد.

از نظر روش‌شناسی، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از تصاویر لندست در بستر گوگل‌ارث رویکردی سریع، کم‌هزینه، تکرارپذیر و قابل اعتماد برای پایش بلندمدت تغییرات پهنه‌های آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند. همچنین تلفیق سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های جهانی JRC امکان ارزیابی هم‌زمان تغییرات مکانی، پایداری و الگوی فصلی آبگیری را فراهم ساخته و اطلاعات ارزشمندی برای پایش مستمر تالاب‌ها ارائه می‌دهد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، تأمین و پایش حقایق زیست‌محیطی تالاب، مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه آبخیز، کنترل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی و استقرار سامانه‌های پایش ماهواره‌ای مستمر، از مهم‌ترین راهکارهای حفظ پایداری اکولوژیکی تالاب میقان به شمار می‌روند. افزون بر این، به‌کارگیری داده‌های با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر، نظیر Sentinel-1 و Sentinel-2، تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با مدل‌های

هیدرولوژیکی و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای استخراج خودکار پهنه‌های آبی، می‌تواند دقت پایش تغییرات و شناخت عوامل مؤثر بر پویایی تالاب را در مطالعات آینده افزایش دهد.

با وجود نتایج قابل اتکا و کارایی مناسب رویکرد به‌کاررفته، توسعه این پژوهش در مطالعات آینده می‌تواند به غنای بیشتر نتایج منجر شود. بهره‌گیری از داده‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های هیدرولوژیکی هم‌زمان با تصاویر ماهواره‌ای، امکان ارزیابی دقیق‌تر تغییرات سطح آب و اعتبارسنجی مستقل نتایج را فراهم خواهد کرد. همچنین، تلفیق تصاویر اپتیک با داده‌های راداری و داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی می‌تواند در تبیین جامع‌تر عوامل مؤثر بر تغییرات پهنه آبی مؤثر باشد. با این حال، استفاده از سری زمانی ۲۵ ساله تصاویر لندست، داده‌های جهانی JRC و پردازش ابری در محیط گوگل‌ارث، چارچوبی قابل اعتماد، تکرارپذیر و کارآمد برای پایش بلندمدت پویایی پهنه‌های آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم کرده است و نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات مشابه و تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب و حفاظت از تالاب‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- انصاری، امیر (۱۳۹۷). ارزیابی و شناخت وضعیت محیط‌زیست تالاب میقان اراک جهت تدوین برنامه توسعه پایدار. *پژوهش‌های محیط‌زیست*، ۹(۱۷)، ۲۹-۴۲.
- خالدی، شهریار (۱۳۸۵). احیای کویر میقان. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۵(۶-۷)، ۱۳۳-۱۵۶.
- خانقلی، الهه؛ نادری، مرتضی؛ هادی‌پور، مهرداد؛ عالی‌پور اردی، مهدی (۱۳۹۷). برآورد حداقل نیاز آبی محیط‌زیستی تالاب کویری میقان. *اکیوبولوژی تالاب*، ۱۰(۳)، ۹۱-۱۰۲.
- خسروی‌ان، مریم؛ انتظار، علیرضا؛ رحمانی، ابوالفضل؛ باعقیده، محمد (۱۳۹۶). پایش تغییرات سطح آب دریاچه پریشان با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور. *نشریه هیدروژئومورفولوژی*، ۱۳، ۹۹-۱۲۰.
- رضوی‌زاده، سمانه؛ درگاهیان، فاطمه؛ تیموری، سارا؛ گوهردوست، آزاده (۱۴۰۳). بررسی تغییرات پهنه‌های سیل‌گیر هامون‌های سیستان در سامانه Google Earth Engine. *مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۱۸(۶۷)، ۱۶-۳۰.
- روحانی، نیما؛ راجایی، طاهر؛ مجردی، برات؛ جباری، احسان؛ شفیعی‌دارایی، سید احمد؛ حیدری بنی، مهران (۱۴۰۰). مطالعه اقلیمی تغییرات منابع عمده آب استان قم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و فناوری سنجش‌ازدور. *فصلنامه علمی-پژوهشی علوم محیطی*، ۱۹(۱)، ۲۳۹-۲۵۸.
- فرجی، مرجان؛ فاطمی نصرآبادی، سید باقر (۱۴۰۱). بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های آب مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور پایش تغییرات سطح پهنه‌های آبی با کمک سامانه گوگل‌ارث انجین (مطالعه موردی: تالاب میقان اراک). *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۱۰(۲)، ۳۹-۶۲.
- فرمehنی فراهانی، محسن؛ درویش، محمد (۱۳۹۰). بررسی تأثیر ژئومورفولوژی و سازندهای تبخیری بر هیدرولوژی تالاب میقان. *ژئوتکنیک و محیط‌زیست*، ۶۲(۷)، ۱۳۴۵-۱۳۵۶.
- فیض‌اله‌پور، مهدی (۱۴۰۲). تشخیص تغییرات پهنه آبی تالاب میقان با بهره‌گیری از شاخص‌های طیفی NDWI، MNDWI و AWEI و مدل‌های نظارت‌شده SVM در بازه زمانی ۱۳۷۳-۱۴۰۱. *فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۴(۵۴)، ۱۰۴-۱۱۹.

References

- AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., Nasrollahi, N., Farahmand, A., Mehran, A., & Hasanazadeh, E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: Call for action. *Journal of Great Lakes Research*, 41(2), 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.02.012>
- Ahrari, A., Sharifi, A., & Haghighi, A. T. (2024). Anthropogenic vs. climatic drivers: Dissecting lake desiccation on the Iranian plateau. *Journal of Environmental Management*, 368, 122103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122103>
- Alibakhshi, Z., Alikhah Asl, M., Rezavani, M., & Namdar, M. (2015). An evaluation of Miqan wetland changes over a 12-year interval and proposing management approaches: A remote-

- sensing perspective. *Desert*, 21(1), 42-48. (In Persian)
- Alonso, A., Muñoz-Carpena, R., & Kaplan, D. (2020). Coupling high-resolution field monitoring and MODIS for reconstructing wetland historical hydroperiod at high temporal frequency. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111807. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111807>
- Ansari, A. (2018). Evaluation and recognition of the environmental status of Meyghan Wetland in Arak for developing a sustainable development plan. *Environmental Researches*, 9(17), 29-42. (In Persian)
- Ansari, A., & Golabi, M. H. (2019). Prediction of spatial land use changes based on LCM in a GIS environment for Desert Wetlands – A case study: Meyghan Wetland, Iran. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(1), 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.10.001>
- Bino, G., Kingsford, R. T., & Brandis, K. (2016). Australia's wetlands – learning from the past to manage for the future. *Pacific Conservation Biology*, 22(2), 116-129.
- Bolloorani, A. D., Najafi, M. S., & Mirzaie, S. (2021). Role of land surface parameter change in dust emission and impacts of dust on climate in Southwest Asia. *Natural Hazards*, 109(1), 1131-1155. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04802-1>
- Donnelly, P., Moore, J. N., Kimball, J. S., et al. (2025). Going, going, gone: Landscape drying reduces wetland function across the American West. *Ecological Indicators*, 171, 113172. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113172>
- Ebrahimikhusfi, Z., Khosroshahi, M., Naeimi, M., & Zandifar, S. (2019). Evaluating and monitoring of moisture variations in Meyghan wetland using the remote sensing technique and the relation to the meteorological drought indices. *RS & GIS for Natural Resources*, 10(2), 14–27.
- Faraji, M., & Fatemi Nasrabadi, S. B. (2022). A comparative study of water indices extracted from satellite images for monitoring changes in water bodies using Google Earth Engine (Case study: Meyghan Wetland, Arak). *Spatial Information Technology Engineering*, 10(2), 39-62. (In Persian)
- Farmeini Farahani, M., & Darvish, M. (2011). Investigation of the effect of geomorphology and evaporative formations on the hydrology of Meyghan Wetland. *Geotechnics and Environment*, 62(7), 1345-1356. (In Persian)
- Feyzolahpour, M. (2023). Detection of water body changes in Meyghan Wetland using NDWI, MNDWI, AWEI spectral indices and SVM supervised models in the period 1994-2022. *Quarterly Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 14(54), 104-119. (In Persian)
- Getaneh, Y., Abera, W., Abegaz, A., & Tamene, L. (2024). Surface water area dynamics of the major lakes of Ethiopia (1985–2023): A spatio-temporal analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104007. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104007>
- Halabisky, M., Moskal, L. M., Gillespie, A., & Hannam, M. (2016). Reconstructing semi-arid wetland surface water dynamics through spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 177, 171-183.
- Iglar, L., Schlaffer, S., Büechi, E., & Dorigo, W. (2023). Data-driven modelling of steppe wetland variability in eastern Austrian Seewinkel using satellite-derived water extent and climatological and groundwater data. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU23-12314. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12314>
- Jabbari, E., Fathi, M., & Moradi, M. (2020). Modeling groundwater quality and quantity to manage water resources in the Arak aquifer, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), 663. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05681-4>
- Kazemi, M., et al. (2023). Analysis of land use changes in the Meyghan Wetland watershed and its impact on wetland hydrology. *Quarterly Journal of Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 14(2), 67-82. (In Persian)
- Khaledi, Sh. (2006). Rehabilitation of Meyghan Desert. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 5(6-7), 133-156. (In Persian)
- Khangholi, E., Naderi, M., Hadipour, M., & Alipour Ardi, M. (2018). Estimation of minimum environmental water requirement of Meyghan Desert Wetland. *Wetland Ecobiology*, 10(3), 91-102. (In Persian)

- Khosravian, M., Entezari, A., Rahmani, A., & Bagheideh, M. (2017). Monitoring of water level changes in Parishan Lake using remote sensing indices. *Journal of Hydrogeomorphology*, 13, 99-120. (In Persian)
- 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>
- Mahdavi, S., Najafi Ghojgan, A., & Hosseini, S. A. (2013). Monitoring of surface changes in Meyghan Salt Lake, Arak using remote sensing and GIS. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 18(50), 73-91. (In Persian)
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). Wetlands (5th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Ozesmi, S. L., & Bauer, M. E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 10(5), 381-402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Razavizadeh, S., Dargahian, F., Teymouri, S., & Gohardoost, A. (2024). Investigation of floodplain changes in Sistan Hamouns using Google Earth Engine. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 18(67), 16-30. (In Persian)
- Rostami, E., Vahid, R., Zarei, A., & Amani, M. (2024). Dynamic analysis of water surface extent and climate change parameters in Zarivar Lake, Iran. *Environmental Sciences Proceedings*, 29(1), 71. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-17345>
- Rouhani, N., Rajaei, T., Mojaradi, B., Jabbari, E., Shafiei Darabi, S. A., & Heidari Bani, M. (2021). Climatic study of major water resources changes in Qom province using satellite data and remote sensing technology. *Quarterly Journal of Environmental Sciences*, 19(1), 239-258. (In Persian)
- Ward, D. P., Hamilton, S. K., Jardine, T. D., Pettit, N. E., Tews, E. K., Olley, J. M., & Bunn, S. E. (2013). Assessing the seasonal dynamics of inundation. *Ecohydrology*, 6(2), 312-323.