



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 15
No. 2 (58)

Received:
2025-05-28

Accepted:
2025-10-04

Pages: 93-104

Spectral analysis of surface water pollution using spectral indices NDWI, WQI, and WPI (Case study: Meyghan wetland, Markazi province)

Hadi Lotfi¹, Amirhossein Mohammadi^{2*} and Mehdi Feizollahpour³

- 1) Bachelor's student in Geography, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
- 2) Bachelor's student in Geography, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
- 3) Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

*Corresponding author emails: mohammadi.znu.ac@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: Wetlands, as sensitive and dynamic ecosystems, play a fundamental role in environmental sustainability, regulating ecological cycles, moderating local climates, and providing vital water resources. These ecosystems not only preserve biodiversity but also contribute to floods control, groundwater recharge, and air quality improvement. The present study aims to monitor and evaluate changes in the water surface and environmental quality of the Meyghan Wetland during the period from 2000 to 2024. In this research, remote sensing data and spectral indices related to water and surface cover were employed to analyze the spatial and temporal variations of the wetland, in order to identify and assess potential trends of degradation or improvement in its environmental conditions of this water body.

Method: In this study, time-series satellite data from Landsat 7, 8, and 9 covering the period 2000 to 2024 were used to examine changes in the surface and quality of the wetland's water. The satellite images were first geometrically and radiometrically corrected and then processed in ArcGIS Pro software. For more accurate analysis, the spectral indices NDWI, WQI, and WPI were extracted, and their values were calculated using standard formulas based on spectral reflectance. Subsequently, the spatial and temporal variations of each index were analyzed to determine trends in water level fluctuations and environmental quality changes throughout the study period. Finally, the results were presented as classified maps and analytical charts, allowing for a clear and precise visualization of the quantitative and qualitative changes in the wetland over time.

Results: The findings of this study revealed that three spectral indices—NDWI, WQI, and WPI—were analyzed to assess changes in the water level and quality of Miqan Wetland from 2000 to 2024. NDWI results showed a continuous decline in the wetland's surface water area, from 3.7 km² in 2000 to approximately 0.7 km² in 2024, reflecting gradual drying and reduced water inflows. The WQI, which evaluates water quality, indicated a shift from "excellent" and "good" conditions in the early years to "moderate" and "poor" conditions in the later years; areas of high water quality decreased to less than 1 km² by 2024. WPI results confirmed an increasing trend of pollution, rising from about 0.9 in 2000 to over 1 in 2024, indicating the expansion of polluted areas and a significant decline in water quality. Comparison of WQI and WPI demonstrated an inverse relationship, where increased pollution (higher WPI) corresponded to reduced water quality (lower WQI). These results suggest that the wetland is significantly affected by anthropogenic and climatic pressures, underscoring the urgent need for conservation and management interventions.

Conclusion: The results obtained from the analysis of spectral indices indicated a significant decline in the water surface area of the Meyghan Wetland between 2000 and 2024, decreasing from approximately 3.7 square kilometers to less than 0.8 square kilometers. Simultaneously, water quality also deteriorated considerably. The WQI index revealed a shift from "good" and "excellent" quality to "moderate" and "poor" conditions across various parts of the wetland. The WPI index further confirmed increased pollution levels and the expansion of critically affected zones in the later years. These findings suggest that the wetland has been impacted by a combination of reduced water inflows, climate change, and increased discharge of human-induced pollutants. The application of remote sensing indices, particularly within the ArcGIS Pro environment, enabled accurate and cost-effective monitoring of water resources. Overall, the study underscores the urgent need for immediate management strategies to protect and restore this valuable ecosystem.

Keywords: Remote Sensing, Meyghan Wetland, Environmental Monitoring, Water Pollution, Water Quality



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۲

صفحات: ۹۳-۱۰۴

تحلیل طیفی آلودگی آب‌های سطحی با استفاده از شاخص‌های طیفی NDWI، WQI و WPI (مطالعه موردی: تالاب میقان استان مرکزی)

هادی لطفی^۱، امیرحسین محمدی^{۲*} و مهدی فیض‌الله پور^۳

(۱) دانشجوی کارشناسی جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(۳) دانشیار، گروه جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: mohammadi.znu.ac@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: تالاب‌ها به‌عنوان زیست‌بوم‌های حساس و پویا، نقشی اساسی در پایداری محیط‌زیست، تنظیم چرخه‌های اکولوژیکی، تعدیل اقلیم‌های محلی و تأمین منابع آبی حیاتی دارند. این اکوسیستم‌ها علاوه بر حفظ تنوع زیستی، در کنترل سیلاب‌ها، تغذیه آب‌های زیرزمینی و بهبود کیفیت هوا نیز مؤثر هستند. پژوهش حاضر با هدف بررسی و پایش تغییرات سطح آب و کیفیت زیست‌محیطی تالاب میقان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام شده است. در این مطالعه، از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های طیفی مرتبط با آب و پوشش سطحی به‌منظور تحلیل تغییرات مکانی و زمانی تالاب بهره گرفته شده تا روندهای احتمالی تخریب یا بهبود شرایط زیست‌محیطی این پهنه آبی شناسایی و ارزیابی شود.

روش پژوهش: در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای سری زمانی لندست ۷، ۸ و ۹ در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به‌منظور بررسی تغییرات سطح و کیفیت آب تالاب استفاده گردید. تصاویر ماهواره‌ای پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک، در محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro پردازش شدند. برای تحلیل دقیق‌تر، شاخص‌های طیفی NDWI، WQI و WPI استخراج شده و به کمک روابط استاندارد مبتنی بر بازتاب طیفی، مقدار هر شاخص محاسبه گردید. سپس، تغییرات مکانی و زمانی هر شاخص در طول دوره مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت تا روند کاهش یا افزایش سطح آب و تغییر در کیفیت زیست‌محیطی آن مشخص شود. در ادامه، نتایج حاصل به‌صورت نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده و نمودارهای تحلیلی ارائه شدند تا تغییرات کمی و کیفی تالاب در گذر زمان به‌صورت دقیق و قابل‌فهم نمایش یابد.

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان داد که سه شاخص طیفی NDWI، WQI و WPI برای بررسی تغییرات سطح و کیفیت آب تالاب میقان در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ تحلیل شد. نتایج شاخص NDWI نشان داد که سطح آبی تالاب به‌طور پیوسته کاهش یافته و از ۳،۷ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به حدود ۰،۷ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۴ رسیده است. این روند نزولی بیانگر خشکیدگی تدریجی و کاهش ورودی‌های آبی است. شاخص WQI که کیفیت آب را ارزیابی می‌کند، نشان داد که وضعیت از «عالی» و «خوب» در سال‌های ابتدایی به «متوسط» و «ضعیف» در سال‌های پایانی تغییر یافته است؛ به‌طوری‌که مناطق با کیفیت بالا در سال ۲۰۲۴ به کمتر از ۱ کیلومترمربع کاهش یافته‌اند. شاخص WPI نیز روند افزایشی آلودگی را تأیید کرد، به‌گونه‌ای که مقدار آن از حدود ۰،۹ در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۱ در سال ۲۰۲۴ رسیده و نشان‌دهنده گسترش نواحی آلوده و افت شدید کیفیت آب است. مقایسه شاخص‌های WQI و WPI نشان داد با افزایش آلودگی (افزایش WPI)، کیفیت آب (کاهش WQI) به‌طور معکوس کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد تالاب تحت فشار عوامل انسانی و اقلیمی به‌شدت آسیب‌پذیر شده و نیازمند برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی فوری است.

نتایج: نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل شاخص‌های طیفی نشان داد که سطح آب تالاب میقان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به‌شکل چشم‌گیری کاهش یافته و از حدود ۳،۷ کیلومتر مربع به کمتر از ۰،۸ کیلومتر مربع رسیده است. هم‌زمان، کیفیت آب نیز دچار افت قابل توجهی شده و شاخص WQI نشان‌دهنده تغییر وضعیت از کیفیت «خوب» و «عالی» به «متوسط» و «ضعیف» در بخش‌های مختلف تالاب است. شاخص WPI نیز افزایش آلودگی و گسترش نواحی با شرایط بحرانی را در سال‌های پایانی تأیید کرد. این یافته‌ها مؤید آن است که تالاب تحت تأثیر ترکیبی از کاهش ورودی‌های آبی، تغییرات اقلیمی و افزایش تخلیه آلاینده‌های انسانی قرار گرفته است. به‌کارگیری شاخص‌های سنجش از دور، به‌ویژه در محیط ArcGIS Pro، امکان پایش دقیق و مقرون‌به‌صرفه منابع آبی را فراهم نموده است. در مجموع، نتایج پژوهش اهمیت راهکارهای مدیریتی فوری برای حفاظت و احیای این زیست‌بوم ارزشمند را برجسته می‌سازد.

کلید واژه‌ها: آلودگی آب، تالاب میقان، پایش زیست‌محیطی، سنجش از دور، کیفیت آب

مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی تالاب‌ها این است که محل تامین آب و غذای انسان‌ها هستند و همین موضوع، ارزش و اهمیت تالاب را در زندگی انسان نشان می‌دهد و دلیلی است برای محافظت و نگهداری از آن‌ها (Rezaei & Rezaei, Moghadam, 2024). آب‌های سطحی از جمله مهم‌ترین منابع تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب به شمار می‌روند. با این حال، افزایش جمعیت، توسعه نامتوازن شهری و تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی منجر به کاهش کیفیت این منابع و تهدید اکوسیستم‌های وابسته به آن شده است (Gholizadeh et al., 2016). پایش کیفی این منابع با روش‌های سنتی نمونه‌برداری، اگرچه دقیق است، اما از نظر زمانی، مکانی و اقتصادی محدودیت‌هایی دارد. در این میان، فناوری سنجش از دور به‌عنوان ابزاری کارآمد و غیرفعال، امکان ارزیابی مداوم، گسترده و نسبتاً کم‌هزینه وضعیت کیفی منابع آبی را فراهم کرده است (Feyisa et al., 2014).

با توجه به کمبود منابع آب‌های سطحی در ایران توجه به کیفیت آب دارای اهمیت است. افزون بر این، توسعه گردشگری طبیعت در تالاب‌ها می‌تواند موجب افزایش درآمد و بهبود معیشت جوامع محلی شود. بررسی اثرات محیط‌زیستی گردشگری در تالاب میناب-تیاب نشان داد که این فعالیت‌ها تأثیرات مثبت و قوی روی مولفه‌های اجتماعی-فرهنگی و اقتصادی منطقه داشته‌اند (Rahimi et al, 2024). شناسایی و پایش آب‌های سطحی با استفاده از سنجش از دور بدلیل اهمیت در تامین نیازهای بشر و همچنین تصمیم‌گیری‌های سیاسی در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است (Saghafi et al, 2022). تالاب‌ها به تغییرات محیطی و آب و هوایی وابسته‌اند. بنابراین، پایش تغییرات پهنه‌های آبی تالاب اهمیت زیادی دارد (Hajarian et al, 2021).

تالاب میقان به عنوان یکی از تالاب‌های مهم زمستان‌گذرانی پرندگان آبی و کنارآبی در مرکز کشور طی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ میلادی بوده است (Mohammadi et al, 2021). حوزه آبخیز میقان (دشت اراک)، در برگرنده تالاب میقان، یکی از مهم‌ترین دشت‌هایی است که بخش قابل توجهی از آب شرب شهر اراک و بسیاری از چاه‌های کشاورزی از آن تأمین می‌شود (Sadeghi & Akhoundi, 2023). از این رو مطالعه و بررسی تغییرات تالاب میقان از اهمیت زیادی برخوردار است.

در ایران نیز تحقیقات متعددی در حوزه تالاب‌ها صورت پذیرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهشی از خسروی یگانه و غفاری مقدم، در سال (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان برآورد تغییرات سطح آب و پوشش گیاهی در تالاب شادگان با استفاده از سنجش از دور، در نشریه پژوهش‌های

کاربردی مهندسی آب، اشاره نمود. هدف از این پژوهش بررسی و آشکار سازی تغییرات NDVI و NDWI در تالاب شادگان با استفاده از روش سنجش از دور بوده و از تصاویر لندست در دوره زمانی (۲۰۲۰-۱۹۷۲) در ماه ژوئن به بررسی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که در سال ۱۹۷۵ تا ۱۹۷۸ بیش از پنجاه درصد سطح تالاب از آب پوشیده شده اما در سال ۱۹۸۰ میزان پوشش سطح آب به ۱۵ درصد کاهش رسیده است. کاهش و افزایش یافتن سطح آب تالاب در یک سال بعد دچار تغییر می‌گردد و تغییرات سال به سال آن زیاد است. براساس نتایج حاصل شده مشخص گردید که در بخش آبگیر تالاب، آب موجودی در این تالاب دارای نوسان زیادی است. در دوره ی مورد مطالعه ۲۳ سال آب موجود در این بخش کمتر از ۵۰ درصد است (Khosravi Yegane & Ghafari Moghadam, 2025).

در پژوهشی دیگر از سفیدیان و همکاران در سال (۱۴۰۲) در مقاله‌ای با عنوان اثرات تغییرات پوشش زمین و پارامترهای آبی-اقلیمی بر وسعت و ماهیت تالاب‌های بین المللی آلاگل، آجی گل و آلاگل در سه دهه گذشته، در نشریه محیط زیست طبیعی، به مطالعه درباره این موضوع پرداخته‌اند. در این پژوهش، تغییرات متغیرهای هیدرولوژیک، اقلیمی و پوشش/کاربری زمین در دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ بررسی شده است. نتایج بررسی داده‌های ۳۴ ساله نشان دادند که با وجود نوسانات دما، بارش و تبخیر، کاهش دبی رودخانه اترک و مساحت تالاب‌ها بیشتر ناشی از گسترش مراتع، علفزارها و کشاورزی متراکم و در نتیجه افزایش برداشت آب است. روند کلی تالاب‌ها به سمت فصلی شدن بستر دائمی آن‌هاست و تغییرات اقلیمی نقش کمتری در این کاهش دارد (Sefidian et al, 2023).

در پژوهشی از آقامیری و همکاران در سال (۱۴۰۲) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی شاخص SDI، NDWI، NDMI و AWEI در استخراج خطوط ساحلی و مساحت پیکره آبی تالاب شادگان، در نشریه اکوبیولوژی تالاب، به مطالعه این موضوع پرداخته‌اند. در این پژوهش، شاخص‌های NDWI، MNDWI، NDMI و AWEI با استفاده از تصاویر سنجنده‌های TM لندست ۷ و OLI لندست ۸ در بازه زمانی یک دهه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد دقت کلی روش‌ها بین ۶۴ تا ۸۹ درصد متغیر است. شاخص NDMI با دقت ۸۹ درصد و RMSE برابر ۵۲/۹۴ متر بهترین عملکرد را در تعیین حدود تالاب داشت، در حالی که NDWI با دقت ۶۴ درصد و RMSE برابر ۹۸/۱۶۵ متر ضعیف‌ترین بود. همچنین، تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ نسبت به TM لندست ۷ دقت بالاتری دارند. افزایش شاخص پیشروی خط ساحلی (SDI) طی یک دهه بیانگر کاهش مساحت تالاب شادگان و افزایش طول خط ساحلی است (Aghamiri et al, 2023).

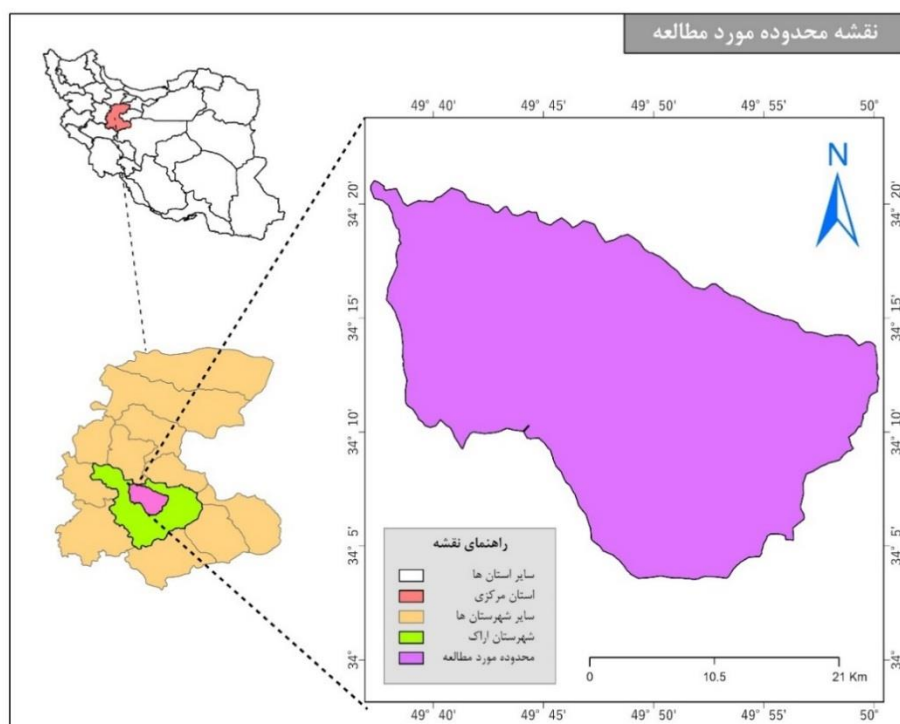
از تصاویر با پوشش ابری کمتری از ۴ درصد استفاده شود تا خللی در تحلیل تصاویر بوجود نیاید. پوشش زمانی مستمر لندست (از سال ۱۹۷۲ تاکنون) و دوره بازگشت ۱۶ روزه، امکان تحلیل تغییرات فصلی و بلندمدت را فراهم می‌کند به همین جهت استفاده از این داده‌ها جهت بررسی تغییرات تالاب میقان امری مفید می‌باشد. پس از اخذ تصاویر با استفاده از شاخص‌های طیفی $NDWI^1$ ، WQI^2 و WPI^3 در محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro به تحلیل طیفی تالاب میقان پرداخته شد. تصاویر تحلیل طیفی یکی از تکنیک‌های بنیادین در سنجش از دور است که بر اساس ویژگی‌های طیفی مواد سطح زمین، امکان شناسایی و طبقه‌بندی پدیده‌های جغرافیایی را فراهم می‌کند. این روش با استفاده از داده‌های چندطیفی و فرایطیفی، امواج الکترومغناطیسی بازتاب‌شده یا ساطع‌شده از سطح زمین را تحلیل می‌کند تا اطلاعاتی درباره پوشش گیاهی، خاک، آب، و کاربری اراضی به دست آورد (Jensen, 2009). تحلیل طیفی در سنجش از دور بر اساس امضای طیفی^۴ مواد مختلف عمل می‌کند هر ماده، مانند پوشش گیاهی، آب، یا خاک، الگوی بازتاب یا جذب منحصر به فردی در طول موج‌های مختلف دارد که می‌توان آن را با حسگرهای چندطیفی یا فرایطیفی ثبت کرد (Richards & Jia, 2022). پس از استخراج شاخص‌های طیفی، با استفاده از قابلیت Reclassify تصاویر به پنج کلاس، طبقه‌بندی شدند. سپس مقدار مساحت هر طبقه به کیلومتر مربع و درصد مساحت هر طبقه بدست آمد. این امر برای تمامی سال‌ها تکرار شد و میزان تغییرات مساحت و درصد مساحت محاسبه گردید.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تحولات فضایی و زمانی و پایش تغییرات سطح آب و کیفیت آن در تالاب میقان در استان مرکزی طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از شاخص‌های به‌روز طیفی سنجش از دور است. در این مطالعه، داده‌های ماهواره‌ای لندست و شاخص‌های طیفی نظیر $NDWI$ و WQI و WPI برای پایش تغییرات سطح آب و ارزیابی کیفیت آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

تالاب میقان در ۱۵ کیلومتری شمال شرقی شهر اراک، در نزدیکی شهر داودآباد و در دشت فراهان استان مرکزی، ایران قرار دارد. مختصات جغرافیایی آن $29^{\circ} 34'$ تا $52^{\circ} 34'$ عرض شمالی و $49^{\circ} 13'$ تا $55^{\circ} 50'$ طول شرقی است و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۷۰۰ متر می‌باشد. این تالاب در یک حوضه آبریز بسته با مساحت حدود ۵۵۰،۰۰۰ هکتار بین رشته‌کوه‌های زاگرس و کوه‌های مرکزی ایران واقع شده و مساحت خود تالاب بسته به فصل بین ۱۰،۰۰۰ تا ۲۵،۰۰۰ هکتار متغیر است (Amini & Gholami, 2017; Mohammadi et al., 2019).

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر از درگاه اینترنتی <https://earthexplorer.usgs.gov> اخذ شده که شامل مجموعه داده‌های ماهواره‌های لندست ۵ با سنجنده TM برای سال ۲۰۰۰، لندست ۷ با سنجنده ETM+ برای سال ۲۰۰۶ و ۲۰۱۲، لندست ۸ با سنجنده OLI برای سال ۲۰۱۸ و لندست ۹ با سنجنده TRIS برای سال ۲۰۲۴ می‌باشد. در انتخاب تصاویر ماهواره‌ای تلاش شد



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه، منبع: نگارندگان

و آب‌های زیرزمینی است (Mukate et al., 2019). شاخص WPI در تحلیل خطرات مرتبط با آلودگی آب‌های آشامیدنی، به‌ویژه در مناطق شهری با منابع آبی محدود، نقش کلیدی دارد (Banda & Kumarasamy, 2020). این شاخص به مدیران شهری کمک می‌کند تا نقاط بحرانی آلودگی را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند بهبود سیستم‌های تصفیه را اجرا کنند (ALKzwini, 2022 & Al-Kareem). برای نمونه، در مطالعه‌ای در رودخانه گپ در کره جنوبی، WPI برای ارزیابی تأثیر فاضلاب‌های شهری بر کیفیت آب استفاده شد (Kim et al., 2019). این شاخص طیفی از باندهای طیفی قرمز، آبی، سبز و باند مادون قرمز نزدیک تشکیل یافته که در رابطه ۳ بیان شده است:

$$WPI = \frac{\text{Blue} + \text{Red}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

نتایج و بحث

منطقه مورد مطالعه با استفاده از سه شاخص طیفی NDWI، WQI و WPI مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از شاخص‌های مذکور ابتدا تغییرات پهنه آبی تالاب مورد مطالعه قرار گرفت و میزان آلودگی محدوده مورد مطالعه، بررسی شد. مقادیر هر یک از شاخص‌ها برای بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۶، ۲۰۱۲، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۴ محاسبه شده و نمایش داده شد.

شاخص NDWI (Normalized Difference Water Index) برای شناسایی مناطق آبی و پایش رطوبت سطحی در تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. مقادیر مثبت این شاخص (بین ۰ تا +۱) نشان‌دهنده وجود آب یا رطوبت بالا هستند، به‌طوری که مقادیر نزدیک به +۱ معمولاً به آب‌های آزاد مانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها اشاره دارند (McFeeters, 1996). مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده مناطق با رطوبت متوسط یا پوشش گیاهی با رطوبت سطحی هستند (Gao, 1996). در مقابل، مقادیر منفی (بین ۰ تا -۱) به مناطق خشک، خاک بدون رطوبت یا سطوح غیرآبی مانند سنگ و خاک خشک اشاره دارند، و مقادیر نزدیک به -۱ نشان‌دهنده فقدان کامل آب یا رطوبت هستند (McFeeters, 1996; Gao, 1996). این شاخص در شناسایی تغییرات سطح آب، پایش خشکسالی و مدیریت منابع آبی کاربرد گسترده‌ای دارد. در پژوهش حاضر، از شاخص نرمال‌شده تفاوت آب (NDWI) برای شناسایی تغییرات سطح آب استفاده شد. به‌منظور تحلیل دقیق، مساحت و درصد تغییرات شاخص NDWI برای دوره‌های زمانی مورد مطالعه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۰۰، مقدار شاخص NDWI برابر با ۰/۱۱۹ بود که مساحتی معادل ۳/۶۹۷ کیلومتر مربع، یعنی ۱۷/۱۹ درصد از کل مساحت منطقه را شامل می‌شد. در سال ۲۰۰۶، این شاخص به ۰/۱۲۱ افزایش

NDWI در جغرافیا و سنجش از دور کاربردهای متنوعی دارد، به‌ویژه در پایش منابع آب و تحلیل تغییرات محیط‌زیستی. یکی از کاربردهای اصلی، نقشه‌برداری پهنه‌های آبی مانند دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، و تالاب‌ها است. برای مثال، NDWI در پایش تغییرات سطح دریاچه ارومیه در ایران با دقت بالا استفاده شده است (Rokni et al., 2014). این شاخص همچنین برای تشخیص سیلاب و ارزیابی خسارات ناشی از آن در مناطق شهری و کشاورزی کاربرد دارد (Xu, 2006). در جغرافیای فیزیکی، NDWI برای تحلیل محتوای آب در پوشش گیاهی (مانند مزارع و جنگل‌ها) و پایش خشکسالی استفاده می‌شود، که به مدیریت کشاورزی و پیش‌بینی کمبود آب کمک می‌کند (Gao, 1996). علاوه بر این، NDWI در مطالعات اکولوژیکی برای ارزیابی سلامت تالاب‌ها و تنوع زیستی در اکوسیستم‌های آبی به کار می‌رود (Li et al., 2013). با این حال، محدودیت‌هایی مانند حساسیت به کدورت آب و تداخل با پوشش گیاهی متراکم می‌تواند دقت NDWI را در برخی مناطق کاهش دهد (Ji et al., 2009). این شاخص طیفی از باندهای طیفی سبز و مادون قرمز نزدیک تشکیل می‌شود که در رابطه ۱ نمایش داده شده است:

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

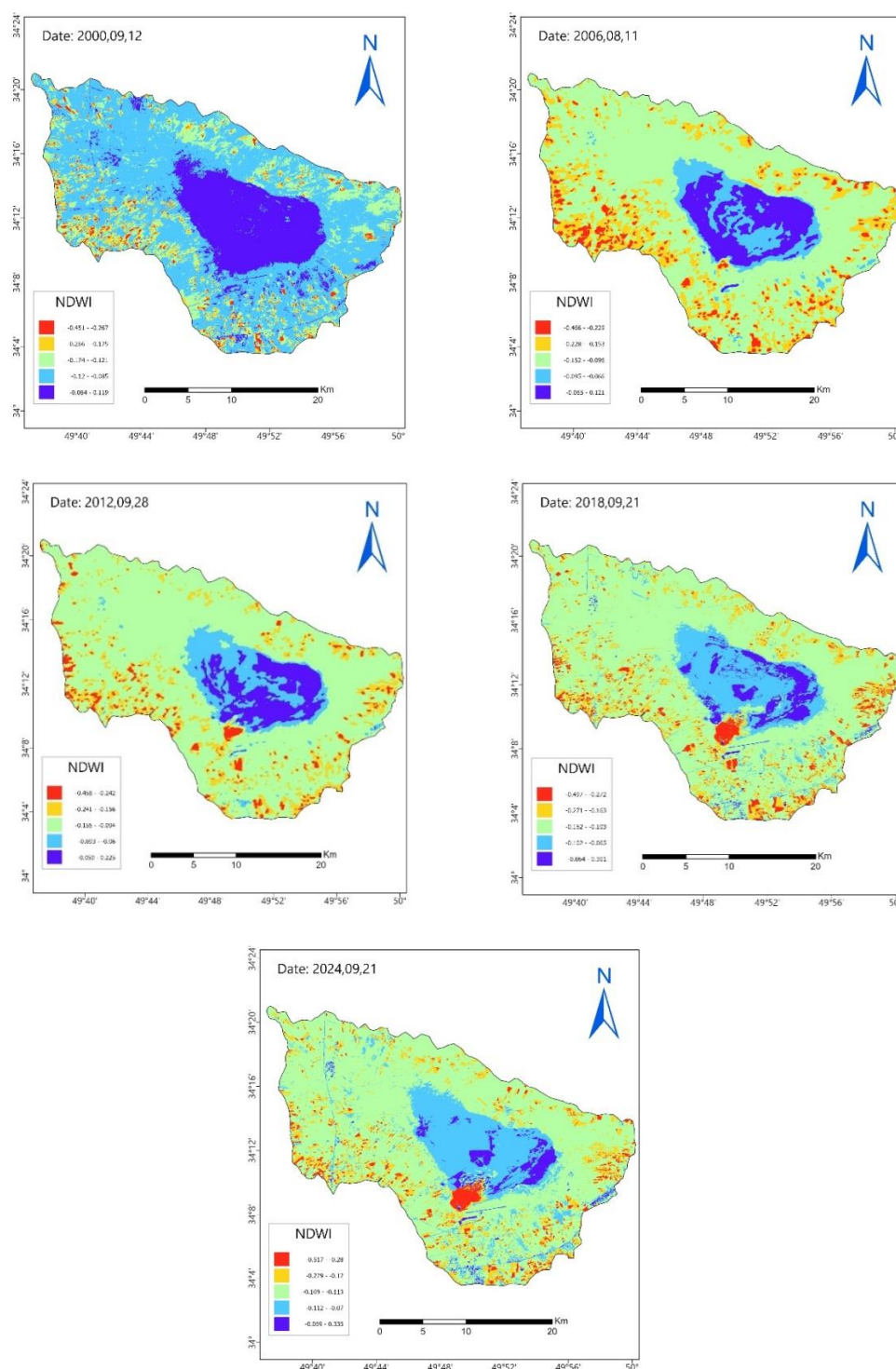
شاخص کیفیت آب (WQI) ابزاری یکپارچه برای ارزیابی کمی و کیفی وضعیت کیفیت منابع آبی نظیر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تالاب‌ها، و آب‌های زیرزمینی است (Sutadian et al., 2016). شاخص WQI برای ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی مانند تخلیه فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی، و رواناب‌های شهری بر کیفیت منابع آبی استفاده می‌شود (Kachroud et al., 2019). داده‌های ماهواره‌ای، مانند تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ با رزولوشن مکانی ۱۰-۳۰ متر، امکان نقشه‌برداری دقیق توزیع مکانی آلودگی‌ها را فراهم می‌کنند (Dörnhöfer & Oppelt, 2016). WQI با استفاده از داده‌های طیفی در باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک، تغییرات غلظت آلاینده‌ها مانند مواد معلق و کلروفیل را شناسایی می‌کند (Gholizadeh et al., 2016). این شاخص طیفی از باندهای طیفی قرمز، سبز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه ۱ تشکیل یافته است که در رابطه ۲ بیان شده است:

$$WQI = \frac{\text{Green} + \text{Red}}{\text{NIR} + \text{SWIR1}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

شاخص کیفیت آب (WPI) ابزاری جامع برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی منابع آبی نظیر رودخانه‌ها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها،

از مساحت کل، کاهش یافت. در نهایت، در سال ۲۰۲۴، مقدار شاخص به ۰/۳۳۵ رسید، اما مساحت به کمتر از ۱ کیلومتر مربع، یعنی ۰/۷۲۴ کیلومتر مربع، معادل ۳/۴۱ درصد از مساحت کل منطقه، کاهش یافت. جدول ۱ و شکل ۲ به وضوح روند تغییرات را در این شاخص نشان می‌دهند:

یافت، اما مساحت تحت پوشش به ۲/۱۶۸ کیلومتر مربع کاهش یافت که معادل ۱۰/۰۸ درصد از مساحت کل منطقه است. در سال ۲۰۱۲، مقدار شاخص به ۰/۲۲۵ رسید و مساحت ۱/۷۲۸ کیلومتر مربع، برابر با ۸/۰۳ درصد از کل مساحت منطقه را پوشش داد. در سال ۲۰۱۸، شاخص NDWI به ۰/۳۰۱ افزایش یافت، اما مساحت به ۱/۰۴۶ کیلومتر مربع، معادل ۴/۸۶ درصد



شکل ۲. نقشه تغییرات وضعیت تالاب میقان بر اساس شاخص طیفی NDWI، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴. مآخذ: نگارندگان

جدول ۱. مقادیر شاخص NDWI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به تفکیک مساحت و درصد مساحت

شاخص	۲۰۰۰	۲۰۰۶	۲۰۱۲	۲۰۱۸	۲۰۲۴
مقدار	۰/۴۵۱	۰/۴۶۸	۰/۴۵۸	۰/۴۹۷	۰/۷۸۶
درصد	۲/۱۸	۰/۴۶۶	۳/۹۵	۲/۹۶۴	۳/۶۵
مقدار	۰/۲۶۶	۰/۲۲۸	۰/۲۴۱	۰/۲۷۱	۰/۲۷۹
درصد	۴/۲۵	۰/۲۲۸	۱۷/۱۹	۱۱/۲۱	۱۰/۹۰
مقدار	۰/۱۷۷	۰/۱۵۲	۰/۱۵۵	۰/۱۶۲	۰/۱۶۹
درصد	۱۵/۴۱	۱۳/۰۳۴	۱۴/۷۰۴	۱۴/۱۴۷	۱۴/۸۰
مقدار	۰/۱۲	۰/۰۹۷	۰/۰۹۳	۰/۱۰۲	۰/۱۱۲
درصد	۰/۹۵۹	۴/۴۶	۷/۹۱	۹/۱۶	۳/۸۸۴
مقدار	۰/۱۱۹	۳/۶۹۷	۰/۲۲۵	۸/۰۳	۰/۷۳۴
درصد	۱۷/۱۹	۲/۱۶۸	۱۰/۰۸	۱/۷۲۸	۳/۴۱

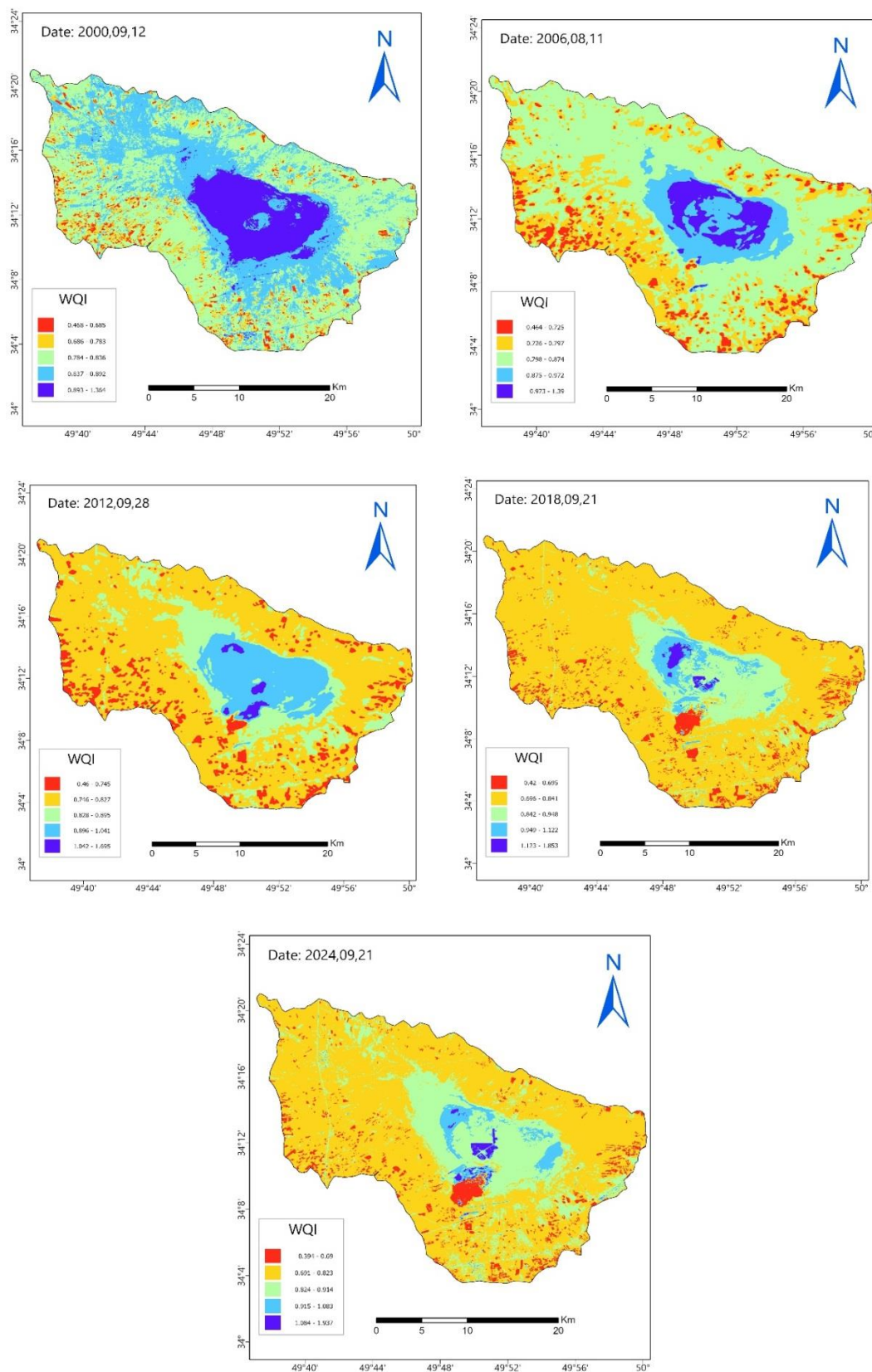
کیفیت "متوسط" اشاره دارد، که آب برای برخی مصارف محدود بوده و نیاز به تصفیه دارد. مقادیر ۰/۳۷۵ تا ۰/۷۵ کیفیت "ضعیف" را نشان می‌دهد، که آب برای شرب نامناسب است و برای سایر مصارف نیاز به تصفیه گسترده دارد. مقادیر ۰ تا ۰/۳۷۵ بیانگر کیفیت "بسیار ضعیف" است، که آب به شدت آلوده بوده و بدون تصفیه پیشرفته برای هیچ مصارفی مناسب نیست (Sutadian et al., 2016).

بر همین اساس با تحلیل و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای با بهره‌گیری از شاخص WQI، روند تغییرات تالاب میقان به پنج طبقه تقسیم شده و مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۰۰ که به عنوان سال پایه تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است، مقادیر شاخص مذکور بالاترین میزان شاخص در این سال برابر ۱/۳۶۴ بوده که مساحتی بالغ بر ۲/۷۴۲ کیلومترمربع بوده است که معادل ۱۲/۷۵ درصد از مساحت کل محدوده می‌باشد. در سال ۲۰۰۶ مقدار شاخص در عالی ترین درجه به عدد ۱/۳۹۰ رسیده و مساحتی بالغ بر ۱/۱۸۵ کیلومترمربع شامل گردیده و برابر ۵/۵۱ درصد از مساحت کل می‌باشد. این روند کاهشی مساحت در سال ۲۰۱۲، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۴ نیز ادامه داشته است که به ترتیب مقادیر شاخص برابر با اعداد ۱/۶۹۵، ۱/۸۵۳ و ۱/۰۸۴ و میزان مساحت نیز به ترتیب ۰/۱۹۴، ۰/۱۷۱ و ۰/۱۵۹ کیلومترمربع بوده است. در شکل ۳ و جدول ۲ روند تغییرات تالاب میقان را بر اساس شاخص WQI نمایش داده شده است:

شاخص کیفیت آب WQI ابزاری مؤثر برای ارزیابی جامع کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی است که با تجمیع داده‌های چندمتغیره پارامترهای کیفی آب، مانند pH، اکسیژن محلول، نیترات، فسفات و هدایت الکتریکی، به یک مقدار عددی ساده تبدیل می‌شود. این شاخص امکان پایش و مقایسه کیفیت آب در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف را فراهم می‌کند و در تحلیل طیفی برای شناسایی الگوهای دوره‌ای و روندهای کیفیت آب کاربرد گسترده‌ای دارد (Sutadian et al., 2016). این شاخص با استفاده از سری‌های زمانی داده‌های کیفی، امکان شناسایی الگوهای فصلی یا دوره‌ای ناشی از عوامل طبیعی (مانند تغییرات بارندگی) یا فعالیت‌های انسانی (مانند تخلیه پساب‌های صنعتی و کشاورزی) را فراهم می‌کند (Kannel et al., 2007). این روش‌ها به‌ویژه در تشخیص تغییرات ناگهانی ناشی از آلودگی‌های نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای مفید هستند (Ouyang, 2005). تفسیر WQI معمولاً بر اساس مقیاس‌های استاندارد انجام می‌شود که کیفیت آب را در دسته‌های مشخصی طبقه‌بندی می‌کند. این مقیاس‌ها اغلب بین ۰ تا ۱۰۰ تعریف می‌شوند، اگرچه ممکن است بسته به روش محاسبه متفاوت باشند. مقادیر ۱/۳۵ تا ۱/۵ نشان‌دهنده کیفیت "عالی" است، که بیانگر آب کاملاً مناسب برای شرب و سایر مصارف بدون نیاز به تصفیه است. مقادیر ۱/۰۵ تا ۱/۳۵ کیفیت "خوب" را نشان می‌دهد، که آب برای اکثر مصارف مناسب است اما ممکن است نیاز به تصفیه جزئی داشته باشد. مقادیر ۰/۷۵ تا ۱/۰۵ به

جدول ۲. مقادیر شاخص WQI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به تفکیک مساحت و درصد مساحت

شاخص	۲۰۰۰	۲۰۰۶	۲۰۱۲	۲۰۱۸	۲۰۲۴
مقدار	۰/۶۸۵	۰/۶۳۷	۰/۴۶۰	۰/۴۲۰	۰/۳۹۴
درصد	۲/۹۶	۰/۴۶۴	۵/۷۵	۷/۹۳	۱/۱۱۲
مقدار	۰/۷۸۳	۰/۷۹۷	۰/۸۲۷	۰/۶۹۶	۰/۸۲۳
درصد	۶/۵۵	۰/۷۹۷	۲۵/۹۵	۱۳/۴۰	۱۴/۶۰۸
مقدار	۰/۸۳۶	۰/۸۷۴	۰/۸۹۵	۰/۹۴۸	۰/۹۱۴
درصد	۱۰/۰۸۱	۴۶/۸۹	۵۲/۱۱	۱۶/۲۳	۱۵/۶۵
مقدار	۰/۸۹۲	۰/۹۷۲	۱/۰۴۱	۱/۱۲۲	۱/۰۸۳
درصد	۶/۵۸۲	۳۰/۶۱	۱۰/۴۴	۱۲/۱۰	۴/۰۲
مقدار	۱/۳۶۴	۲/۷۴۲	۱/۶۹۵	۰/۹۰	۰/۷۹
درصد	۱۲/۷۵	۱۳/۹۰	۵/۵۱	۱/۸۵۳	۱/۰۸۴



شکل ۳. نقشه تغییرات وضعیت تالاب میقان بر اساس شاخص کیفی WQI، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، مأخذ: نگارندگان

شاخص آلودگی آب یا همان WPI یک روش عددی است که با ارزیابی غلظت پارامترهای مختلف آب مانند pH، اکسیژن محلول، نیترات و فسفات نسبت به استانداردهای کیفی، وضعیت آلودگی آب را تعیین می‌کند. این شاخص با محاسبه میانگین وزن‌دار یا ساده نسبت‌های غلظت پارامترها به مقادیر استاندارد، امکان مقایسه کیفیت آب در مناطق مختلف را فراهم می‌سازد. WPI به دلیل سادگی و قابلیت تطبیق با شرایط محلی، به‌ویژه در ارزیابی تالاب‌ها که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارند، کاربرد گسترده‌ای دارد. تفسیر WPI معمولاً بر اساس مقیاس‌های تعریف‌شده انجام می‌شود که کیفیت آب را به دسته‌های مشخصی تقسیم می‌کند. به‌طور کلی، WPI کمتر از ۰/۵ نشان‌دهنده کیفیت آب عالی، ۰/۵ تا ۱ کیفیت خوب تا متوسط، ۱ تا ۲ کیفیت ضعیف با آلودگی قابل‌توجه، و بیشتر از ۲ نشان‌دهنده آب به‌شدت آلوده است که برای اکثر مصارف نامناسب است. برای مثال، در مطالعه‌ای در تالاب‌های اندونزی، WPI بین ۰/۶ تا ۲/۳ گزارش شد که نشان‌دهنده تنوع کیفیت آب از خوب تا بسیار آلوده بود، به‌ویژه در مناطقی با ورودی فاضلاب کشاورزی (Sutadian et al., 2016).

بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های استخراج‌شده از شاخص کیفیت آب (WPI) در تالاب میقان، وضعیت کیفیت آب این تالاب در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ تغییرات قابل‌توجهی را تجربه کرده است. در سال ۲۰۰۰، مقادیر شاخص WPI در محدوده ۰/۸۷۹

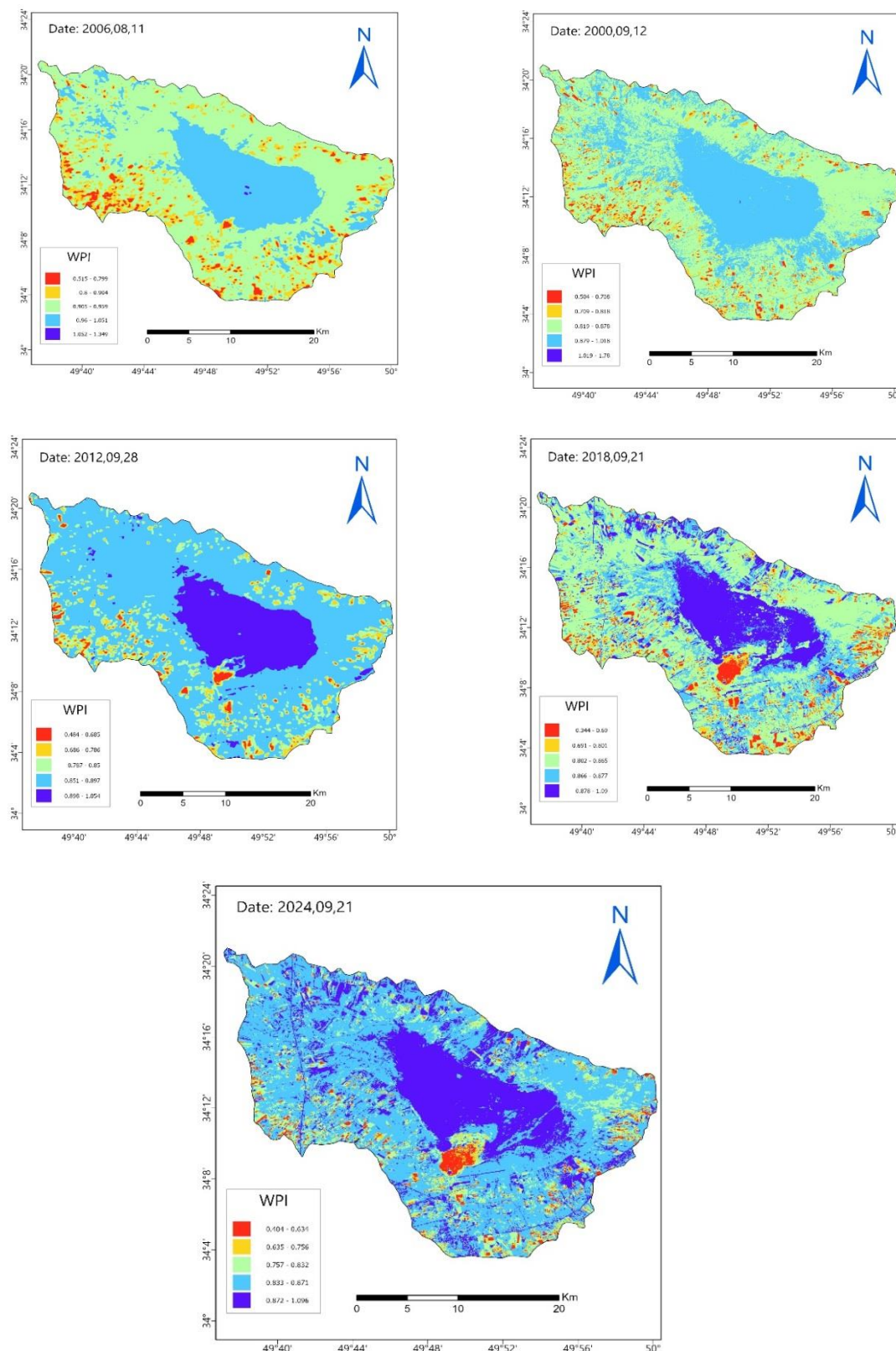
تا ۱/۰۱۸ قرار داشت که نشان‌دهنده کیفیت خوب آب در این تالاب بود. این مقادیر بیانگر شرایط مطلوب اکولوژیکی و حداقل آلودگی در آن دوره است. در سال ۲۰۰۶، کیفیت آب تالاب دستخوش تغییراتی شد و مقادیر شاخص WPI به بازه ۰/۹۶ تا ۱/۰۵۱ افزایش یافت. در این سال، لکه‌هایی با مقادیر بالاتر (۱/۰۵۲ تا ۱/۳۴۹) در مرکز تالاب مشاهده شد که نشان‌دهنده ظهور نقاطی با آلودگی قابل‌توجه است. این تغییرات می‌تواند به عوامل محیطی یا انسانی نظیر افزایش ورودی آلاینده‌ها یا تغییرات هیدرولوژیکی مرتبط باشد. روند افزایش آلودگی در سال ۲۰۱۲ شدت گرفت، به‌طوری‌که بخش عمده پهنه تالاب در محدوده کیفیت آلوده (WPI برابر با ۱/۰۵۴) قرار گرفت. این وضعیت بیانگر گسترش آلودگی در تالاب و کاهش کیفیت اکولوژیکی آن است. در سال ۲۰۱۸، شاخص WPI به ۱/۰۹ رسید که نشان‌دهنده تشدید آلودگی نسبت به دوره‌های پیشین است. این افزایش قابل‌توجه می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله تغییرات کاربری اراضی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی، یا کاهش جریان ورودی آب به تالاب نسبت داده شود. در نهایت، داده‌های سال ۲۰۲۴ نشان‌دهنده تداوم روند نزولی کیفیت آب است، به‌طوری‌که شاخص WPI به ۱/۰۹۶ رسید و کل پهنه تالاب را در بر گرفت. این وضعیت بیانگر آلودگی گسترده و پایدار در تالاب میقان است که نیازمند بررسی دقیق‌تر عوامل مؤثر و اقدامات مدیریتی فوری برای بهبود کیفیت آب و حفاظت از اکوسیستم تالاب است.

جدول ۳. مقادیر شاخص WPI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به تفکیک مساحت و درصد مساحت

شاخص	۲۰۰۰		۲۰۰۶		۲۰۱۲		۲۰۱۸		۲۰۲۴	
	مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد
WPI	۰/۵۰۴	۰/۵۳۵	۲/۴۸	۰/۵۱۵	۰/۶۲۷	۲/۹۱	۰/۴۸۴	۰/۲۹۸	۱/۳۹	۰/۳۴۴
	۰/۷۰۹	۱/۱۶۵	۵/۴۲	۰/۹۰۴	۳/۳۱۲	۱۰/۷۵	۰/۷۸۶	۰/۹۹۲	۴/۶۱	۰/۹۹۲
	۰/۸۱۹	۱۱/۷۶۰	۵۴/۷۰	۰/۹۵۹	۱۳/۱۹	۶۱/۳۵	۰/۸۵۰	۲/۴۰۹	۶۵/۲۰	۰/۷۵۱
	۰/۸۷۹	۷/۹۹۰	۳۷/۱۶	۱/۰۵۱	۳/۳۱۳	۲۴/۷۱	۰/۸۹۷	۱۴/۱۵	۶۵/۸۴	۰/۸۷۰
	۱/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۱/۳۴۹	۰/۰۰۹	۰/۰۴	۱/۰۵۴	۳/۵۹۵	۱/۰۹۰	۱۶/۷۲

جدول ۴. جدول مقادیر شاخص WQI و شاخص WPI، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، مأخذ: نگارندگان

۲۰۰۰		۲۰۰۶		۲۰۱۲		۲۰۱۸		۲۰۲۴	
WPI	WQI	WPI	WQI	WPI	WQI	WPI	WQI	WPI	WQI
۰/۶۸۵	۰/۵۰۴	۰/۴۶۴	۰/۵۱۵	۰/۴۶۰	۰/۴۸۴	۰/۳۴۴	۰/۴۲۰	۰/۳۹۴	۰/۴۰۴
۰/۷۸۳	۰/۷۰۹	۰/۷۹۷	۰/۹۰۴	۰/۸۲۷	۰/۷۸۶	۰/۶۲۸	۰/۶۹۶	۰/۸۲۳	۰/۷۵۶
۰/۸۳۶	۰/۸۱۹	۰/۸۷۴	۰/۹۵۹	۰/۸۹۵	۰/۸۵۰	۰/۷۵۱	۰/۹۴۸	۰/۹۱۴	۰/۸۳۲
۰/۸۹۲	۰/۸۷۹	۰/۹۷۲	۱/۰۵۱	۱/۰۴۱	۰/۸۹۷	۱/۱۲۲	۱/۱۲۲	۱/۰۸۳	۰/۸۷۱
۱/۳۶۴	۱/۰۱۹	۱/۳۹۰	۱/۳۴۹	۱/۶۹۵	۱/۰۵۴	۱/۸۵۳	۱/۸۵۳	۱/۰۹۰	۱/۰۹۶



شکل ۴. نقشه تغییرات وضعیت تالاب میقان بر اساس شاخص طیفی WPI، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، مأخذ: نگارندگان

مقادیر شاخص برای شاخص‌های WPI و WQI به ترتیب برابر ۱/۳۶۴ و ۱/۰۱۹ بوده است. این مقدار برای سال ۲۰۰۶ با روند افزایشی همراه بوده و به ترتیب برای شاخص WQI و

در ادامه برای بررسی دقیق‌تر و نمایان کردن تصویری درست از وضعیت تغییرات تالاب میقان WQI با WPI مقایسه شد. بر اساس جدول ۴ در سال ۲۰۰۰ به عنوان سال پایه

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش که با هدف ارزیابی تغییرات زمانی پهنه آبی و کیفیت آب تالاب میقان در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ و با بهره‌گیری از شاخص‌های طیفی سنجش از دور (WQI، NDWI و WPI) انجام شده، بیانگر روندی نگران‌کننده از کاهش وسعت آبی و افت کیفی این زیست‌بوم ارزشمند است. شاخص NDWI نشان داد که وسعت سطح آبی تالاب طی دو دهه گذشته به‌طور پیوسته کاهش یافته و این کاهش، به‌ویژه در سال‌های اخیر، شتاب بیشتری به خود گرفته است. کاهش مساحت آبی نه تنها نشان‌دهنده‌ی تأثیرات اقلیمی و کم‌آبی است، بلکه حاکی از فشارهای فزاینده انسانی بر منابع آب منطقه نیز می‌باشد. از منظر کیفیت آب، تحلیل شاخص WQI آشکار ساخت که کیفیت آب تالاب از وضعیت «عالی» و «خوب» در ابتدای دوره مورد بررسی، به سطوح «متوسط» و «ضعیف» در سال‌های اخیر تنزل یافته است. این تغییرات عمدتاً ناشی از ورود فزاینده آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به تالاب، از جمله فاضلاب‌های شهری، پساب‌های کشاورزی و کاهش جریان‌های سطحی ورودی ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل از شاخص WPI نیز مؤید روند افزایشی آلودگی در این اکوسیستم است؛ به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۲۴، بخش اعظم تالاب در کلاس‌های کیفی بسیار آلوده قرار گرفته است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی و شاخص‌های طیفی منتخب در این مطالعه، کارایی بالای سنجش از دور را در پایش مستمر، کم‌هزینه و گسترده‌ی تغییرات محیط‌های آبی نشان داد. ترکیب داده‌های سنجش از دور با شاخص‌های تلفیقی مانند WQI و WPI، امکان تحلیل دقیق‌تر تغییرات کیفی و مکانی منابع آبی را فراهم ساخته و بستری علمی برای تصمیم‌سازی‌های مدیریتی فراهم می‌نماید. بر این اساس، نتایج تحقیق حاضر نه تنها ضرورت مداخلات فوری مدیریتی و حفاظت‌محور برای احیای تالاب میقان را برجسته می‌سازد، بلکه گویای ظرفیت بالای فناوری‌های سنجش از دور در مدیریت پایدار منابع آب در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و ملی است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تلفیق داده‌های سنجش از دور با مدل‌های عددی هیدرولوژیکی و داده‌های میدانی به‌منظور اعتبارسنجی و بهبود دقت تحلیل‌ها مدنظر قرار گیرد.

WPI معادل ۱/۳۹۰ و ۱/۳۴۹ می‌باشد. در سال ۲۰۱۲ مقادیر شاخص برای WQI به صورت روند افزایشی ادامه داشته است و به عدد ۱/۶۹۵ رسیده و مقدار شاخص برای WPI به عدد ۱/۰۵۴ تغییر یافت. در سال ۲۰۱۸ مقادیر شاخص برای هر دو شاخص روند افزایشی داشته و برای شاخص WQI و WPI به ترتیب معادل ۱/۸۵۳ و ۱/۰۹۰ رسیده است. در نهایت در سال ۲۰۲۴ این مقادیر برای شاخص WQI و WPI به ترتیب به عدد ۱/۰۸۴ و ۱/۰۹۶ تغییر یافته است. با توجه به نحوه تفسیر این دو شاخص طیفی چنین می‌توان استنباط کرد که با افزایش مقادیر شاخص WPI، شاخص WQI نیز افزایش است؛ که بیانگر این است که با افزایش آلودگی آب، کیفیت آب کاهش یافته است.

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که تالاب میقان طی دو دهه اخیر با کاهش قابل‌توجه مساحت آبی و افت محسوس کیفیت آب روبه‌رو بوده است؛ روندی که با یافته‌های مطالعات مشابه در داخل و خارج کشور هم‌خوانی دارد. پژوهش‌هایی چون خسروی یگانه و غفاری مقدم (۱۴۰۳) در تالاب شادگان، سفیدیان و همکاران (۱۴۰۲) در تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلاگل و همچنین حجاریان و همکاران (۱۴۰۰) در همین تالاب، و نیز تحقیقات بین‌المللی مانند Mukate et al (۲۰۱۹) و Kim et al (۲۰۱۹)، همگی کاهش سطح آب و افت کیفیت را نتیجه ترکیب فشارهای انسانی از جمله برداشت بی‌رویه منابع، تغییرات کاربری اراضی و ورود پساب‌های کشاورزی و شهری و نوسانات اقلیمی می‌دانند. در همین راستا، افزایش مقادیر شاخص WPI و کاهش WQI در این مطالعه، مشابه الگوهای گزارش‌شده در مطالعات جهانی، نشانه‌ای روشن از تشدید آلودگی و افت تدریجی کیفیت آب تالاب است. این هم‌راستایی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های سنجش از دور (WQI، NDWI و WPI) ابزاری کارآمد و علمی برای پایش مداوم منابع آبی است و می‌تواند مبنایی مطمئن برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی، احیای اکوسیستم و مدیریت پایدار تالاب میقان قرار گیرد.

Reference:

- Al-Kareem, S. A., & ALKzwini, R. S. (2022). Statistical analysis for water quality index for Shatt-Al-Hilla river in Babel city. *Water Practice and Technology*, 17(3), 567–586.
- Aghamiri, M., Azizi, Z., & Imani Harsini, J. (2023). Evaluation of SDI, NDWI, NDMI and AWEI indices in coastline extraction and water body area of Shadegan wetland. *Journal of Wetland Ecobiology*, 14(2), 61–76. [In Persian]
- Amini, A., & Gholami, H. (2017). Hydrogeochemical assessment of groundwater and surface water in Miqan Wetland, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 76(14), 1–12.
- Banda, T., & Kumarasamy, M. (2020). Development of a universal water quality index (UWQI) for South African river catchments. *Water*, 12(6), 1534.
- Dörnhöfer, K., & Oppelt, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring—Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105–122.

- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298.
- Hajarian, M. H., Atarchi, S., & Hamzeh, S. (2021). Monitoring seasonal changes of Meighan wetland using SAR, thermal and optical remote sensing data. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(117), 365–380. [In Persian]
- Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Education India.
- Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317.
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*, 11(2), 361.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kannel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 93–110.
- Kim, J. J., Atique, U., & An, K. G. (2019). Long-term ecological health assessment of a restored urban stream based on chemical water quality, physical habitat conditions and biological integrity. *Water*, 11(1), 114..
- Khosravi Yegane, S., & Ghafari Moghadam, A. (2025). Estimating changes in water level and vegetation cover in Shadegan wetland using remote sensing. *Journal of Applied Researches in Water Engineering*, 2(2), 183–198. [In Persian]
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., ... & Zhang, X. (2013). A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530–5549.
- 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.
- Mohammadi, A., Almasieh, K., & Nayeri, D. (2021). Change detection of land cover in Meighan wetland using remote sensing technique. *Journal of Animal Environmental Research*, 13(3), 405–412. [In Persian]
- Mohammadi, A., Gholami, H., & Amini, A. (2019). Ecological assessment of Miqan Wetland: Implications for conservation and management. *Wetlands Ecology and Management*, 27(4), 513–526. [In Persian]
- Mukate, S., Panaskar, D., Wagh, V., & Baker, J. (2019). Water pollution index – A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, 101, 601–612.
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621–2635.
- Rahimi, A., Akbarian, M., & Moradi, A. (2024). Environmental impacts assessment of ecotourism development in wetland of Tiab. *Journal of Tourism Management Studies*, 19(67), 197–242. [In Persian]
- Rezaei, S., & Rezaei-Moghadam, K. (2024). Determinants of local community participation in restoration of Parishan wetland. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 20(1), 1–21. [In Persian]
- Richards, J. A., & Richards, J. A. (2022). *Remote sensing digital image analysis* (Vol. 5, pp. 256–258). Springer.
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173–4189.
- Sadeghi, S., & Akhoundi, O. (2023). Assessing groundwater level declination in Meighan Playa catchment. *Journal of Integrated Watershed Management*, 2(4), 79–93. [In Persian]
- Saghafi, M., Ahmadi, A., & Bigdeli, B. (2022). Detecting surface waters using data fusion of optical and radar remote sensing sensor. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 16(57), 24–31. [In Persian]
- Sefidian, S., Salmanmahiny, A., & Berdi Sheikh, V. (2023). Effects of changes in land cover and hydro-climatic parameters on the extent and nature of Alagol, Ajigol and Ulmagol international importance wetlands in the last three decades. *Journal of Natural Environment*, 76(2), 245–258. [In Persian]
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1–29.
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.

یادداشت ها

¹ Normalized Difference Water Index² Water Quality Index³ Water Pollution Index⁴ Spectral Signature