

Long-Term Monitoring of Inundation Dynamics in Namak Lake Using Satellite Imagery in Google Earth Engine

Samaneh Razavizadeh 

Corresponding author, Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: srazavizadeh@ymail.com

Received: 01/31/2026

Revised: 05/15/2026

Accepted: 06/06/2026

Published: 06/19/2026

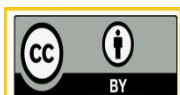
Abstract

Background and Objectives

Lakes and wetlands in arid and semi-arid regions play critical roles in sustaining ecosystem functions, regulating local climate, mitigating dust storms, and conserving biodiversity. Lake Namak, one of the major evaporitic-saline basins of the Central Iranian Plateau, has experienced a marked reduction in its surface water extent and increasing instability in its inundation regime over recent decades. Reduced hydrological persistence may intensify dust emissions and impair important regional ecological functions. Despite the ecological significance of Lake Namak, long-term assessments based on continuous satellite observations remain limited. Therefore, this study aimed to monitor and quantify the spatiotemporal dynamics of the inundated area of Lake Namak during 1995–2024 using Landsat satellite imagery and the Google Earth Engine (GEE) platform.

Materials and Methods

Landsat satellite imagery acquired from Landsat 5, Landsat 7, and Landsat 8 between 1995 and 2024 was used to assess the long-term dynamics of Lake Namak's inundation. To harmonize observations from different sensors and minimize inconsistencies, surface reflectance products were used, and cloud and cloud-shadow pixels were masked using standard quality-control algorithms. All image processing and analyses were conducted in the Google Earth Engine environment, which enabled efficient access to and processing of the long-term Landsat archive. Water bodies were delineated using the Normalized Difference Water Index (NDWI), calculated for each image from the green and near-infrared (NIR) spectral bands. An empirical threshold was determined by comparing NDWI-derived results with false-color composites and visual interpretation, and binary water/non-water maps were subsequently generated. The inundated area was quantified at monthly, seasonal, annual, and decadal temporal scales. Temporal trends were evaluated using time-series analysis and linear regression to determine the direction and magnitude of changes over the study period. In addition, the non-parametric Sen's slope estimator was applied to obtain a robust estimate of the rate of change and reduce the influence of extreme observations. To further characterize the



stability and temporal persistence of surface-water occurrence, the Transition and Seasonality layers of the JRC Global Surface Water dataset were analyzed within Google Earth Engine.

Results

Time-series analysis of Landsat imagery revealed a declining and increasingly unstable trend in the inundated area of Lake Namak over the three-decade study period. The mean inundated area during the first decade (1995–2004) was approximately 154.4 km², declining to 48.1 km² during the second decade (2005–2014) and approximately 41.1 km² during the third decade (2015–2024). At the annual scale, the maximum inundated area occurred in 2001, reaching approximately 383.6 km², whereas the minimum was recorded in 2014 at approximately 1 km², demonstrating pronounced interannual variability in lake inundation. Linear regression confirmed a significant negative temporal trend, with the negative slope indicating a persistent decline in surface-water extent. Similarly, Sen's slope estimator produced negative annual change rates, providing robust evidence of a long-term reduction in inundation. Seasonal analysis showed that spring had the greatest surface-water extent, with approximately 10% of the lake area inundated, followed by winter with approximately 4.5%, whereas summer and autumn exhibited minimal inundation. Monthly analysis indicated that the highest inundation occurred during March, April, and May. Analysis of the JRC Transition layer showed that approximately 70.4% of the lake area remained unchanged, while approximately 15.9% was classified as "new seasonal" and about 13% as "seasonal," indicating an increasing contribution of temporary surface-water occurrence. The Seasonality layer further showed that more than 71.1% of the lake surface lacked persistent inundation, with most water-covered areas occurring for only one to three months per year.

Conclusion

The findings demonstrate that Lake Namak has experienced a substantial reduction in both surface-water extent and hydrological persistence over the past three decades. The consistent negative trends identified by both linear regression and Sen's slope analysis indicate a persistent deterioration in the lake's inundation regime. The predominance of short-lived and seasonal inundation further reflects increasing hydrological instability and reduced water persistence. If this trend continues, it may result in significant environmental consequences, including increased salinity and evaporation, degradation of aquatic and wetland habitats, and expansion of exposed saline surfaces that may function as potential dust-emission sources. The integration of long-term Landsat observations with Google Earth Engine provides an efficient and reproducible framework for monitoring dynamic saline lakes and wetlands and can support future water-resource management, ecological assessment, and conservation planning in arid environments.

Keywords: Arid regions, inundation variation, NDWI index, remote sensing, surface water bodies, surface water monitoring.

پایش تغییرات بلندمدت آبگیری دریاچه نمک با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای در سامانه Google Earth Engine

سمانه رضوی زاده

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

تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

چکیده

سابقه و هدف

دریاچه‌ها و تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مهمی در پایداری اکوسیستم‌ها، تنظیم اقلیم محلی، کنترل گردوغبار و حفظ تنوع زیستی دارند. دریاچه نمک، به‌عنوان یکی از پهنه‌های تبخیری-نمکی فلات مرکزی ایران، طی دهه‌های اخیر با کاهش محسوس مساحت و افزایش ناپایداری آبگیری روبه‌رو شده است. افت تداوم آبداری این دریاچه می‌تواند به تشدید گردوغبار و تضعیف کارکردهای اکولوژیکی منطقه منجر شود. با وجود اهمیت آن، تحلیل‌های بلندمدت مبتنی بر مجموعه زمانی پیوسته تصاویر ماهواره‌ای محدود است. از این رو، هدف این پژوهش پایش و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پهنه آبگیر دریاچه نمک طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر لندست و سامانه Google Earth Engine است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای لندست شامل سنجنده‌های Landsat 5، Landsat 7 و Landsat 8 در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. به‌منظور یکنواخت‌سازی داده‌ها و کاهش اثر اختلاف سنجنده‌ها، از محصولات بازتاب سطحی استفاده گردید و تصاویر دارای ابر و سایه ابر با استفاده از الگوریتم‌های استاندارد ماسک گردید. تمامی پردازش‌ها و تحلیل‌ها در محیط سامانه Google Earth Engine انجام شد که امکان دسترسی به آرشیو بلندمدت تصاویر و پردازش سریع داده‌ها را فراهم می‌کند. برای استخراج پهنه‌های آبی، شاخص تفاضل نرمال‌شده آب (NDWI) با استفاده از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک برای هر تصویر محاسبه گردید. سپس با تعیین یک آستانه تجربی براساس مقایسه با تصاویر رنگی کاذب و تفسیر بصری، نقشه‌های باینری آب و غیرآب تولید شد. پس از آن، مساحت پهنه‌های آبگیر در مقیاس‌های ماهانه، فصلی، سالانه و دهه‌ای محاسبه گردید. برای بررسی روند تغییرات پهنه آبگیر، از تحلیل سری زمانی و رگرسیون خطی استفاده شد تا جهت و شدت روند تغییرات در طول دوره مطالعه مشخص شود. همچنین به‌منظور برآورد دقیق‌تر میزان تغییرات و کاهش تأثیر داده‌های پرت، از برآوردگر ناپارامتری شیب سن (Sen's Slope) استفاده گردید. علاوه بر این، برای ارزیابی الگوی پایداری آبگیری دریاچه، لایه‌های Transition و Seasonality از مجموعه داده جهانی آب‌های سطحی (JRC Global Surface Water) در محیط Google Earth Engine تحلیل شدند.

نتایج

نتایج تحلیل سری زمانی تصاویر لندست نشان داد که پهنه آبگیر دریاچه نمک طی سه دهه اخیر روندی کاهشی و ناپایدار داشته است. میانگین مساحت پهنه آبگیر در دهه نخست (۱۹۹۵-۲۰۰۴) حدود ۱۵۴/۴ کیلومترمربع برآورد شد، در حالی که این مقدار در دهه دوم (۲۰۰۵-۲۰۱۴) به ۴۸/۱ و در دهه سوم (۲۰۱۵-۲۰۲۴) به حدود ۴۱/۱ کیلومترمربع کاهش یافته است. در مقیاس سالانه، بیشترین سطح آبگیری در سال ۲۰۰۱ با حدود ۳۸۳/۶ کیلومترمربع و کمترین مقدار در سال ۲۰۱۴ با حدود ۱ کیلومترمربع ثبت شد که بیانگر نوسانهای شدید بین‌ساله است. تحلیل روند با رگرسیون خطی کاهش معنادار مساحت پهنه آبگیر را تأیید کرد و شیب منفی خط روند نشان‌دهنده افت مستمر آبگیری طی دوره مطالعه بود. به‌طور مشابه، روش ناپارامتری شیب سن (Sen's Slope) نیز میزان سالانه تغییرات را منفی برآورد کرد و روند کاهش بلندمدت پهنه آبی را با دقت بیشتری نشان داد. بررسی الگوی فصلی نشان داد که

بیشترین آبگیری در فصل بهار رخ می‌دهد و حدود ۱۰ درصد از سطح دریاچه در این فصل آبدار است. پس از آن، فصل زمستان با حدود ۴/۵ درصد قرار دارد، در حالی که تابستان و پاییز کمترین میزان آبگیری را نشان می‌دهند. در مقیاس ماهانه، بیشترین پهنه آبیگر در ماه‌های مارس، آوریل و مه مشاهده شد. نتایج لایه Transition نشان داد که حدود ۴/۷۰ درصد از پهنه دریاچه بدون تغییر بوده و حدود ۹/۱۵ درصد در کلاس «فصلی جدید» و حدود ۱۳ درصد در کلاس «فصلی» قرار دارند که بیانگر گسترش پهنه‌های آبگیری موقت است. همچنین نتایج Seasonality نشان داد که بیش از ۱/۷۱ درصد مساحت دریاچه فاقد آبداری پایدار بوده و پهنه‌های آبدار عمدتاً تنها یک تا سه ماه در سال آبگیری دارند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دریاچه نمک طی سه دهه اخیر با کاهش قابل توجه مساحت و تداوم آبگیری مواجه بوده و روند کاهشی آن توسط تحلیل رگرسیون خطی و روش شیب سن تأیید شده است. غلبه پهنه‌های آبگیری کوتاه‌مدت و فصلی نشان‌دهنده افزایش ناپایداری هیدرولوژیکی این دریاچه است. تداوم این روند می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی مهمی از جمله افزایش شوری، تشدید تبخیر و گسترش کانون‌های گردوغبار را به همراه داشته باشد. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه Google Earth Engine چارچوبی کارآمد برای پایش بلندمدت چنین پهنه‌هایی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آب‌های سطحی، پایش پهنه‌های آبی، سنجش‌ازدور، شاخص NDWI، مناطق خشک، نوسانهای آبگیری.

مقدمه

پهنه‌های آبی داخلی مانند دریاچه‌ها و تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در کشورهای با اقلیم خشک مانند ایران، نقش بسیار مهمی در تأمین منابع آبی، حفظ تنوع زیستی، تنظیم شرایط اقلیمی و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند. این منابع آبی علاوه بر تأمین آب برای مصارف انسانی، کشاورزی و صنعتی، در تنظیم دمای محیط، کاهش اثر تغییرات اقلیمی، ذخیره‌سازی کربن و کنترل فرایندهای بوم‌شناختی نقش مؤثری دارند. دریاچه‌ها و تالاب‌ها همچنین به‌عنوان زیستگاه‌های ارزشمند حیات وحش، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت اکولوژیکی بالایی برخوردارند. با این حال، این منابع آبی به‌شدت آسیب‌پذیر بوده و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌ها، افزایش دما و فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه از آب‌های سطحی و زیرزمینی، توسعه کشاورزی و سدسازی، با تهدیدهای جدی مواجه شده‌اند. در دهه‌های اخیر، بسیاری از دریاچه‌ها و تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک روند کاهش سطح آب و خشکیدگی را تجربه کرده‌اند که پیامدهای محیط‌زیستی گسترده‌ای مانند افزایش گردوغبار، آلودگی هوا،

کاهش تنوع زیستی، تهدید سلامت عمومی و بروز بحران‌های آب و غذا را به دنبال داشته است (Mousavi et al., 2024). در این راستا، پایش و تحلیل دقیق تغییرات سطح آب دریاچه‌ها و تالاب‌ها به‌منظور درک روند خشکیدگی و عوامل مؤثر بر آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای Landsat، به دلیل پوشش زمانی طولانی‌مدت، تفکیک مکانی مناسب و دسترسی آزاد، به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها در مطالعات تغییرات سطح آب شناخته می‌شود. این تصاویر امکان بررسی تغییرات مکانی و زمانی پهنه‌های آبی را در بازه‌های زمانی طولانی فراهم کرده و اطلاعات ارزشمندی از وضعیت پوشش زمین و منابع آبی ارائه می‌دهند (Taheri Dehkordi et al., 2022). در سال‌های اخیر، توسعه پلتفرم‌های پردازش ابری تحولی اساسی در تحلیل داده‌های سنجش از دور ایجاد کرده است. این سامانه‌ها با فراهم کردن امکان پردازش همزمان حجم عظیمی از داده‌های ماهواره‌ای و سری‌های زمانی طولانی، ابزارهای دقیق و کارآمدی برای پایش تغییرات سطح آب فراهم می‌کنند. سامانه Google Earth Engine (GEE)، یک بستر نوین است که توسط شرکت Google ایجاد شده

کارایی بالاتری برخوردار بوده و با صحتی در حدود ۹۹ درصد، مناسب‌ترین شاخص برای تفکیک پهنه‌های آبی شور در این منطقه به‌شمار می‌رود. این مطالعه همچنین روند کاهشی چشمگیر مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه طی سال‌های اخیر را آشکار کرد و بر قابلیت بالای GEE در تحلیل سریع و دقیق تغییرات منابع آب تأکید داشت. از سوی دیگر، [Sheikh-Assadi](#) و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی با عنوان «پایش دریاچه بیابان لوت با بررسی تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل-۲» با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی ۴۷ ساله (۱۹۷۲ تا ۲۰۱۹)، کارایی شاخص‌های NDWI، MNDWI، AWEInsh، AWEIsh و NDVI را در شناسایی مرز و مساحت پهنه آبی ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص‌های NDWI و NDVI در برآورد مساحت دریاچه عملکرد مناسب‌تری دارند و تغییرات زمانی سطح آب را با دقت قابل قبولی نمایش می‌دهند. همچنین [Karami](#) و [Sayyadi](#) (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای به پایش تغییرات دینامیک زیرحوضه تالاب میانگران با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین با استفاده از سری زمانی شاخص‌های NDWI و NDVI در محیط GEE و مدل هارمونیک برای تحلیل تغییرات پهنه آبی و پوشش گیاهی طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر روند منفی و کاهشی پهنه آبی زیرحوضه تالاب میانگران بود، در حالی که پوشش گیاهی روند مشخصی نشان نداد. همچنین، داده‌های جهانی آب کاهش قابل‌ملاحظه‌ی وسعت پهنه‌های آبی و تغییرات گسترده مکانی-زمانی آن‌ها، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای تالاب، را نشان دادند که بیانگر دگرگونی رژیم هیدرولوژیکی تالاب است. این مطالعه نشان داد که ترکیب تحلیل سری زمانی، آزمون‌های روند و داده‌های جهانی آب، می‌تواند مبنایی مناسب برای پایش تغییرات محیطی و تصمیم‌سازی مدیریتی در حوضه‌های آسیب‌پذیر باشد. مرور این مطالعات نشان می‌دهد، اگرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه پایش پهنه‌های آبی کشور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های طیفی و محیط Google Earth Engine انجام شده است، اما دریاچه نمک، با وجود

است و تصاویر ماهواره‌ای و محصولات (products) حاصل از آنها را در سطح جهان در سری‌های زمانی مختلف در اختیار کاربران قرار می‌دهد ([Jain, 2001](#)). GEE برای مطالعات سطح زمین در مقیاس جهانی و منطقه‌ای استفاده می‌شود، نمونه این مطالعات شامل مطالعات پوشش جنگلی، آب‌های سطحی، مناطق جمعیتی، اراضی کشاورزی، خاک و غیره می‌شود ([Yao and Chi, 2004; Li et al., 2016](#)). [al., 2019](#)). پژوهش‌های پیشین در داخل و خارج از کشور نشان داده‌اند که ترکیب تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های شناسایی پهنه آبی مانند NDWI (Normalized Difference Water Index) و سامانه‌های پردازش ابری، چارچوبی مؤثر برای پایش تغییرات پهنه‌های آبی فراهم می‌کنند ([Zhu and Woodcock, 2014; Cao et al., 2022](#)). در این زمینه، مطالعه [Montaseri](#) (۲۰۲۵) درباره پایش تغییرات آبی با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور، بر اهمیت به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل سری زمانی در مدیریت منابع آب تأکید دارد. همچنین [Yousefi](#) و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی درباره دریاچه زریبار کردستان، با استفاده از تصاویر لندست ۵ و ۹ و شاخص‌های NDWI و MNDWI در محیط Google Earth Engine، نشان دادند که هر دو شاخص توانایی مطلوبی در استخراج پهنه آبی دارند، اما شاخص MNDWI با دقت کلی حدود ۸۹ درصد عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر، [Solaimani](#) و همکاران (۲۰۲۲)، با ارزیابی صحت روش‌های مختلف سنجنش از دور برای استخراج و پایش تغییرات پهنه آبی دریاچه زریبار، نشان دادند که افزودن شاخص‌های طیفی، الگوریتم‌های طبقه‌بندی مانند SVM و حداکثر احتمال نیز از دقت بالایی در تفکیک سطوح آبی برخوردارند و می‌توانند در کنار شاخص‌های آبی به بهبود نتایج پایش کمک کنند. [Hadi](#) و همکاران (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای با تمرکز بر دریاچه ارومیه، به مقایسه شاخص‌های طیفی مختلف برای استخراج پهنه‌های آبی شور در محیط Google Earth Engine پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که شاخص NDWI در مقایسه با شاخص‌هایی مانند AWEIS، AWEInSh و NDVI از

اهمیت اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، کمتر به صورت جامع و مبتنی بر سری زمانی بلندمدت مورد بررسی قرار گرفته است. دریاچه نمک به عنوان یکی از پهنه های آبی مهم واقع در منطقه ای با اقلیم خشک، در سال های اخیر تحت تأثیر کاهش بارش ها و بهره برداری بی رویه از منابع آبی، تغییرات قابل توجهی را در سطح آب خود تجربه کرده است. از این رو، بررسی روند تغییرات پهنه آبی این دریاچه می تواند نقش مهمی در شناخت فرایند خشکیدگی و پیامدهای محیط زیستی آن ایفا کند. افزون بر این، در بسیاری از مطالعات پیشین، تمرکز اصلی بر استخراج سطح آب در چند مقطع زمانی یا مقایسه چند شاخص محدود بوده و کمتر از ظرفیت داده های جهانی آب و تحلیل های چندمقیاسی برای تبیین روندهای بلندمدت و الگوهای زمانی آبگیری و خشکیدگی استفاده شده است.

بر این اساس، این پژوهش با هدف پایش تغییرات سطح آب دریاچه نمک با استفاده از تصاویر ماهواره ای Landsat در یک دوره زمانی بلندمدت و در بستر Google Earth Engine انجام شده است. در این مطالعه، با بهره گیری از شاخص طیفی شناسایی آب (NDWI) و نیز محصولات JRC Global Surface Water شامل لایه های Seasonality و Transition، روند تغییرات پهنه آبی دریاچه نمک در مقیاس های ماهانه، فصلی و سالانه بررسی و تحلیل شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب همزمان شاخص های طیفی و داده های جهانی آب برای تحلیل چندمقیاسی پویایی سطح آب دریاچه نمک نهفته است؛ رویکردی که می تواند علاوه بر تبیین دقیق تر روند آبگیری و خشکیدگی این پهنه آبی، چارچوبی کاربردی برای پایش سایر دریاچه ها و تالاب های واقع در مناطق خشک و نیمه خشک کشور نیز فراهم نماید.

مواد و روش ها

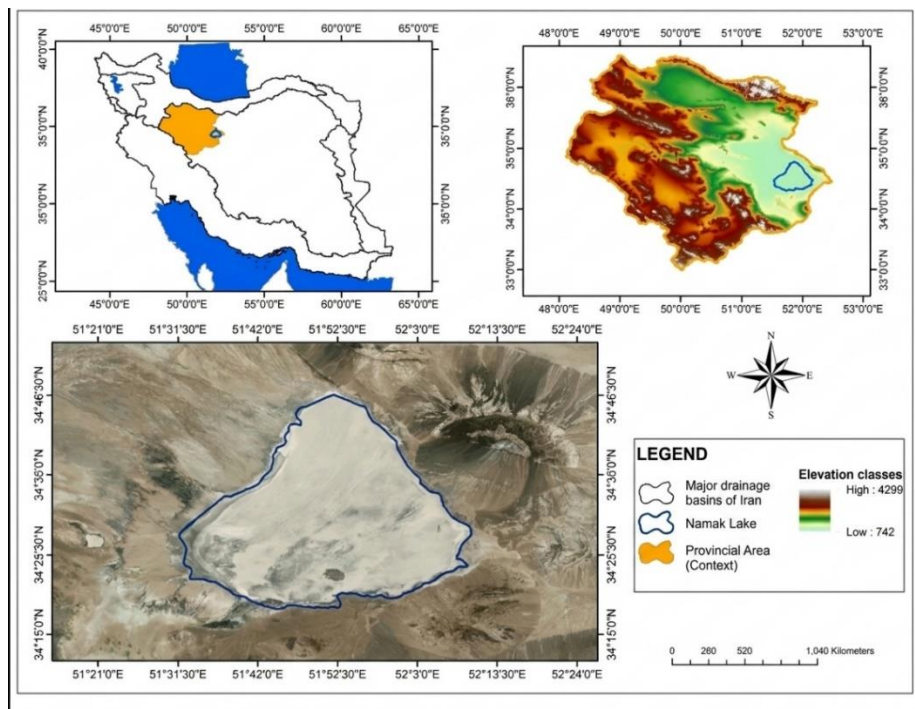
منطقه مورد مطالعه

دریاچه نمک

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، پهنه دریاچه نمک در

مرکز ایران است که به عنوان بخش نهایی و کم شیب یک حوزه آبخیز بسته با وسعت حدود ۹۲۵۶۰ کیلومتر مربع قرار دارد (Abtahi et al., 2012). محدوده دریاچه نمک بین طول های ۳۲' ۵۱° تا ۱۰' ۵۲° شرقی و عرض های ۱۸' ۳۴° تا ۴۶' ۳۴° عرض شمالی واقع شده (شکل ۱) و از شمال به ارتفاعات البرز مرکزی، از غرب به ارتفاعات خرقان و قیدار، از جنوب و جنوب شرق به ارتفاعات زاگرس مرکزی و از شرق به تپه ماهورهای حاشیه شرقی محدود می شود (Sheikh et al., 2020). این حوضه دارای چندین رودخانه اصلی شامل شور، کرج، جاجرود، قره چای و قم رود است که مهمترین تأمین کنندگان رواناب ورودی به پهنه دریاچه محسوب می شوند (Khosrobeigi Bozchaloei and Vafakhah, 2017). الگوی توپوگرافی منطقه از ارتفاعات پیرامونی به سمت فروافتادگی مرکزی هدایت شده و موجب تمرکز رواناب در پهنه پایانی دریاچه نمک می شود. دریاچه نمک یک پهنه تبخیری-نمکی (پلایا) با رفتار کاملاً فصلی است و وسعت آن طی سال های مختلف به شدت متغیر است. در دوره های خشک، سطح دریاچه عمدتاً از رسوبات سیلتی-رسی و نمک های تبخیری تشکیل شده و در سال های تر، پهنه آبگیر دریاچه گسترش می یابد. براساس داده های هیدرولوژیک موجود، حداکثر سطح آبگیری ثبت شده در دریاچه در شرایط پربارش حدود ۱۸۲۵ کیلومتر مربع است که نشان دهنده بیشترین گستره آبی گزارش شده برای این پهنه می باشد (Sheikh et al., 2020). از نظر ژئومورفولوژیکی، دریاچه نمک بخشی از کویر مرکزی ایران است و در یک فروافتادگی بسته تشکیل شده که تبخیر سالانه در آن معمولاً بین ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ میلی متر برآورد می شود، در حالی که میانگین بارش سالانه کمتر از ۱۵۰ میلی متر است (Nodefarahani et al., 2020). اختلاف چشمگیر بین بارش و تبخیر سبب شده است که نوسانهای سطح آب دریاچه بالا باشد و بخش های وسیعی از کف دریاچه در بسیاری از سال ها خشک باقی بماند. این ویژگی، همراه با رسوبات ریزدانه و نمکی، دریاچه نمک را به یکی از کانون های بالقوه و فعال تولید گردوغبار در فلات

مرکزی ایران تبدیل کرده است (Rahimi and Khosravi, 2025).



شکل ۱- حوزه آبخیز دریاچه نمک

Figure 1-Namak Lake Basin

همچنین برای حذف خطاهای احتمالی ناشی از راه شدگی در تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷، از الگوریتم خودکار-gap-filling مبتنی بر Temporal Interpolation استفاده شد (Zhu and Woodcock, 2012). با طراحی و پیاده‌سازی کد اختصاصی در محیط Google Earth Engine، تصاویر ماهانه لندست در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استخراج شد که در مجموع شامل ۳۶۰ تصویر ماهانه می‌باشد. این رویکرد امکان بررسی تغییرات زمانی پیوسته و تحلیل روندهای بلندمدت پهنه‌های آبرگیر دریاچه نمک را فراهم کرد.

استخراج پهنه‌های آبرگیر با استفاده از شاخص NDWI برای تفکیک آب از سایر سطوح، از شاخص NDWI استفاده شد که یک شاخص معتبر و پرکاربرد برای شناسایی آب سطحی است (McFeeters, 1996).

روش تحقیق

استخراج و پایش پهنه‌های آبرگیر دریاچه نمک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور استخراج و پایش پهنه‌های آبرگیر و خشک دریاچه نمک طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴)، از تصاویر ماهواره‌ای لندست در محیط سامانه Google Earth Engine استفاده شد. بهره‌گیری از این سامانه مبتنی بر زیرساخت ابری، امکان پردازش حجم زیادی از داده‌های سنجش‌ازدور و تحلیل روندهای زمانی-مکانی را با سرعت بالا فراهم می‌کند (Gorelick et al., 2017).

در این پژوهش از تصاویر Surface Reflectance لندست ۵، لندست ۷ و لندست ۸ استفاده شد. این محصولات با انجام تصحیحات رادیومتری و اتمسفری سطح ۲، قابلیت مقایسه زمانی بین سنجنده‌ها را به طور قابل‌اتکا افزایش می‌دهند (Vermont et al., 2016).

رابطه (۱)

$$(a) \quad NDWI = \frac{B_{Green} - B_{NIR}}{B_{Green} + B_{NIR}}$$

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

Table 1 – Bands used in the calculation of the NDWI index

Landsat Sensor	Green Band	Near-Infrared (NIR) Band
Landsat 5	SR_B2	SR_B4
Landsat 7	SR_B2	SR_B4
Landsat 8	SR_B3	SR_B5

آماري مورد مطالعه، از چند روش متداول تحليل روند شامل سری زمانی، رگرسیون خطی، شیب سن (Sen's Slope) و تحلیل دهه‌ای استفاده شد. این روش‌ها امکان بررسی رفتار بلندمدت داده‌ها و تشخیص وجود یا عدم وجود روند افزایشی یا کاهش‌ی را فراهم می‌کنند.

تحلیل سری زمانی (Time Series Analysis)

در این روش، مقادیر پهنه آبیگر سالانه به صورت یک سری زمانی نمایش داده شد تا تغییرات بین سال‌های مختلف به طور مستقیم قابل مشاهده باشد. ترسیم نمودار سری زمانی یکی از ساده‌ترین و در عین حال مؤثرترین روش‌ها برای بررسی الگوهای تغییرات، نوسان‌ها و روندهای احتمالی در داده‌های پهنه آبیگر است. در این مطالعه، نمودار سری زمانی پهنه آبیگر سالانه برای کل دوره آماری ترسیم شد تا الگوی تغییرات و رفتار کلی پهنه آبیگر در طول زمان مشخص شود (Shumway and Stoffer, 2017; Box, 2013).

رگرسیون خطی (Linear Regression)

برای تعیین جهت و شدت روند تغییرات پهنه آبیگر سالانه، از روش رگرسیون خطی استفاده شد. در این روش، رابطه‌ای خطی بین زمان (سال) و پهنه آبیگر سالانه برقرار می‌شود و شیب خط رگرسیون نشان‌دهنده میزان افزایش یا کاهش پهنه آبیگر در طول زمان است. اگر شیب خط مثبت باشد نشان‌دهنده روند افزایشی و اگر منفی باشد نشان‌دهنده روند کاهش‌ی در داده‌ها خواهد بود (Montgomery et al., 2012; Helsel et al., 1993).

(2012; Helsel et al., 1993)

پس از محاسبه شاخص NDWI برای هر تصویر ماهانه، برای تعیین آستانه مناسب شاخص NDWI برای شناسایی و تفکیک پدیده آب، از یک رویکرد تجربی استفاده شد. در این روش، ابتدا بازه‌های آستانه‌ای توصیه‌شده در مطالعات پیشین برای تفکیک آب از غیرآب (مانند مقادیر نزدیک به صفر تا حدود ۰/۳) به صورت گام به گام بررسی شدند. سپس مقادیر پیشنهادی در چندین تصویر منتخب با شرایط هیدرولوژیکی متفاوت اعمال و نتایج حاصل با تصاویر رنگی کاذب (False Color Composites) و بررسی بصری (Visual Interpretation) مقایسه گردید. در این مرحله، مرزهای واقعی پهنه‌های آب در ترکیب‌های رنگی حساس به رطوبت (مانند SWIR-NIR-Green) مبنای ارزیابی صحت جداسازی پیکسل‌ها قرار گرفت. آستانه‌ای انتخاب شد که بیشترین همخوانی را با الگوی واقعی توزیع آب در تصاویر داشته باشد و کمترین میزان طبقه‌بندی نادرست پیکسل‌های نمک‌زار، رسوبات مرطوب یا سطوح با بازتاب میانی را ایجاد کند. انتخاب آستانه NDWI براساس مقایسه نتایج با تصاویر رنگی کاذب و ارزیابی بصری پیکسل‌های آب و غیرآب، روشی پذیرفته‌شده در ادبیات علمی است و به‌ویژه در مناطق شور و تبخیری عملکرد قابل‌اتکایی دارد (Xu, 2006). بدین ترتیب، پهنه‌های آبیگر ماهانه دریاچه نمک برای کل دوره زمانی استخراج گردید.

ارزیابی روند تغییرات پهنه آبیگر سالانه

به منظور بررسی روند تغییرات پهنه آبیگر سالانه در دوره

روش شیب سن (Sen's Slope Estimator)

روش Sen's Slope یکی از روش‌های ناپارامتری پرکاربرد در تحلیل روند داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی است. این روش نسبت به داده‌های پرت و توزیع غیرنرمال حساسیت کمتری دارد و شیب واقعی روند را با استفاده از میانه شیب‌های بین تمام جفت داده‌ها محاسبه می‌کند. به همین دلیل در مطالعات منابع آب به‌عنوان روشی قابل اعتماد برای تعیین شدت روند مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sen, 1968; Hirsch et al., 1982; Helsel and Hirsch, 1993).

پهنه‌بندی آبگیری دریاچه نمک با استفاده از الگوریتم

Transition

به‌منظور ارزیابی تغییرات بلندمدت و پایداری پهنه‌های آبی دریاچه نمک، از لایه Transition متعلق به مجموعه داده‌های نقشه‌های جهانی آب‌های سطحی مرکز تحقیقات مشترک اتحادیه اروپا (JRC Global Surface Water Mapping Layers) استفاده شد. این مجموعه داده براساس تحلیل سری زمانی تصاویر ماهواره‌های Landsat ۵، ۷ و ۸ در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تولید شده است (Pekel et al., 2016). در فرایند تولید

این محصول، ابتدا هر پیکسل به‌طور مستقل با استفاده از یک سامانه خبره (Expert System) به دو کلاس «آب» و «غیرآب» طبقه‌بندی می‌شود. این سامانه خبره با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین تصمیم‌گیری مبتنی بر ویژگی‌های طیفی باندهای مختلف لندست، داده‌های آموزشی و فیلترهای مکانی، پیکسل‌های آب را در شرایط مختلف محیطی از جمله وجود ابر، سایه، برف، مناطق شهری و پوشش گیاهی شناسایی می‌کند. نتیجه این مرحله، تولید نقشه‌های ماهانه باینری آب و غیرآب برای کل دوره زمانی مطالعه است (Pekel et al., 2016). در مرحله بعد، با تحلیل سری زمانی این نقشه‌های ماهانه، شاخصی به نام فراوانی حضور آب (Water Occurrence) برای هر پیکسل محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده درصد دفعاتی است که یک پیکسل در طول سال به‌صورت آب مشاهده شده است. براساس این شاخص، پیکسل‌هایی که بیش از ۷۵ درصد از مشاهدات سالانه به‌صورت آب ثبت شده‌اند به‌عنوان آب دائمی و پیکسل‌هایی که کمتر از این مقدار آب داشته‌اند به‌عنوان آب فصلی در نظر گرفته می‌شوند. سپس الگوریتم Transition با مقایسه وضعیت آبگیری هر پیکسل در ابتدای دوره (۱۹۸۴) و پایان دوره (۲۰۲۱)، تغییرات رخ داده را شناسایی کرده و آن‌ها را در قالب ۱۰ کلاس تغییرات طبقه‌بندی می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲- کلاس‌های مورد استفاده در لایه Transition مجموعه داده JRC

Table 2 – Classes used in the Transition layer of the JRC Global Surface Water dataset

Code	Value	Description
0	No Data	Pixel with no valid observations during the entire period
1	Permanent Water	Water present permanently at start and end years
2	New Permanent Water	Non-permanent at start, permanent at end
3	Lost Permanent Water	Permanent at start, non-permanent at end
4	Seasonal Water	Seasonal at both start and end
5	New Seasonal Water	Non-seasonal at start, seasonal at end
6	Lost Seasonal Water	Seasonal at start, absent at end
7	Seasonal to Permanent	Seasonal at start, permanent at end
8	Permanent to Seasonal	Permanent at start, seasonal at end
9	Ephemeral Permanent Water	Occasionally permanent, not stable over the whole period
10	Ephemeral Seasonal Water	Occasionally seasonal, not stable

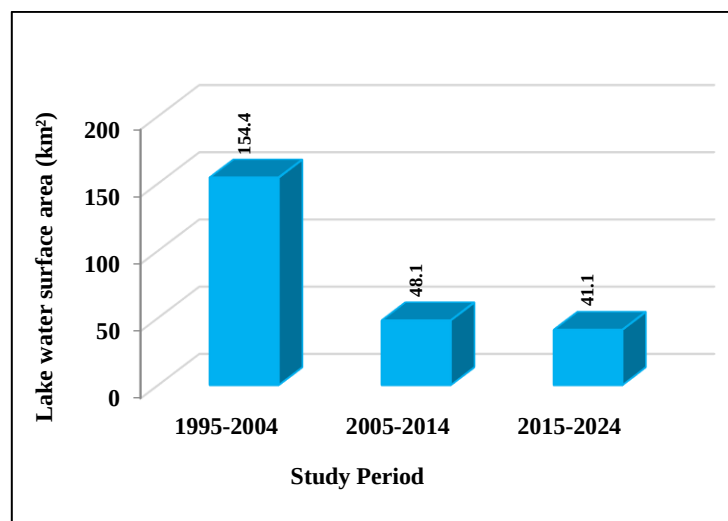
(همیشه آبدار)، مقادیر ۱ تا ۱۱ نشان‌دهنده آبگیری فصلی (با تداوم متفاوت) و مقدار صفر نشان‌دهنده پهنه‌های کاملاً خشک هستند. به‌کارگیری الگوریتم فصلی‌بودن در این پژوهش امکان تفکیک پهنه‌های دارای آبگیری دائمی، فصلی و موقت را در مقیاس بلندمدت فراهم کرده است. نتایج حاصل از این بخش، درک دقیق‌تری از رفتار هیدرولوژیکی دریاچه نمک، نوسانهای زمانی سطح آب و تأثیر عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی بر گسترش یا پس‌روی پهنه‌های آبی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مدیریت پایدار، ارزیابی مخاطرات محیطی و برنامه‌ریزی احیای تالاب‌های مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج

نتایج بدست آمده از استخراج متوسط پهنه آبگیر دریاچه نمک در سه بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) در شکل‌های (۲ و ۳) ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میزان آبگیری دریاچه در سه دهه اخیر کاهشی بوده، به‌طوری‌که متوسط پهنه آبگیر در دهه اول (۲۰۰۴-۱۹۹۵) ۱۵۴/۴ کیلومترمربع، در دهه دوم (۲۰۱۴-۲۰۰۵) ۴۸/۱ کیلومترمربع و در دهه سوم (۲۰۲۴-۲۰۱۵) ۴۱/۱ کیلومترمربع بوده است (شکل ۲).

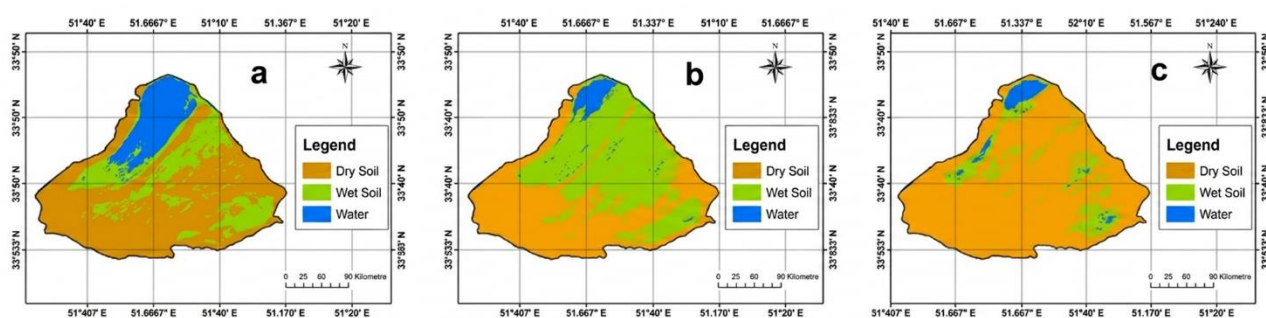
یادآوری می‌شود که این طبقه‌بندی به‌صورت خودکار و مبتنی بر تحلیل سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای انجام شده و در این پژوهش هیچ‌گونه طبقه‌بندی نظارت‌شده‌ای توسط پژوهشگر اعمال نشده است؛ بلکه از طبقه‌بندی استاندارد ارائه‌شده در مجموعه داده JRC استفاده شده است (Pekel *et al.*, 2016). در این پژوهش، این طبقه‌بندی برای شناسایی پهنه‌های آبی پایدار دریاچه نمک و مناطقی که در معرض تبدیل به سطوح فصلی یا کاملاً خشک قرار گرفته‌اند، مورد استفاده قرار گرفت.

پهنه‌بندی آبگیری دریاچه نمک با استفاده از الگوریتم *Seasonality* به منظور بررسی الگوی زمانی و تداوم آبگیری در پهنه‌های مختلف دریاچه نمک، از الگوریتم فصلی‌بودن (*Seasonality*) استفاده شد. این الگوریتم نیز از محصولات مجموعه داده‌های جهانی آب‌های سطحی مرکز تحقیقات مشترک اتحادیه اروپا بوده و بر پایه همان سری‌های زمانی ماهانه آب و غیرآب (حاصل از سامانه خبره) تولید می‌شود. روش کار در این الگوریتم به این صورت است که برای هر پیکسل، تعداد ماه‌هایی از سال که در وضعیت آب‌گرفتگی قرار داشته، محاسبه و در قالب مقادیری بین صفر تا ۱۲ نمایش داده می‌شود. در این نقشه، پیکسل‌های با مقدار ۱۲ نشان‌دهنده پهنه‌های آبگیری دائمی



شکل ۲- نمودار متوسط پهنه آبگیر دریاچه نمک در سه دهه مطالعاتی

Figure 2 – Average water surface area of Lake Namak over the three decades of study

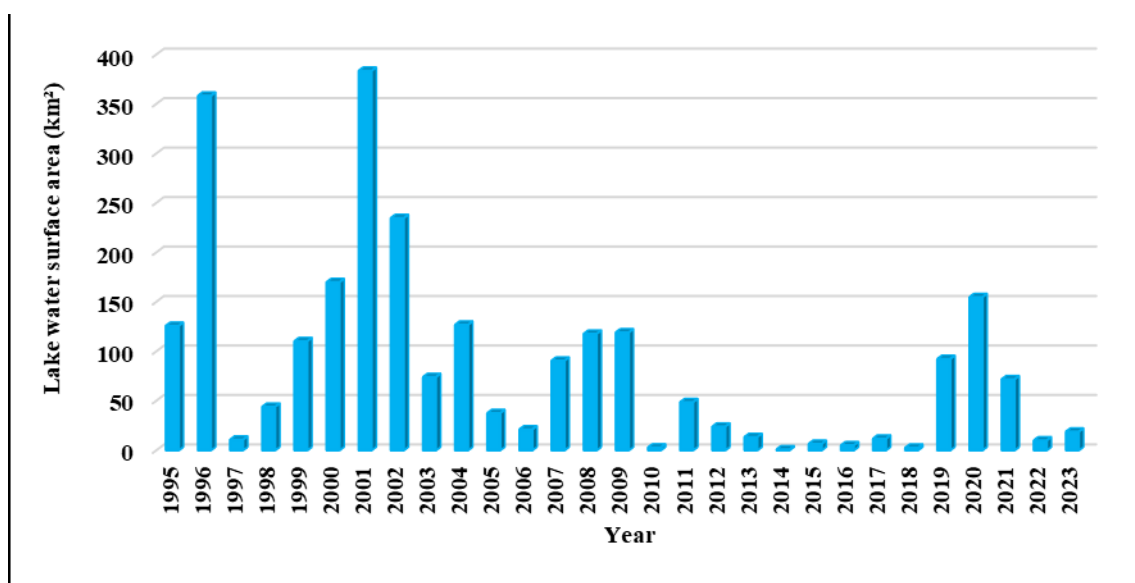


شکل ۳- متوسط پهنه آبگیر دریاچه نمک در سه دهه مطالعاتی: (a) ۱۹۹۵-۲۰۰۴ (b) ۲۰۰۵-۲۰۱۴ (c) ۲۰۱۵-۲۰۲۴

Figure 3 – Average water surface area of Lake Namak over the three decades of study: a) 1995–2004; b) 2005–2014; c) 2015–2024

میزان آبگیری دریاچه به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ بوده و مساحت متوسط پهنه آبگیر سالانه در این سال‌ها برابر $383/6$ و 1 کیلومتر مربع بوده است.

همچنین نتایج بدست آمده از روند تغییرات متوسط پهنه آبگیر سالانه دریاچه نمک، در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین

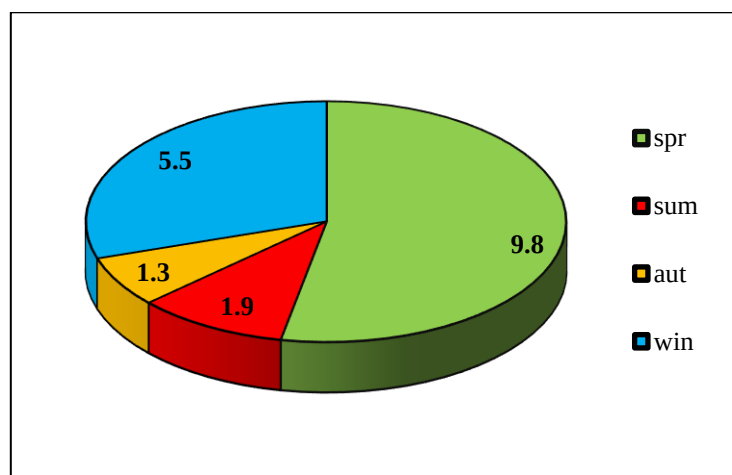


شکل ۴- متوسط بلندمدت پهنه آبی سالانه دریاچه نمک

Figure 4 – Long Average annual water surface area of Namak Lake

دریاچه نمک مربوط به فصل زمستان (win) است که به‌طور متوسط $5/4$ درصد از دریاچه نمک آبدار بوده است. همچنین کمترین میزان آبگیری دریاچه نمک مربوط به فصل پاییز (aut) و پس از آن مربوط به تابستان (sum) است که به ترتیب متوسط آبگیری $1/4$ و $1/5$ درصدی را نشان می‌دهد.

شکل (۵) درصد آبگیری دریاچه نمک در هر فصل بدست آمده از آمار ۳۰ ساله آبگیری دریاچه نمک (۲۰۲۴-۱۹۹۵) را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که نشان داده شده است بیشترین میزان آبگیری دریاچه نمک مربوط به فصل بهار (spr) است که به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد از دریاچه نمک آبدار بوده است. پس از آن، بیشترین میزان آبگیری

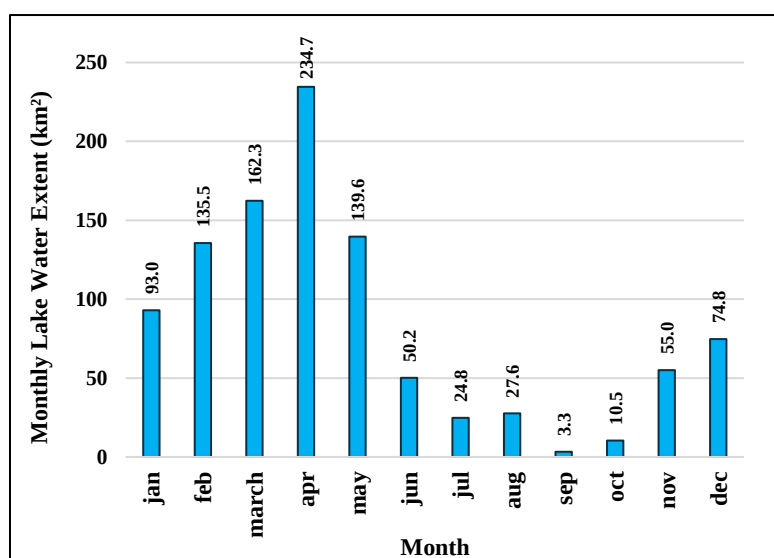


شکل ۵- درصد پهنه آبگیر متوسط فصلی

Figure 5 – Percentage of average seasonal water surface area

آبگیری دریاچه نمک هستند. ماه‌های سپتامبر (sep)، اکتبر (oct) و آگوست (aug) نیز به ترتیب با مساحت ۲/۷، ۱۰ و ۲۴/۷ کیلومترمربع، کم آب‌ترین ماه‌های آبگیری دریاچه نمک می‌باشند.

شکل (۶) نمودار متوسط پهنه آبی ماهانه دریاچه نمک را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ماه‌های اپریل (apr)، می (may) و مارچ (march) به ترتیب با مساحت ۲۳۰/۹، ۱۵۳/۹ و ۱۵۲ کیلومترمربع، پرآب‌ترین ماه‌های



شکل ۶- نمودار متوسط پهنه آبگیر ماهانه دریاچه نمک (km²)

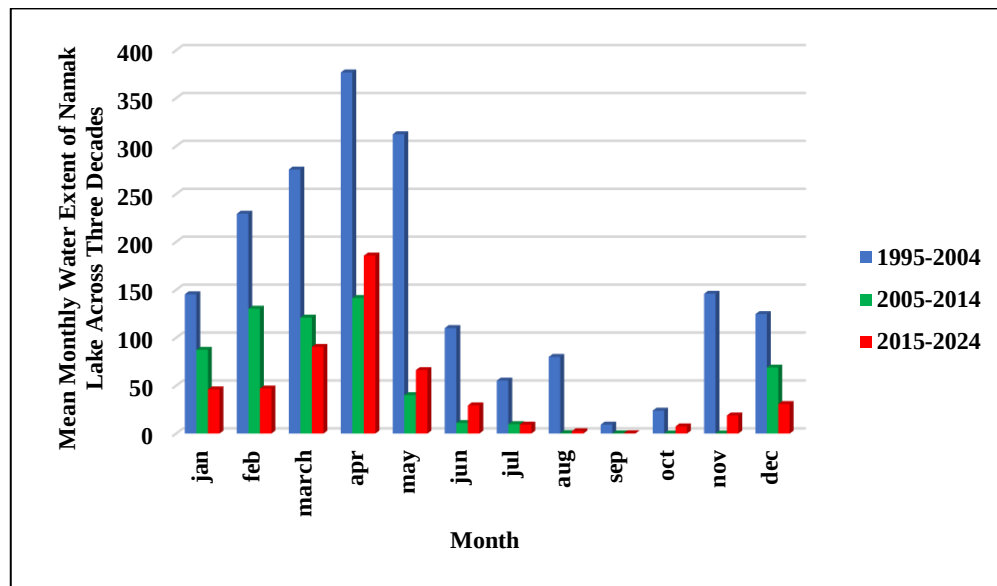
Figure 6 – Average monthly water surface area of Lake Namak (km²)

آبگیری ماهانه دریاچه در سه دهه (به ترتیب ۱۹۹۵-۲۰۰۴، ۲۰۰۵-۲۰۱۴ و ۲۰۱۵-۲۰۲۴) استخراج و در شکل ۷

همچنین به منظور ارزیابی روند تغییرات پهنه آبگیر ماهانه دریاچه نمک در سه دهه اخیر، متوسط مساحت

تابستان (به جز آگوست) و مارس از فصل بهار کاهش پهنه آبی دریاچه را مشاهده می‌کنیم. اما در ماه‌های فصل پاییز و دو ماه از فصل بهار (اپریل و می) شاهد افزایش پهنه آب دریاچه هستیم. اما روند کلی نمودار پهنه آبی دریاچه، نشان از کاهش پهنه آبی دریاچه در طول سه دهه اخیر دارد.

نمایش داده شده است. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود، در تمامی ماه‌های سال در دهه دوم (۲۰۱۴-۲۰۰۵) نسبت به دهه اول (۱۹۹۵-۲۰۰۴)، پهنه آبی دریاچه کاهش نسبتاً شدیدی را نشان داده است. در دهه سوم (۲۰۲۴-۲۰۱۵) نسبت به دهه دوم (۲۰۱۴-۲۰۰۵) نیز، در ماه‌های فصل زمستان،

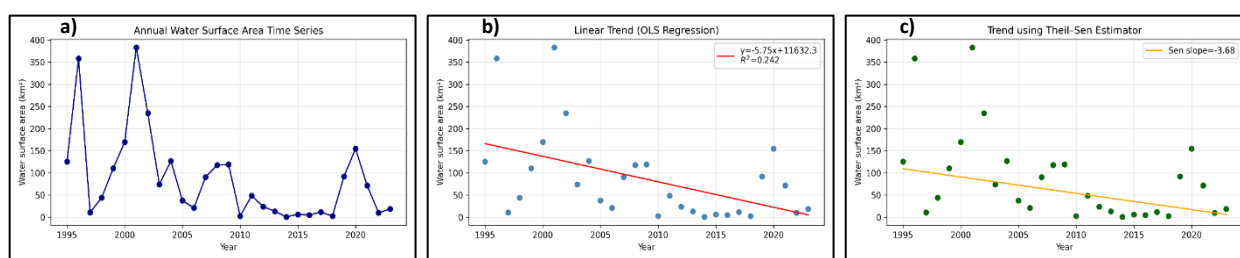


شکل ۷- مقایسه متوسط پهنه آبگیر ماهانه دریاچه نمک در سه دهه (km²)

Figure 7-Average monthly water surface area of Lake Namak over three decades (km²)

معنادار در پهنه آبی سالانه می‌باشد. شیب منفی این خط نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه، کاهش تدریجی در وسعت پهنه آبی رخ داده است. در شکل c، روند برآورد شده با روش شیب سن نیز یک روند کاهشی را تأیید می‌کند. مقدار شیب سن نشان‌دهنده شدت تغییرات سالانه بوده و یافته‌های رگرسیون خطی را تأیید می‌نماید. به‌طورکلی، مقایسه همزمان سه روش نشان می‌دهد که هر سه روش وجود روند کاهشی در پهنه آبی سالانه را تأیید می‌کنند. این هم‌پوشانی نتایج، بیانگر کاهش تدریجی منابع آب سطحی دریاچه طی بازه مطالعه است.

تحلیل مقایسه‌ای روند تغییرات پهنه آبی سالانه با استفاده از سری زمانی، رگرسیون خطی و روش شیب سن نتایج تحلیل روند پهنه آبی سالانه دریاچه براساس سه روش مختلف شامل سری زمانی، رگرسیون خطی و شیب سن (شکل ۸) ارائه شده است. در شکل a، سری زمانی پهنه آبی سالانه نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه سال ۲۰۰۱ رخ داده و پس از آن، کاهش قابل توجه و پایدار مشاهده می‌شود. نوسانهای دوره‌ای نیز مشخص هستند اما روند کلی تغییرات کاهشی است. در شکل b، نتایج رگرسیون خطی و خط روند برازش شده نمایانگر وجود یک روند کاهشی

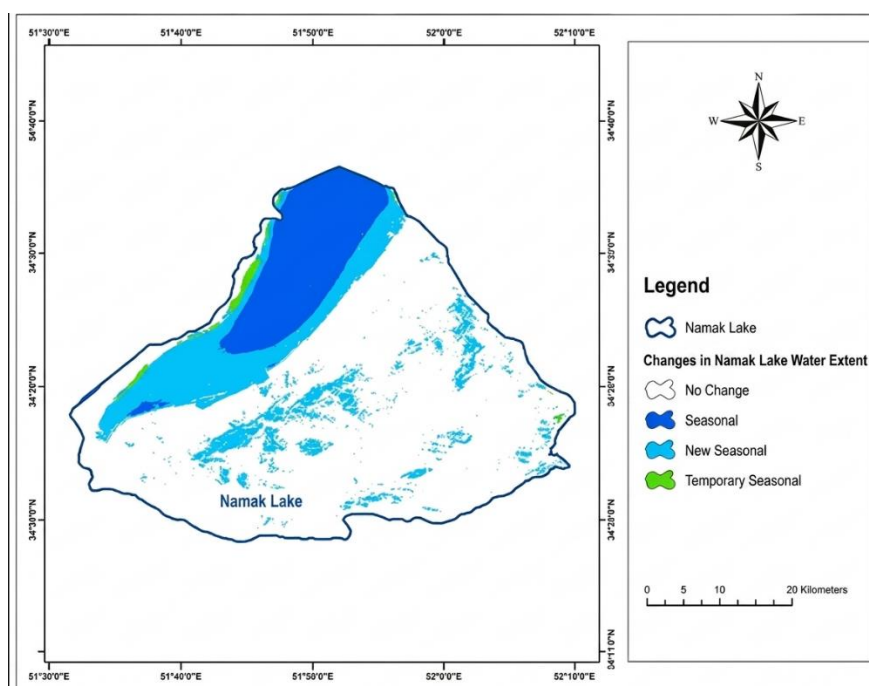


شکل ۸- روند تغییرات پهنه آبی سالانه دریاچه نمک: (a) - سری زمانی پهنه آبی، (b) - با تحلیل رگرسیون خطی، (c) - با روش شیب سن

Figure 8 – Trend of annual water extent changes of the Salt Lake: a) Time series of water extent, b) Linear regression analysis, c) Sen's slope method

الگوریتم Transition در شکل ۹ نمایش داده شده است. این نقشه تغییرات رخ داده در پهنه‌های آبگیر بین دو سال ۱۹۸۴ نسبت به ۲۰۲۰ را در قالب ۴ کلاس نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل پهنه آبگیر دریاچه نمک با الگوریتم Transition
نتایج نقشه تغییرات پهنه آبگیر دریاچه نمک با استفاده از



شکل ۹- تغییرات پهنه آبگیر دریاچه نمک در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۸۴

Figure ۹- Changes in the water areas of the Namak Lake in 2020 compared to 1984

۱۲۸۸/۰۸ کیلومترمربع و سهم ۷۰/۴ درصدی، بیشترین گستره را به خود اختصاص داده است که بیانگر پایداری نسبی بخش عمده‌ای از پهنه‌های آبگیر دریاچه در بازه زمانی مورد بررسی است. پهنه‌های فصلی با مساحت

نقشه تغییرات استخراج شده در محیط Google Earth Engine، پهنه‌های آبگیر را در چهار کلاس «بدون تغییر»، «فصلی»، «فصلی جدید» و «فصلی موقت» طبقه‌بندی می‌کند. براساس نتایج، کلاس بدون تغییر با مساحت

فصلی موقت با ۱۲/۸۴ کیلومترمربع (۰/۷ درصد) است که بیانگر وقوع آب‌گرفتگی‌های کوتاه‌مدت و ناپایدار در پاسخ به رخداد‌های حدی می‌باشد. در مجموع، اگرچه بخش قابل‌توجهی از پهنه‌های آبگیر دریاچه نمک پایداری خود را حفظ کرده‌اند، اما افزایش پهنه‌های فصلی جدید نشان‌دهنده تشدید ناپایداری هیدرولوژیکی و ضرورت پایش مستمر این اکوسیستم حساس با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور است.

۲۳۷/۲۹ کیلومترمربع (۱۳ درصد) نشان‌دهنده نوسان طبیعی آبداری وابسته به بارش‌های فصلی و رواناب‌های سطحی هستند. در مقابل، افزایش پهنه‌های فصلی جدید با مساحت ۲۹۰/۸۴ کیلومترمربع (۱۵/۹ درصد) حکایت از تغییر در رفتار هیدرولوژیکی دریاچه طی دهه‌های اخیر دارد که می‌تواند تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی در حوزه آبخیز رخ داده باشد. کمترین سهم مربوط به کلاس

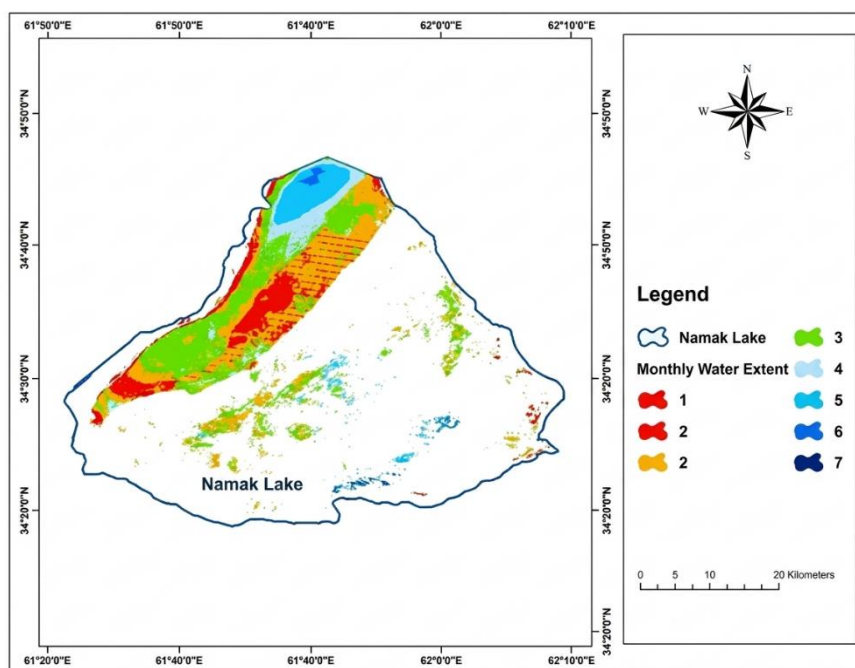
جدول ۳- مساحت پهنه‌های آبگیر دریاچه نمک به روش Transition

Table 3- The area of watery areas of the Namak Lake by Transition method

The number of inundation months	Area of zones (Km ²)	Percentage of inundation zones to total area
Without Change	1288.08	70.4
Seasonal	237.29	13.0
New seasonal	290.84	15.9
Ephemeral seasonal	12.84	0.7

این نقشه پهنه‌های آبگیر دریاچه را به صورت ماهانه و در قالب ۱۲ کلاس نمایش می‌دهد و کلاس‌های ۱ تا ۱۲، نشان‌دهنده تعداد ماه آگیری هر کلاس است.

نتایج تحلیل پهنه آبگیر دریاچه نمک با الگوریتم Seasonality نتایج ارزیابی پهنه آبگیر ماهانه دریاچه نمک با استفاده از روش Seasonality، در (شکل ۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- پهنه آبگیر دریاچه نمک به صورت ماهانه

Figure 10- Monthly inundation of the Namak Lake

این شکل براساس تعداد ماه‌هایی از سال که هر پهنه از دریاچه نمک آبدار هستند طبقه‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش وسیعی از دریاچه نمک کمتر از ۷ ماه از سال آبدار می‌باشد. جدول (۴) مساحت پهنه‌های آبی دریاچه نمک را نشان می‌دهد. بر این اساس، بیشترین سهم مساحت مربوط به کلاس صفر ماه آبداری با مساحت $1301.9/9$ کیلومتر مربع و سهم $71.3/3$ درصدی از کل مساحت دریاچه است که بیانگر خشکی غالب و فقدان آبداری پایدار در بخش عمده‌ای از پهنه دریاچه نمک می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده کاهش شدید تداوم آب‌گرفتگی و غلبه شرایط خشک در مقیاس سالانه است. پهنه‌هایی با یک تا سه ماه

آبداری، در مجموع سهم قابل‌توجهی از مساحت دریاچه را شامل می‌شوند، به‌طوری‌که کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ ماهه به‌ترتیب $4/3$ ، $10/2$ و $8/6$ درصد از مساحت کل را به خود اختصاص داده‌اند. این پهنه‌ها عمدتاً بیانگر آب‌گرفتگی‌های کوتاه‌مدت و وابسته به بارش‌های فصلی و رخدادهای مقطعی هیدرولوژیکی هستند. در مقابل، پهنه‌هایی با چهار ماه یا بیشتر آبداری سهم بسیار محدودی از کل مساحت دارند و مجموع آن‌ها کمتر از ۶ درصد است. به‌ویژه کلاس‌های با بیش از شش ماه آبداری (کلاس‌های ۶ و ۷) مساحتی ناچیز را شامل می‌شوند که بیانگر نبود پهنه‌های دارای آب‌گرفتگی پایدار و دائمی در دریاچه نمک است.

جدول ۴- مساحت پهنه‌های آبگیر دریاچه نمک به روش Seasonality

Table 4- The area of watery areas of the Namak Lake by seasonality method

The number of inundation months	Area of zones (Km ²)	Percentage of inundation zones to total area
0	1301.9	71.3
1	78.7	4.3
2	187.0	10.2
3	156.1	8.6
4	51.6	2.8
5	46.7	2.6
6	7.1	0.4
7	0.01	0.00

بحث

بررسی تغییرات پهنه آبگیر دریاچه نمک طی بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور GSWE و پردازش در محیط Google Earth Engine نشان داد که این دریاچه با کاهش مستمر و قابل‌توجه در مساحت و تداوم آبگیری مواجه بوده است. نتایج تحلیل روند تغییرات زمانی پهنه آبی نشان داد که میانگین مساحت پهنه آبی از دهه نخست دوره مطالعه به دهه‌های بعدی کاهش یافته و در عین حال نوسان سالانه آن افزایش پیدا کرده است. این وضعیت بیانگر تغییر الگوی آبداری دریاچه از یک سیستم نسبتاً نیمه‌پایدار به سیستمی فصلی و ناپایدار است که آبگیری آن به شدت به رخدادهای اقلیمی کوتاه‌مدت وابسته شده است. چنین الگویی نشان می‌دهد که دریاچه نمک به تدریج از یک پهنه

آبی با پایداری نسبی به سامانه‌ای با وابستگی شدید به سیلاب‌ها و بارش‌های مقطعی تبدیل شده است. نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین در پهنه‌های آبی شور فلات مرکزی ایران همخوانی دارد. برای نمونه، [Fayzollahpour \(۲۰۲۳\)](#) در بررسی تغییرات زمانی پهنه آبی تالاب میقان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی، روند کاهشی قابل‌توجهی در سطح آب این تالاب گزارش کرده است. همچنین [Rohani](#) و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای Landsat و داده‌های اقلیمی نشان دادند که دریاچه‌های نمکی فلات مرکزی ایران ازجمله دریاچه نمک و حوض سلطان طی دهه‌های اخیر کاهش چشمگیری در سطح آب تجربه کرده‌اند و آبگیری آن‌ها بیش از گذشته به بارش‌های رگباری و رخدادهای موسمی وابسته شده است. افزون بر این، مطالعه [ÖZVAN](#)

به کاهش ماندگاری آب در دریاچه‌های داخلی منجر شود (Woolway et al., 2020; IPCC, 2021). در چنین شرایطی، دریاچه‌ها بیشتر به بارش‌های کوتاه‌مدت وابسته شده و پایداری هیدرولوژیکی آن‌ها کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از الگوریتم Transition نشان داد که بخش قابل‌توجهی از پهنه دریاچه در کلاس «بدون تغییر» قرار دارد، اما افزایش پهنه‌های «فصلی جدید» نشان‌دهنده تغییر در رژیم هیدرولوژیکی و افزایش وابستگی آبگیری دریاچه به شرایط اقلیمی کوتاه‌مدت است. همچنین نتایج الگوریتم Seasonality نشان داد که بیش از ۷۰ درصد مساحت دریاچه فاقد آبداری پایدار بوده و بسیاری از بخش‌های آن تنها بین یک تا سه ماه در سال دارای آب هستند؛ موضوعی که بیانگر نبود پایداری هیدرولوژیکی در این سامانه آبی است. چنین الگویی در بسیاری از دریاچه‌های بسته و شور مناطق خشک مشاهده شده است، زیرا این دریاچه‌ها فاقد خروجی سطحی بوده و به‌شدت نسبت به تغییرات ورودی آب و تبخیر حساس هستند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات دیگری نیز همسو است. برای نمونه، [Taheri](#) و [Dehkordi](#) و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی تغییرات پهنه‌های آبی ایران با استفاده از تصاویر Landsat نشان دادند که بسیاری از دریاچه‌ها و تالاب‌های داخلی کشور طی سال‌های اخیر روندی کاهشی و فصلی در سطح آب خود تجربه کرده‌اند. این مطالعه تأکید می‌کند که در پهنه‌های آبی بسته و شور در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش ورودی‌های آبی همراه با افزایش تبخیر می‌تواند به سرعت موجب کاهش سطح آب و تغییر رژیم هیدرولوژیکی شود. علاوه بر عوامل اقلیمی، برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که برداشت گسترده آب در بخش‌های کشاورزی و کاهش جریان‌های ورودی نیز می‌تواند در کاهش سطح آب دریاچه‌های داخلی نقش مهمی داشته باشد ([Madani](#), 2014; [Hassanzadeh et al.](#), 2012). همچنین کاهش ذخایر آب زیرزمینی در بسیاری از حوضه‌های ایران که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE گزارش شده است، می‌تواند باعث کاهش جریان پایه رودخانه‌ها و کاهش تغذیه

(۲۰۲۱) با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI کاهش قابل‌توجه سطح آب دریاچه نمک در دو دهه اخیر را نشان داده است که نتایج آن با الگوی تغییرات مشاهده‌شده در این پژوهش مطابقت دارد. به‌منظور درک بهتر عوامل هیدرولوژیکی مؤثر بر این تغییرات، روند پهنه آبی سالانه در دوره آماری مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل سری زمانی پهنه آبی نشان داد که پهنه آبی دریاچه نمک دارای نوسان قابل‌توجهی بوده و در مجموع یک روند کاهشی در طول دوره مطالعه مشاهده می‌شود. نتایج رگرسیون خطی نیز با برازش خط روند بر داده‌های پهنه آبی سالانه، کاهش تدریجی پهنه آبی در طول زمان را نشان داد. علاوه بر این، برآورد شیب سن (Sen's Slope) که یک روش ناپارامتری مقاوم در تحلیل روند مساحت پهنه آبی محسوب می‌شود، این روند کاهشی را تأیید کرد. تحلیل دهه‌ای پهنه آبی نیز نشان داد که میانگین پهنه آبی در دهه‌های اخیر نسبت به دهه‌های ابتدایی دوره مطالعه کاهش یافته است. نتایج مطالعات جهانی نیز نشان می‌دهد که کاهش سطح آب در بسیاری از دریاچه‌های جهان در دهه‌های اخیر مشاهده شده است. برای نمونه، Yao و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای گزارش کردند که بخش قابل‌توجهی از دریاچه‌های بزرگ جهان طی سه دهه گذشته با کاهش ذخیره آب مواجه شده‌اند که این روند عمدتاً تحت تأثیر ترکیبی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی قرار دارد. از سوی دیگر، تحلیل‌های فصلی و ماهانه بیانگر آن بود که بیشترین آبگیری دریاچه در فصل بهار و به‌ویژه در ماه‌های مارچ (March)، اپریل (April) و می (May) رخ می‌دهد. این الگو عمدتاً ناشی از بارش‌های رگباری و رواناب‌های موقتی در فلات مرکزی ایران است که باعث شکل‌گیری سیلاب‌های کوتاه‌مدت و آبگیری موقت دریاچه می‌شود. در مقابل، در فصل تابستان به دلیل افزایش شدید دما و تبخیر، سطح آب به سرعت کاهش یافته و بخش عمده دریاچه خشک می‌شود. مطالعات مرتبط با تغییرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز نشان می‌دهد که افزایش دمای هوا و تبخیر بالقوه می‌تواند

Landsat توسعه یافته‌اند (Pekel et al., 2016)، می‌تواند ابزار مؤثری برای ارزیابی تغییرات بلندمدت منابع آب باشد. در کنار این موضوع، مدیریت یکپارچه حوزه آبخیز، کنترل برداشت منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی از مهم‌ترین راهکارهایی هستند که برای کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد شده‌اند (UNEP, 2022).

دریاچه‌های پایین‌دست شود (Voss et al., 2013). در مجموع، این مطالعه نشان داد که دریاچه نمک در وضعیت ناپایداری هیدرولوژیکی شدید قرار دارد و ادامه روند فعلی می‌تواند پیامدهایی مانند افزایش تبخیر، تشدید شوری، کاهش کارکردهای اکولوژیکی و افزایش ظرفیت تولید گردوغبار داشته باشد. بنابراین، پایش مستمر پهنه‌های آبگیر مانند Global Surface Water که بر مبنای تصاویر

References

- Abtahi, M., Saif, A. and Khosroshahi, M. 2012. Investigation of the last Quaternary climate from the geomorphic evidence in Namak Lake basin, Central Iran. *Journal of Geography and Regional Planning*, 5(3): 93–107. <https://doi.org/10.5897/JGRP11.124>
- Box, G. 2013. Box and Jenkins: time series analysis, forecasting and control. In *A Very British Affair: Six Britons and the Development of Time Series Analysis During the 20th Century* (pp. 161–215). London: Palgrave Macmillan UK. <https://doi.org/10.1057/9781137291264>
- Cao, H., Han, L. and Li, L. 2022. Long-Term Land Surface Water Monitoring in the Yellow River Basin of China Based on Landsat Imagery on the Google Earth Engine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3: 9–16. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2022-9-2022>
- Fayzollahpour, M. 2023. Detection of changes in the water extent of Meyghan Wetland using spectral indices (NDWI, MNDWI, and AWEI) and supervised SVM models during the period 1994–2022. *Geographical Studies of Arid Regions*, 14: 104–119. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/JARGS.2023.404501.1045>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hadi, F. H. F., Ebadi, H. and Farhadi, H. 2024. Spatiotemporal Monitoring of Saline Water Body Changes Using Remote Sensing Data with a Focus on Comparing Spectral Indices (Case Study: Lake Urmia).
- Hassanzadeh, E., Zarghami, M. and Hassanzadeh, Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*, 26(1): 129–145. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9909-8>
- Helsel, D. R. and Hirsch, R. M. 1993. *Statistical methods in water resources* (Vol. 49). Elsevier.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R. and Smith, R. A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1): 107–121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jain, S. K. 2001. Development of integrated sediment rating curves using ANNs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127: 30–37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:1\(30](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:1(30)
- Karami, H. and Sayyadi, Z. 2024. Monitoring the dynamic changes of Miangaran wetland sub-basin using Google Earth Engine system. *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(130): 161–178. (In Persian) <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.1988493.2950>
- Khoshraveh, M., Abedi-Koupai, J. and Nikzad-Taheri, E. 2016. Detection of trends in hydro-climatological variables using parametric and non-parametric tests in Neka Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74): 1–14. (In Persian)
- Khosrobeigi Bozchaloei, S. and Vafakhah, M. 2017. Regional analysis of flow duration curve in Namak Lake basin, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 7(14): 228–236. <https://doi.org/10.29252/jwmr.7.14.236>
- Li, L., Skidmore, A., Vrieling, A. and Wang, T. 2019. A new dense 18-year time series of surface water

- fraction estimates from MODIS for the Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7): 3037–3056. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3037-2019>
- 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>
- 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>
- Montaseri, H., Mardani, R. and Reza Khalili. 2025. Evaluation of changes in the water level of Droudzan dam lake using the Normalized Difference Water Index (NDWI). *Journal of Environmental Science Studies*, 9(4): 9637–9644. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jess.2023.423153.2161>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. and Vining, G. G. 2021. *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley and Sons.
- Mousavi, S. M., Babazadeh, H., Sarai-Tabrizi, M. and Khosrojerdi, A. 2024. Assessment of rehabilitation strategies for lakes affected by anthropogenic and climatic changes: A case study of the Urmia Lake, Iran. *Journal of Arid Land*, 16(6): 752–767. <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0019-x>
- Nodefarahani, M., Aradpour, S., Noori, R. and others. 2020. Metal pollution assessment in surface sediments of Namak Lake, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 45639–45649. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10298-1>
- Özvan, H. 2021. Determining the change on the water surface of Lake Namak by using remote sensing methods by water indices (NDWI, MNDWI, AWEI and WRI). *Ecological Perspective*, 1(1): 37–45. <https://doi.org/10.53463/ecopers.20210073>
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N. and 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>
- Rahimi, M. and Khosravi, M. 2025. Analysis of Wind Regime and Sand Transport Potential in the Marginal Ergs of the Namak Lake, Central Iran. *Arid Regions Geographic Studies*, 16(60): 1–20. <https://doi.org/10.30495/jargs.2025.191973>
- Rohani, N., Rajaei, T., Mojarradi, B., Jabbari, A., Shafiei-Darabi, S. A. and Heydari-Bani, M. 2021. Climatic analysis of changes in major water resources in Qom Province using satellite data and remote sensing technologies. *Quarterly Journal of Environmental Sciences*, 19(1): 239–258. (In Persian) <https://doi.org/10.52547/envs.33643>
- Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Sheikh, Z., Yazdani, M. R. and Moghaddam Nia, A. 2020. Spatiotemporal changes of 7-day low flow in Iran's Namak Lake Basin: impacts of climatic and human factors. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1): 57–73. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02946-3>
- Sheikh-Assadi, A., Khademi, M. and Ahmadi, R. 2019. Monitoring the Lut Desert lake using Landsat and Sentinel-2 imagery and hydrological pattern analysis. *Geography and Environment Journal*, 23(4): 70–88. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/RSGI.2025.66297.1127>
- Shumway, R. H. and Stoffer, D. S. 2006. *Time series analysis and its applications: with R examples*. New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-36276-2>
- Solaimani, K., Darvishi, S. and Shokrian, F. 2022. Accuracy assessment of remote sensing methods for extraction and monitoring of Zrebar Lake, Iran. *Journal of Ecohydrology*, 9(3): 505–516. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ije.2023.342056.1632>
- Taheri Dehkordi, A., Valadan Zoej, M. J., Ghasemi, H., Jafari, M. and Mehran, A. 2022. Monitoring long-term spatiotemporal changes in Iran surface waters using Landsat imagery. *Remote Sensing*, 14(18): 4491. <https://doi.org/10.3390/rs14184491>
- United Nations Environment Programme. 2019. *Global environment outlook—GEO-6: Healthy planet, healthy people*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.1017/978110862714>
- Vahabi, J. 2016. *Flood risk zoning using remote sensing and GIS techniques in the Taleghan watershed* (Master's thesis, Tarbiat Modares University). (In Persian)
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M. and Franch, B. 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185: 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M. and Swenson, S. C. 2013. Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research*, 49(2): 904–914. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20078>
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D.,

- Merchant, C. J., O'Reilly, C. M. and Sharma, S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(8): 388–403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yao, A. W. and Chi, S. C. 2004. Analysis and design of a Taguchi–Grey based electricity demand predictor for energy management systems. *Energy Conversion and Management*, 45(7): 1205–1217. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00221-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00221-1)
- Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J. F., Wada, Y. and Berge-Nguyen, M. 2023. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, 380(6646): 743–749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
- Yousefi, H., Torabi Poteh, H., Haghizadeh, A., Samadi, A., Arshiya, A. and Yarahmadi, Y. 2022. Monitoring the Changes of Zaribar Lake in Kurdistan Using Spectral Indicators and Landsat Images in Google Earth Engine System. *Journal of Hydrogeology*, 6(2): 30–41. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/HYDRO.2022.12845>
- Zhu, Z. and Woodcock, C. E. 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144: 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>