



Geomorphological Changes Analysis of Abarkouh Salt Desert Using Spectral Remote Sensing Techniques in Google Earth Engine

Mehran Fatemi¹ | Atefeh Jebali² | Asghar Zare Chahouki^{3*}

1. Department of Geography, Faculty of Humanities, Meybod University, Meybod, Iran.

2. General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Yazd Province, Yazd, Iran.

3. Rangeland and Watershed Group, Environmental and Desert Studies School, Yazd University, Yazd, Iran.

Correspond E-mail: zare.chahouki@yazd.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 10 Apr. 2025

Revised: 02 Aug. 2025

Accepted: 07 Aug. 2025

Published online: 01 Jan. 2026

Keywords:

*Geomorphological Facies,
Monitoring,
Spectral Indices,
Supervised Classification,
Support Vector Machine.*

Abstract

Salt playas in arid regions are unique and sensitive ecosystems, playing a crucial role in environmental balance and ecological sustainability. This study aimed to evaluate the geomorphological change trends in the Abarkouh salt playa by employing advanced remote sensing techniques within the Google Earth Engine (GEE) platform. The research monitored geomorphological facies and environmental changes in the playa from 2002 to 2024 using Landsat 5 and 8 satellite imagery. Spectral indices for vegetation (NDVI, SAVI, EVI, and TSAVI), water (MNDWI), soil moisture (NDMI), and soil salinity (SI) were analyzed to assess these changes. The results reveal substantial geomorphological alterations in the playa over the study period. Specifically, water bodies and vegetation cover decreased by approximately 65% and 51%, respectively, from the initial year, while saline, clay, and sandy lands expanded by about 23%, 66%, and 103%. Spectral index analyses further indicated a significant decline in water levels and a significant rise in soil salinity, both at the 1% and 5% significance levels, respectively. Notably, a key finding of this study is the contradiction between the spectral indices and the classification maps. Despite a significant upward trend in all vegetation indices, the classification maps consistently showed a decrease in vegetation cover. This discrepancy highlights that in this arid environment, the vegetation indices are influenced by the spectral reflectance of salt and gypsum rather than actual vegetation, leading to a false positive signal. The study concludes that the boundaries of geomorphological facies within the Abarkouh salt playa have undergone significant changes, largely driven by drought and human activities.

Cite this article: Fatemi, M., Jebali, A., Zare Chahouki, A. (2025). Geomorphological Changes Analysis of Abarkouh Salt Desert Using Spectral Remote Sensing Techniques in Google Earth Engine. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (4), 451-470. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.392746.1817>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Playas, as sensitive and unique ecosystems in arid and semi-arid regions, play a critical role in environmental balance, local moisture regulation, and ecological sustainability. These flat, saline landforms are highly susceptible to changes resulting from climatic factors, particularly drought and rising temperatures, as well as anthropogenic activities such as excessive groundwater extraction. Consequently, these areas are prone to extensive geomorphological changes, including the reduction of water bodies, Lake Desiccation, and the expansion of saline and clay lands. One of the most significant negative consequences of playa desiccation is the production and emission of saline dust, which can travel long distances, leading to serious environmental hazards such as air pollution, degradation of agricultural soils, and adverse effects on human health. Given these challenges, accurate and timely monitoring of changes in these regions is of paramount importance. Remote sensing technology, especially with the advent of cloud-based processing platforms like Google Earth Engine (GEE), provides a powerful and efficient tool for analyzing changes across vast temporal and spatial scales. This platform offers access to large datasets of satellite imagery and allows for the high-speed execution of complex algorithms. The current study was conducted to evaluate the trend of geomorphological and environmental changes in the Abarkouh salt playa, one of the most significant playas on the Central Iranian Plateau, from 2002 to 2024. This research examines changes in various playa facies and analyzes spectral indices related to water, vegetation, and soil salinity to provide a comprehensive understanding of the dynamics of this sensitive ecosystem.

Materials and Methods: This research was conducted on the Abarkouh salt playa, located in Yazd Province on the Central Iranian Plateau. Due to its geographical location and arid climate, this playa is a prime example of an ecosystem under stress. In this study, we used the Google Earth Engine platform for satellite image analysis. The primary datasets included Landsat 5 and Landsat 8 satellite imagery, selected for their long-term temporal coverage and suitable spatial resolution. The images were prepared for analysis after initial atmospheric corrections. Six geomorphological facies were identified for classification: saline land, moist zones, water bodies, clay land, sandy zones, and vegetation cover. Classification maps of these classes were generated using the Support Vector Machine (SVM) machine learning algorithm. This algorithm was deemed suitable for this research due to its high accuracy in classifying spectral data. To train the SVM model and assess its accuracy, we used ground samples collected in 2024, as well as very high spatial resolution satellite images (such as Google Earth imagery) for the year 2002. This approach helped validate the classification results throughout the study period. In addition to classification, key spectral indices were extracted and analyzed to quantitatively assess environmental changes. These indices included vegetation indices such as NDVI, SAVI, EVI, and TSAVI, the MNDWI water index, the NDMI soil moisture index, and the SI soil salinity index. The trend analysis of these indices was performed using linear regression and statistical significance tests to determine long-term changes in the playa.

Results and Discussion: The high-accuracy classification results revealed significant geomorphological changes in the playa during the study period (2002 to 2024). The high classification accuracy (94% overall accuracy and a Kappa coefficient of 0.92 for 2002; 97% accuracy and a Kappa coefficient of 0.96 for 2024) confirms the reliability of the findings. Specifically, the area of water bodies decreased by approximately 65%, and vegetation cover by about 51%. In contrast, saline lands expanded by nearly 23%, clay lands by 66%, and sandy zones by 103%. These results clearly indicate a trend of desiccation and desertification in the region. The analysis of spectral indices further reinforced these findings. The trend analysis of the MNDWI (water) index showed a significant decreasing trend, which directly corresponds with the reduction in the area of water bodies. Similarly, the salinity index (SI) showed a significant increasing trend, indicating a rise in soil salinity in the area. One of the study's important and challenging findings was the clear contradiction between the spectral indices and the vegetation classification maps. Despite a significant upward trend in all vegetation indices (such as NDVI and SAVI), the classification maps consistently showed a decrease in vegetation cover. This discrepancy is attributed to the influence of spectral reflectance from salt and gypsum in this arid environment, which was misinterpreted as an increase in vegetation. This phenomenon suggests that under the extreme conditions of a salt playa, vegetation indices, even those designed to correct for soil effects, may not be entirely effective and are, in fact, sensitive to physical changes in the land surface, such as salt accumulation. This underscores the necessity of using combined methods, such as classification alongside index analysis, for accurately understanding the dynamics of complex environments.

Conclusion: The results of this study clearly demonstrate a significant decline in water bodies and vegetation cover and an increase in saline, clay, and sandy lands in the Abarkouh playa over the past two decades. This trend, which is also observable in other playas and salt lakes across Iran, has severe negative consequences for environmental balance and local communities. The reduction of water and vegetation makes the playa more vulnerable to wind erosion, significantly increasing the risk of saline dust production and dispersion. The findings of this research highlight the strategic importance of accurately monitoring these ecosystems using advanced technologies like remote sensing. Furthermore, the study emphasizes the need for using combined approaches for data analysis, especially in complex environments where spectral indices may yield misleading results. It is recommended that future studies investigate the human and hydrological factors influencing these changes and develop new and more precise spectral indices for saline environments.

Keywords: Playa, Remote Sensing, Google Earth Engine, Spectral Indices, Geomorphological Changes.

Article Type: Research Article

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۸ (۴)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی کویر نمکی ابرکوه با بهره‌گیری از تکنیک‌های طیفی سنجش از دوری در محیط گوگل ارث انجین

مهران فاطمی^۱ | عاطفه جبالی^۲ | اصغر زارع چاهوکی^{۳*}

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

۲. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان یزد، یزد، ایران.

۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

رایانامه: zare.chahouki@yazd.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

کلیدواژه‌ها:

پایش،

رخساره ژئومورفولوژی،

شاخص‌های طیفی،

طبقه‌بندی نظارت‌شده،

ماشین بردار پشتیبان.

پالایای نمکی در مناطق خشک، به‌عنوان اکوسیستمی منحصربه‌فرد و حساس نقش حیاتی در تعادل محیطی و پایداری اکولوژیکی دارند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی روند تغییرات ژئومورفولوژیکی پالایای نمکی ابرکوه تلاش نموده تا با بهره‌گیری از تکنیک‌های جدید سنجش از دوری در محیط گوگل ارث انجین به پایش رخساره‌های ژئومورفولوژیک و تغییرات محیطی در منطقه پالایای نمکی ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ بپردازد. بدین منظور، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ برای تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی رخساره‌های ژئومورفولوژیکی و تحلیل شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی (NDVI، SAVI، EVI و TSAVI)، آب (MNDWI)، رطوبت خاک (NDMI) و شوری خاک (SI) استفاده گردید. نتایج نشان داد که رخساره‌های ژئومورفولوژیکی این پالایا در طی سال‌های اخیر دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است. کاهش سطح پهنه‌های آبی، پوشش گیاهی به ترتیب در حدود ۶۵ و ۵۱ درصد نسبت به ابتدای سال بررسی و افزایش سطح اراضی شور، رسی و ماسه‌ای به ترتیب در حدود ۲۳، ۶۶ و ۱۰۳ درصد از جمله مهم‌ترین تغییرات مشاهده شده بود. تحلیل شاخص‌های طیفی نیز نشان‌دهنده روند کاهشی معنادار در سطح آب و روند افزایشی معنادار در شوری خاک به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ بود. همچنین، با وجود روند افزایشی و معنی‌دار شاخص‌های پوشش گیاهی، نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاهش سطح پوشش گیاهی را نشان داد، که این تفاوت ناشی از تأثیر بازتاب طیفی نمک و گچ در این منطقه بیابانی است. نتایج پژوهش حاکی از وجود تغییرات در مرز رخساره‌های ژئومورفولوژیکی پالایای نمکی ابرکوه می‌باشد که بخش عمده‌ای از این تغییرات می‌تواند به دلیل وقوع خشکسالی و فعالیت‌های انسانی باشد.

استناد: فاطمی؛ مهران، جبالی؛ عاطفه، زارع چاهوکی؛ اصغر (۱۴۰۴). بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی کویر نمکی ابرکوه با بهره‌گیری از تکنیک‌های طیفی سنجش از دوری در محیط گوگل ارث

انجین. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸ (۴)، ۴۷۰-۴۵۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.392746.1817>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

واحد پلایاها^۱، مسطح‌ترین شکل زمین با شیبی کمتر از ۰/۰۲ درصد (شارپ و گلزنر^۲، ۱۹۹۷)، بیشتر در حوضه‌های داخلی بیابانی و سواحل نزدیک با آب و هوای خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شوند. حداقل ۵۰۰۰۰ پلایا در مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان وجود دارند که وسعت بیشتر آن‌ها کمتر از سه کیلومتر مربع است (Neal, 1975). این لندفرم‌های پویا، به عنوان یک اکوسیستم منحصربه‌فرد و حساس در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقشی حیاتی در تعادل محیطی و پایداری اکولوژیکی این مناطق دارند. پلایاها با دارا بودن تنوع زیستی منحصربه‌فرد و سازگار با شرایط سخت (شامل گونه‌های هالوفیت، جانداران شورپسند و ریزندامگان)، رخساره‌های ژئومورفولوژیکی متنوع و منابع طبیعی ارزشمند، از اهمیت بالایی در مطالعات محیطی برخوردارند. پلایاها معمولاً به طور فصلی با آب پوشیده می‌شوند که به تدریج به آبخوان‌های زیرین نفوذ کرده یا تبخیر می‌شوند. این فرایند منجر به انباشت رسوبات نمکی و رسی در کف و لبه‌های سطح پلایا شده و بخش سطحی آن‌ها را شکل می‌دهد (Sharp & Glazner, 1997; Turk, 1970). این اشکال سطحی می‌توانند به صورت پوسته‌های ناهموار یا سطوح نرم حاصل از انقباض، خشک شدن و تغییر حجم لایه‌های رسی انباشته شده ظاهر شوند. هیدرولوژی مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی، به دلیل رشد فزاینده جمعیت و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، به شدت تحت فشار قرار گرفته است. از این رو، پلایاها به دلیل حساسیت بالا به تغییرات آب و هوایی و تغییرات در رژیم‌های هیدرولوژیکی (ناشی از عوامل اقلیمی و انسانی مانند تغییرات در جریان ورودی آب‌های زیرزمینی و تبخیر و تعرق) مستعد تغییرات گسترده‌ای هستند. علاوه بر این، همزمان با خشک شدن و از دست رفتن رطوبت سطحی، پلایاها در برابر باد بسیار آسیب‌پذیر شده و می‌توانند به عنوان منبع اصلی تولید و انتشار گردوغبار نمکی در نظر گرفته شوند که مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی را به دنبال دارد (Ge et al., 2016; Gill et al., 2010; Hamzehpour et al., 2022; Middleton, 2017). بررسی تغییرات مکانی-زمانی پلایاها ضروری است؛ این بررسی به منظور ارزیابی چگونگی تأثیر آبیاری، سایر فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب و هوایی بر تعادل طبیعی این لندفرم‌های حساس (راسن^۳، ۱۹۹۴) و پیامدهای آن در ایجاد مخاطرات و بلایا (میدلتون^۴، ۲۰۱۷) انجام می‌پذیرد. از سویی دیگر، بخشی از افزایش سطح اراضی بیابانی و ایجاد کانون‌های داخلی مولد گردوغبار می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری و پوشش اراضی به وجود آمده در این مناطق باشد. کاهش یافتن وسعت ناحیه‌ای آب، افزایش یافتن اراضی بدون پوشش، و خشک شدن سطح اراضی باتالاقی می‌تواند ارتباط نزدیکی را با احتمال گسترش اراضی بیابانی مستعد تولید گردوغبار و گسترش بیابان در منطقه داشته باشد (Harati et al., 2021).

تغییرات پیچیده کاربری و پوشش اراضی، به‌ویژه نقشه‌برداری و تشخیص تغییرات با سری زمانی طولانی و با دقت بالا، نیاز به فناوری سنجش از دور را برای نظارت بر این تغییرات در جهت توسعه پایدار ایجاب می‌کند (Camilleri et al., 2017; Liu et al., 2021; Tian et al., 2020; Yasir et al., 2020). در گذشته، تهیه نقشه‌های پوشش‌ها و کاربری‌های اراضی عمدتاً با استفاده از مشاهدات میدانی، نقشه‌های از پیش موجود و سایر منابع داده صورت می‌گرفت که اطلاعات آن‌ها اغلب قدیمی، محدود و تا حدودی نادرست بود (Embabi & Moawad, 2014; Verstappen, 2011). اما امروزه، افزایش تعداد سیستم‌های ماهواره‌ای سنجش از دور با وضوح مکانی و دوره‌های تکرار متفاوت، همراه با پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر در روش‌ها و تکنیک‌های نقشه‌برداری، امکان دستیابی به اطلاعات کافی در مورد توزیع مکانی و تغییرات زمانی لندفرم‌ها و تولید نقشه‌های ژئومورفولوژیکی با دقت بالا در مقیاس‌های کوچک تا بزرگ را فراهم آورده است (Smith & Pain, 2009).

اگرچه فناوری سنجش از دور سنتی با چالش‌های قابل توجهی در نظارت و تجزیه و تحلیل پویای متوالی طولانی‌مدت (مانند دوره بازگشت ماهواره، تداخل ابر و باران، مدیریت داده‌های عظیم و پیش‌پردازش) مواجه بود، اما راه‌اندازی پلتفرم گوگل ارث انجین^۵ با توجه به

^۱ Playa^۲ Sharp & Glazner^۳ Rosen^۴ Middleton^۵ Google Earth Engine (GEE)

قابلیت‌های قدرتمند ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها، اشتراک‌گذاری آسان اطلاعات و هزینه‌های استفاده پایین، به تدریج به ابزاری مهم برای تحقیقات سنجش از دور در مقیاس بزرگ تبدیل شده است (Fu et al., 2022). این پلتفرم کاربردهای موفقیت‌آمیزی را در نقشه‌برداری پوشش اراضی (چن^۱ و همکاران، ۲۰۲۲؛ لیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۳)، استخراج آب (ضیائی و کپرلاوا^۳، ۲۰۲۵)، بررسی پوشش گیاهی (چن و همکاران، ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳)، شناسایی آب‌های سطح زمین و نقشه‌برداری پویا در سایر زمینه‌ها نشان داده است. به‌طوریکه تحقیقات قابل توجهی با بهره‌گیری از تصاویر سری لندست و سایر تصاویر ماهواره‌ای بر روی این پلتفرم متمرکز بوده‌اند (Chen et al., 2022; Liu et al., 2023).

پلایای نمکی ابرکوه، واقع در فلات مرکزی ایران و در استان یزد، یکی از این اکوسیستم‌های ارزشمند بیابانی است که در سال‌های اخیر با چالش‌های متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های پی‌درپی و فعالیت‌های انسانی ناپایدار مواجه شده است (Jebali & Zare Chahouki, 2021). با وجود اهمیت این پلایا در منطقه، مطالعه جامعی که به بررسی بلندمدت تغییرات رخساره‌های ژئومورفولوژیکی آن با استفاده از طبقه‌بندی تفسیری و تحلیل همزمان شاخص‌های طیفی در بستر گوگل ارث انجام پذیرد، محدود است. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از طبقه‌بندی رخساره‌ها و تحلیل روند شاخص‌هایی نظیر NDVI^۴ که می‌تواند بینش‌های عمیق‌تری در مورد پاسخ‌های اکوسیستمی پلایاها به تغییرات محیطی ارائه دهد، برای این منطقه کمتر انجام شده است.

بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل و آشکارسازی تغییرات مکانی-زمانی رخساره‌های ژئومورفولوژیکی پلایای نمکی ابرکوه در بازه زمانی طولانی مدت ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور و قابلیت‌های پردازش داده در مقیاس وسیع پلتفرم گوگل ارث انجام است. این مطالعه تلاش می‌کند تا تأثیر عوامل محیطی و انسانی را بر تحولات این اکوسیستم حساس ارزیابی کرده و اطلاعاتی کلیدی برای مدیریت پایدار و حفاظت از آن فراهم آورد.

۲. مواد و روش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

پلایای نمکی ابرکوه در منطقه‌ای با آب و هوای گرم و خشک بیابانی در مرکز ایران واقع شده است. این کویر مساحتی حدود ۱۳۰۷ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد و میانگین ارتفاع آن ۱۴۵۹ متر بالاتر از سطح دریا و شیب آن در حدود ۲/۸٪ است (Mirzadeh et al., 2023). محدوده مورد مطالعه بخشی از این پلایا می‌باشد که در محدوده طول شرقی ۷۲۳۵۶۸ تا ۷۹۸۱۲۰ و عرض شمالی ۳۳۹۹۹۰۲ تا ۳۴۶۵۵۲۹ در سیستم مختصات متریک UTM زون ۳۹ واقع شده است (شکل ۱).

محدوده کویر پوشیده از رس و نمک در پست‌ترین قسمت چاله تراکمی ابرکوه واقع شده است. این کفه نمکی با سطح سخت، هموار و بدون پوشش گیاهی، متشکل از رسوبات تبخیری نمک همراه با گچ و مارن، و در اطراف آن جلگه رسی و نمکی با درصد شوری زیاد است که در اثر تابش شدید خورشید قشر رسی زیرین آن به علت خشک شدن و انقباض رس، ترک خورده و قشر نمک سطحی را به طرف بالا حرکت می‌دهد. در نزدیکی این کفه رخساره چربه حاوی رسوبات ریزدانه میوسن و غنی از کلروکلسیم و کلرورسدیم وجود دارد (Mirzadeh et al., 2023).

از منظر اقلیمی، منطقه مورد مطالعه در اقلیم گرم و خشک بیابانی قرار دارد. رژیم بارندگی با متوسط بارش ۶۲ میلیمتر از نوع مدیترانه‌ای و بیشترین میزان بارش مربوط به ماه‌های بهمن و فروردین است. وزش باد تقریباً در تمام ماه‌های سال ثبت شده است، با این وجود در ماه‌های اردیبهشت، آذر و دی بیشترین فراوانی وزش باد مشاهده شده است. تبخیر سالانه منطقه بسیار بالا و در مقداری بیش از

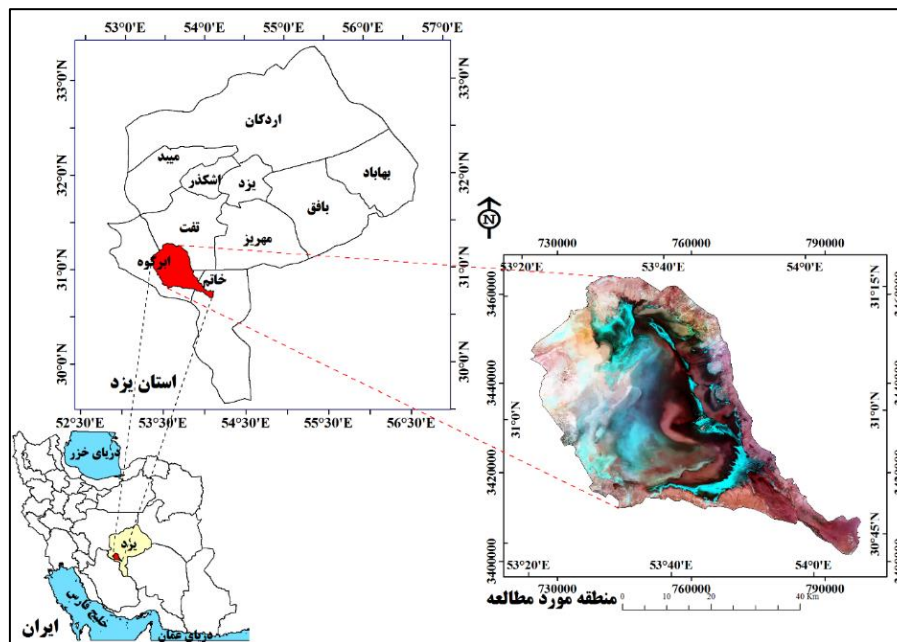
¹ Chen

² Liu

³ Ziaee & Kapralova

⁴ Normalized Difference Vegetation Index

۳۰۰۰ میلیمتر در سال است، که تقریباً این مقدار بیش از ۴۵ برابر بارندگی سالانه است. متوسط رطوبت نسبی در منطقه ۳۲٪ بوده و در دوره‌های گرم سال به ۱۸٪ می‌رسد. از نظر دمایی، متوسط سالانه دما ۱۹ درجه سانتیگراد و حداکثر و حداقل مطلق دما در دوره مطالعاتی ۲۳ ساله (۱۳۸۱-۱۴۰۳) به ترتیب ۴۳ و ۱۲- درجه سانتیگراد است. این اطلاعات بر طبق پژوهش انجام شده در این منطقه بیانگر این واقعیت است که پالایای ابرکوه، منطقه‌ای خشک، بیابانی و در معرض بادهای فرساینده و مولد گردوغبار است (Fatemi & Jebali, 2022).



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی کویر نمکی ابرکوه

۲-۲. مجموعه داده‌ها

در پژوهش حاضر، به منظور تحلیل تغییرات ژئومورفولوژیکی کویر نمکی ابرکوه دوره زمانی ۲۳ ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ انتخاب، و از داده‌های جامعی به شرح ذیل استفاده گردید:

۲-۲-۱. داده‌های سنجش از دور

تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (برای سال ۲۰۰۲) و لندست ۸ (برای سال ۲۰۲۴) به عنوان منبع اصلی داده‌های سنجش از دور استفاده شد. این تصاویر به دلیل پوشش زمانی طولانی، قدرت تفکیک مکانی مناسب و دسترسی رایگان، ابزاری ارزشمند برای مطالعه تغییرات سطح زمین در مناطق خشک می‌باشند. پردازش و تحلیل این تصاویر در محیط تحت وب گوگل ارث انجام شد این برنامه به دلیل دارا بودن قدرت پردازشی بالا و دسترسی به آرشیو عظیم داده‌های ماهواره‌ای، امکان تحلیل داده‌های سنجش از دور را در مقیاس وسیع را فراهم می‌سازد. در بخش صحت سنجی نقشه‌های تولیدی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای گوگل ارث^۱ مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ استفاده شد. این تصاویر به عنوان داده‌های مرجع برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر لندست در نظر گرفته شد. به منظور صحت‌سنجی نقشه تولیدی در سال ۲۰۲۴ و درک بهتر از شرایط واقعی منطقه، برداشت‌های میدانی در محل پالایای نمکی ابرکوه انجام شد. این

^۱ Google Earth

برداشت‌ها شامل جمع‌آوری اطلاعات در مورد وضعیت پوشش گیاهی، شوری خاک و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منطقه بود.

۲-۳. روش پژوهش

۲-۳-۱. تولید نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژیک

به منظور تهیه نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژیک از مجموعه تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۴ بهره گرفته شد. ویژگی تصاویر مورد استفاده انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری پیش تولید لازم در محیط ارث انجین است که باعث افزایش دقت تحلیل‌های طیفی و کاهش خطاهای ناشی از تأثیرات جوی در آن شده است. با توجه به وجود نویزهای ناشی از عوامل جوی مانند ابر و غبار، خطاهای حسگر ماهواره‌ای و یا سایر عوامل به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک به منظور افزایش کیفیت داده‌ی طیفی و کاهش نویز، از یک تصویر ترکیبی متشکل از مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای موجود در بازه زمانی یکسال، با شرط دارا بودن پوشش ابرناکی کمتر از یک درصد و استفاده از مقدار میانه^۱ در تصویر مستخرج از مجموعه تصاویر مذکور بهره گرفته شد.

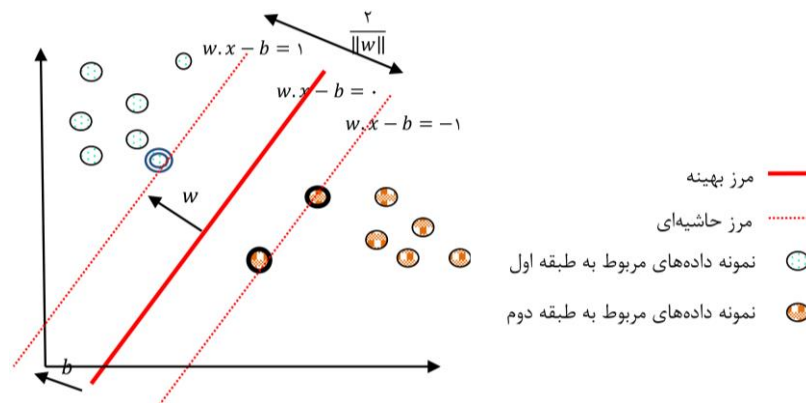
شش کلاس طبقه‌بندی از رخساره‌های ژئومورفولوژیک شامل اراضی شور، پهنه مرطوب، پهنه آبی، اراضی رسی، پهنه ماسه‌ای، پوشش گیاهی و اراضی بدون پوشش جهت تهیه نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژیک شناسایی شد. اراضی رسی در اطراف دریاچه نمکی به صورت نواری در حاشیه شرقی تا جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. این اراضی به دلیل وجود نمک زیاد در خاک و سطح بالای سفره‌های آب زیرزمینی، اغلب متورم و ناهموار هستند. در حاشیه شمال غربی کویر، بین اراضی رسی و نمکزار، باتلاق‌هایی وجود دارند که نشان‌دهنده وجود پهنه‌های آبی و اراضی مرطوب در این منطقه است. این باتلاق‌ها، به صورت پهنه‌ای بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه را می‌پوشانند و سرشار از رسوبات نمکی با فرورفتگی‌های پراکنده هستند. آب اصلی این کویر، از طریق دو رودخانه موجود در حاشیه شمال غربی و رودخانه‌های دیگری که از حاشیه جنوب شرقی وارد کویر می‌شوند، تأمین می‌شود. در سمت غرب منطقه مورد مطالعه اراضی شور و بدون پوشش گیاهی غالب هستند که به دلیل شوری بالای خاک، امکان رشد گیاهان در آن با محدودیت مواجه است. در بخش‌هایی از پلاای ابرکوه، به ویژه در حاشیه مجاور اراضی مرطوب حاشیه کویر، ذرات ماسه رسوب کرده و اغلب با تپه‌های ماسه‌ای پوشیده شده است. پوشش گیاهی بسیار محدود و از نوع گونه‌های شورپسند مانند گز و اشنان است.

در ادامه اقدام به تهیه نمونه‌های تعلیمی از طریق تصاویر گوگل ارث و برداشت‌های میدانی شد. در پایان، بر روی تصاویر سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از ماشین بردار پشتیبان (SVM^2) در محیط گوگل ارث انجین طبقه‌بندی تصویر پیاده‌سازی و مناسب‌ترین نقشه براساس میزان صحت نقشه تولیدی انتخاب شد. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یک روش آماری غیرپارامتریک نظارت شده است براساس این فرض عمل می‌کند که هیچ گونه اطلاعی از چگونگی توزیع مجموعه داده‌ها وجود نداشته باشد. ویژگی اصلی این روش توانایی بالا در استفاده از نمونه‌های تعلیمی کمتر، رسیدن به دقت بالاتر در مقایسه با سایر روش‌های طبقه‌بندی پیشین است (Mantero et al., 2005; Mountrakis et al., 2011). در این روش با استفاده از همه باندها و یک الگوریتم بهینه‌سازی، نمونه‌هایی که مرزهای کلاس‌ها را تشکیل می‌دهند به دست می‌آیند و با استفاده از آن‌ها یک مرز تصمیم‌گیری خطی بهینه برای جدا کردن کلاس‌ها محاسبه می‌شود. این نمونه‌ها را بردارهای پشتیبان می‌گویند. به عبارت دیگر تعدادی از نقاط آموزشی که کمترین فاصله تا مرز تصمیم‌گیری را دارند می‌توانند به عنوان بردار پشتیبان در نظر گرفته شوند (شکل ۲). در این روش با افزایش بعد داده‌ها نتیجه مطلوب‌تری حاصل می‌گردد. در واقع در صورتی که در فضای طیفی، کلاس‌ها تداخل داشته باشند، داده‌ها به فضایی با ابعاد بیشتر برده می‌شوند، به گونه‌ای که تمایز آن‌ها میسر می‌گردد. هدف اصلی این الگوریتم یافتن بیشترین فاصله بین دو کلاس و در نتیجه افزایش دقت طبقه‌بندی است در حالی که خطای تعمیم نیز تا حد امکان کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2008). در حقیقت این الگوریتم در پی یافتن یک ابرصفحه است که بتواند به نحوی عمل کند تا ضمن سازگاری با داده‌های تعلیمی، توانایی و تفکیک مجموعه داده از

¹ Median

² Support Vector Machine (SVM)

یکدیگر را نیز داشته باشد منظور از اصطلاح ابرصفحه جداکننده بهینه، محدوده‌ای است که بتواند با استفاده از داده‌های تعلیمی، پیکسل‌هایی که به نادرستی طبقه بندی می‌شوند را به حداقل برساند (Mountrakis et al., 2011).



شکل ۲. مثالی از نحوه طبقه‌بندی نمونه‌های تعلیمی در روش ماشین بردار پشتیبان (Saremi Naeini, 2021)

۲-۳-۲. ارزیابی صحت

به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده، از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالای گوگل ارث مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ (چا و پارک^۱، ۲۰۰۷) و همچنین از برداشت میدانی برای صحت سنجی نقشه سال ۲۰۲۴ استفاده شد. صحت کلی^۲ و ضریب کاپا^۳ به منظور ارزیابی کمی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده محاسبه شد.

۲-۳-۲. تحلیل تغییرات شاخص‌های محیطی

در تحلیل روند تغییرات محیطی اقدام به تهیه نمودار روند تغییرات شوری، رطوبت، آب و پوشش گیاهی در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ به ترتیب با استفاده از شاخص‌های SI^۴ (رابطه ۱) (عباس و خان^۵، ۲۰۰۷)، NDMI^۶ (رابطه ۲) (اسکاکن^۷ و همکاران، ۲۰۰۳)، MNDWI^۸ (رابطه ۳) (ژو^۹، ۲۰۰۶) و NDVI^{۱۰} (رابطه ۴) (کارلسون و ریپلی^{۱۱}، ۱۹۹۷) برگرفته شده از تصاویر ماهواره لندست در محیط GEE در مقیاس سالانه شد. در ادامه معنی‌داری روند تغییرات شاخص‌های مورد بررسی براساس جداول ANOVA در محیط SPSS بررسی شد.

$$SI = \frac{R \cdot NIR}{G} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$MNDWI = \frac{G - SWIR1}{G + SWIR1} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

^۱ Cha & Park

^۲ Overall Accuracy

^۳ Kappa Coefficient

^۴ Salinity Index (SI)

^۵ Abbas & Khan

^۶ Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

^۷ Skakun

^۸ Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

^۹ Xu

^{۱۰} Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^{۱۱} Carlson & Ripley

که در آن:

SI: شاخص شوری؛ NDMI: شاخص اختلاف نرمال رطوبت خاک، NDWI: شاخص اختلاف نرمال آب؛ NDVI: شاخص اختلاف پوشش گیاهی؛ G: باند سبز؛ R: باند قرمز؛ SWIR: باند مادون قرمز میانی؛ NIR: باند مادون قرمز نزدیک. مقادیر تمام شاخص‌ها در محدوده ۱- تا ۱+ به‌دست آمد. به‌طوری‌که مقادیر مثبت نزدیک به ۱ بیانگر وجود مناطق با انبوه شاخص موردنظر و مقادیر نزدیک به ۱- نشان‌دهنده مناطق با میزان کم و یا بدون شاخص موردنظر است. با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی شده و نمودارهای روند تغییرات شاخص‌های محیطی، تغییرات مکانی و زمانی ژئومورفولوژیک پلائیای نمکی ابرکوه تحلیل شدند.

۲-۳-۱. شاخص‌های پوشش گیاهی

برای ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، ابتدا شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اولیه این شاخص نشان‌دهنده یک روند افزایشی بود که با مشاهدات میدانی و تحلیل‌های بصری از کاهش پوشش گیاهی در منطقه در تضاد قرار داشت. از آنجا که پلائیای ابرکوه یک منطقه خشک و با پوشش گیاهی پراکنده است، این تضاد به احتمال زیاد به دلیل اثرات بازتاب طیفی خاک^۱ و نمک بر مقادیر NDVI بود.

برای بررسی دقیق‌تر و تعدیل این اثرات، سه شاخص پوشش گیاهی دیگر که به طور خاص برای مناطق خشک و نیمه‌خشک طراحی شده‌اند (ولز^۲ و همکاران، ۲۰۲۳)، نیز مورد استفاده قرار گرفتند. این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

۱. شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده با خاک (SAVI)^۳: این شاخص برای کاهش تأثیر بازتاب طیفی خاک بر شاخص NDVI معرفی شد (Huete, 1988). در این شاخص، یک فاکتور تعدیل خاک (L) که معمولاً برای مناطق با پوشش گیاهی کم ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، به فرمول اضافه می‌شود (رابطه ۵).

$$SAVI = NIR + Red + LNIR - Red * (1 + L) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

۲. شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI)^۴: این شاخص برای بهبود حساسیت در مناطق با پوشش گیاهی انبوه و کاهش اثرات خاک و اتمسفر معرفی شد (Huete et al., 2002). این شاخص با افزودن باندهای آبی و ضرایب مربوطه، دقت بیشتری نسبت به NDVI ارائه می‌دهد (رابطه ۶).

$$EVI = G * NIR + C_1 * Red - C_2 * Blue + LNIR - Red \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن، G یک فاکتور مقیاس‌بندی (۲/۵)، L فاکتور تعدیل خاک و C₁ و C₂ ضرایب اتمسفر (به ترتیب ۶ و ۷/۵) هستند. ۳. شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده با خاک تبدیل شده (TSAVI)^۵: این شاخص به عنوان نسخه‌ای بهبودیافته از SAVI معرفی شد تا تأثیر خاک را به‌طور مؤثرتری کاهش دهد (TSAVI). Baret et al., 1989) با استفاده از یک فاکتور شیب خط خاک (a) که به‌طور خودکار در فرمول وارد می‌شود، نتایج دقیق‌تری در مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم ارائه می‌دهد (رابطه ۷).

$$TSAVI = Red + NIR + (1 - a^2)(NIR - Red) * (1 + a^2) \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن، a شیب خط خاک است و مقدار ۱/۶ برای آن به طور معمول در نظر گرفته می‌شود.

¹ Background soil reflectance

² Velez

³ Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)

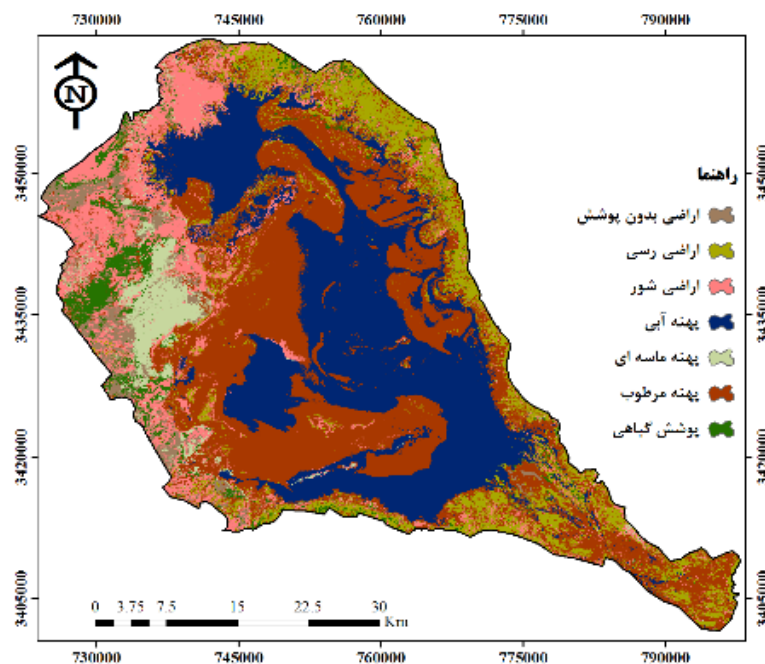
⁴ Enhanced Vegetation Index (EVI)

⁵ Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (TSAVI)

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. نقشه رخساره‌های ژئومرفولوژیکی پلايای نمکی ابرکوه

نتایج حاصل از انجام طبقه‌بندی نظارت شده در طی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ (شکل‌های ۳ و ۴) حاکی از تغییرات سطح رخساره‌های ژئومرفولوژیک در منطقه بود. صحت نقشه‌های تولیدی برای سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۴ به ترتیب ۹۴٪ و ۹۷٪ و ضریب کاپای آن به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۹۶ بود. این مقادیر نشان‌دهنده دقت بالای طبقه‌بندی انجام شده بود. اراضی شور، اراضی رسی و پهنه ماسه‌ای با افزایش مساحت در طی ۲۳ سال مواجه بود، در حالیکه مساحت پوشش گیاهی و پهنه آبی کاهش سطح را نشان داد (جدول ۱ و شکل ۵).

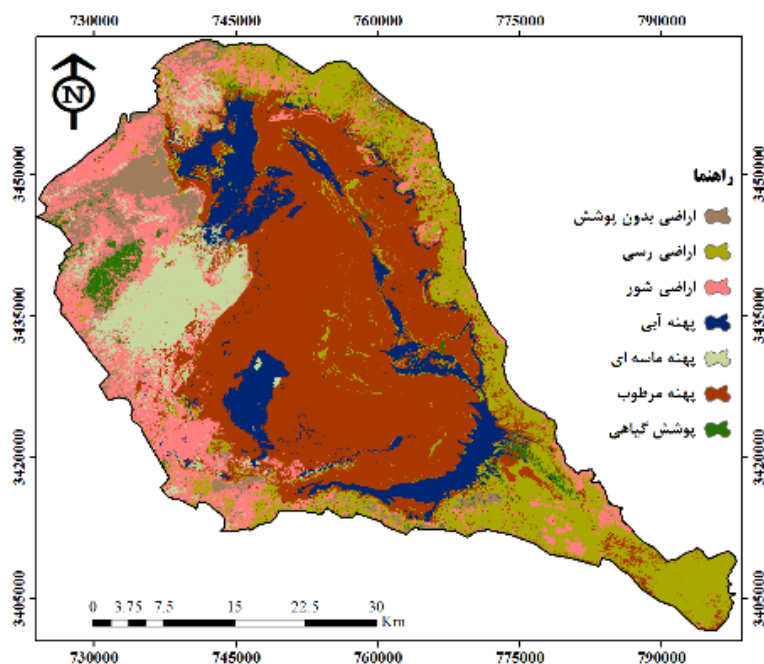


شکل ۳. نقشه طبقه‌بندی نظارت شده رخساره‌های ژئومرفولوژیکی پلايای نمکی ابرکوه در سال ۲۰۰۲

در نقشه‌های تولیدی، کاهش سطح پهنه آبی در طی دوره مورد بررسی و همچنین کاهش سطح پهنه مرطوب و پوشش گیاهی، و از طرفی افزایش سطح اراضی شور و پهنه ماسه‌ای به طور واضح قابل تشخیص است. در مجموع نتایج نشان داد که رخساره‌های ژئومرفولوژیک در پلايای نمکی ابرکوه در طی سال‌های اخیر دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است که این تغییرات می‌تواند پیامدهای منفی برای محیط‌زیست و جوامع محلی داشته باشد.

۳-۲. تغییرات شاخص‌های طیفی

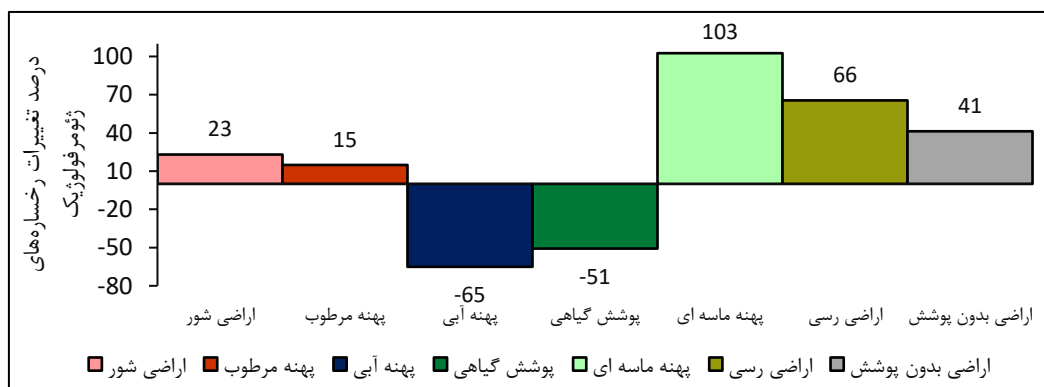
نتایج روند تغییرات شاخص نرمال شده تفاوت آب اصلاح شده MNDWI در پلايای ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ (شکل ۶) روند منفی معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان داد (جدول ۲). این نتایج نشان‌دهنده کاهش محدوده دارای آب در دریاچه نمکی ابرکوه با گذشت زمان است.



شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی نظارت شده رخساره‌های ژئومرفولوژیک پلاپای نمکی ابرکوه در سال ۲۰۲۴

جدول ۱. مساحت (ha) رخساره‌های ژئومرفولوژیک در پلاپای نمکی ابرکوه

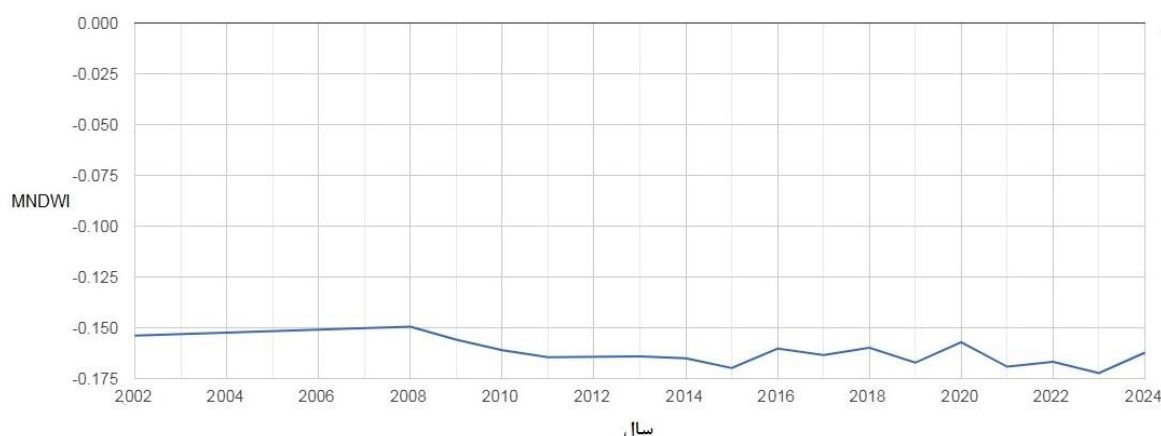
سال	کلاس	
	۲۰۲۴	۲۰۰۲
ارضی شور	۳۲۷۷۷	۲۶۶۴۱
پهنه مرطوب	۸۴۹۰۶	۷۳۹۲۴
پهنه آبی	۲۱۴۶۰	۶۱۴۵۹
پوشش گیاهی	۴۰۲۳	۸۱۷۱
پهنه ماسه ای	۱۶۰۱۹	۷۹۰۷
ارضی رسی	۴۰۷۷۹	۲۴۶۳۵
ارضی بدون پوشش	۹۴۹۱	۶۷۱۷



شکل ۵. نمودار درصد تغییرات رخساره‌های ژئومرفولوژیک پلاپای نمکی ابرکوه در طی دوره مطالعاتی ۲۰۲۴-۲۰۰۲

بررسی نتایج روند تغییرات شاخص نرمال شده تفاوت رطوبت NDMI در منطقه پلايای ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ (شکل ۷) نشان داد که گرچه شیب نمودار تغییرات رطوبتی منفی است اما روند معنی‌داری در تغییرات رطوبتی خاک وجود نداشت. لذا با توجه به مقدار Sig. بسیار بالای بدست آمده (۰/۹۸۶) نمی‌توان به روند کاهشی جزئی بدست آمده اعتماد کرد (جدول ۲).

بررسی نتایج روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در پلايای ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ (شکل ۸) روند صعودی معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان داد. این نتیجه به ظاهر متناقض است، زیرا نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده به وضوح کاهش پوشش گیاهی را نشان می‌دهند.



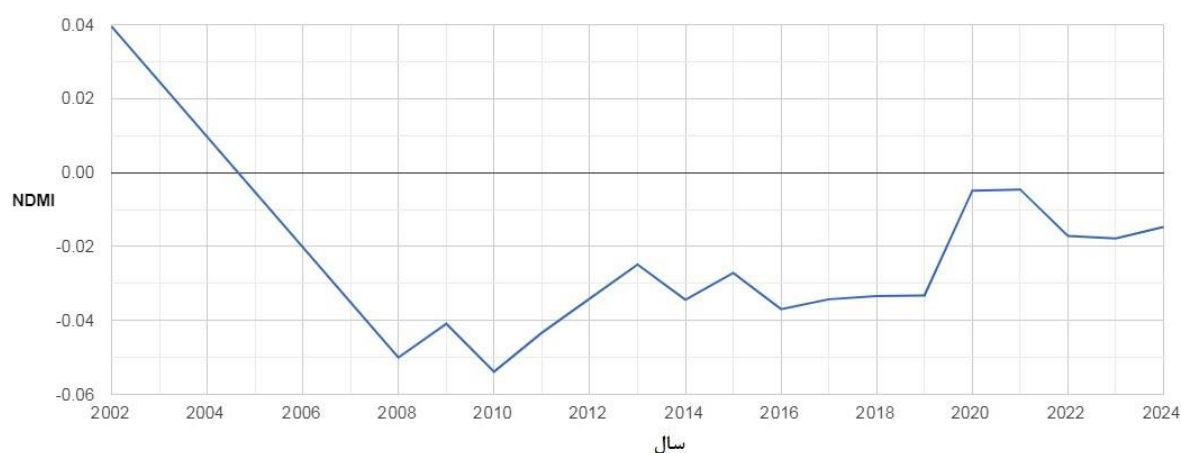
شکل ۶. نمودار روند تغییرات شاخص نرمال شده تفاوت آب اصلاح شده MNDWI پلايای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)

جدول ۲. وضعیت معنی‌داری شاخص‌های طیفی بررسی شده در پلايای نمکی ابرکوه از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴

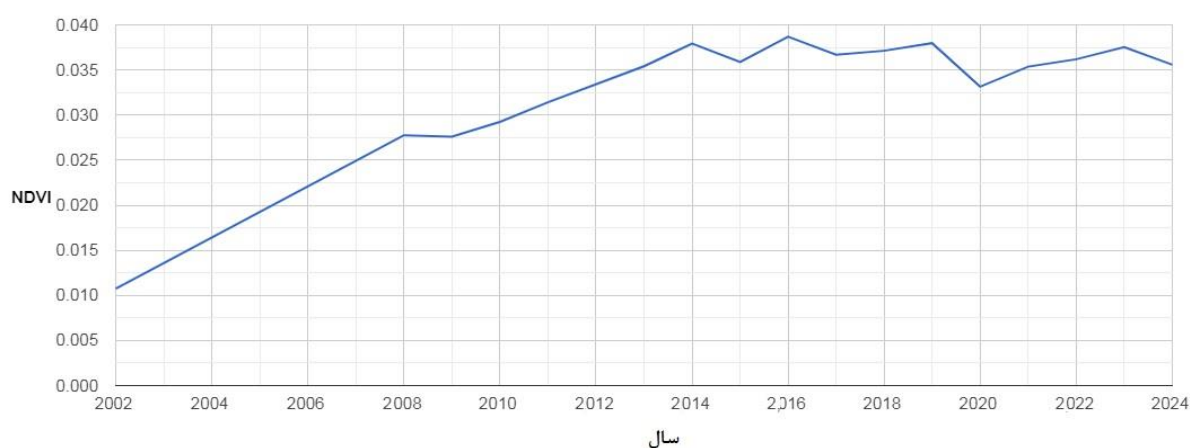
شاخص	R	R Square	Sig. (معنی‌داری)
MNDWI	۰/۶۱۷	۰/۳۸	۰/۰۰۸
NDVI	۰/۷۸۸	۰/۶۲	۰/۰۰۰
SAVI	۰/۷۸۰	۰/۶۱	۰/۰۰۰
EVI	۰/۸۲۴	۰/۶۸	۰/۰۰۰
TSVI	۰/۷۸۷	۰/۶۲	۰/۰۰۰
NDMI	۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۹۸۶
SI	۰/۵۳۸	۰/۲۹	۰/۰۲۶

این تناقض، ناشی از تأثیر شدید محیطی در پلايایها و مناطق خشک است، جایی که ویژگی‌های طیفی خاک و نمک بر مقادیر شاخص‌های پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد. با توجه به روند افزایشی شاخص شوری (SI) و روند کاهشی شاخص آب (NDWI) در منطقه، به نظر می‌رسد افزایش بازتاب نور از سطوح نمکی و گچی^۱ که با خشک شدن دریاچه پدیدار شده‌اند، به اشتباه توسط شاخص NDVI به عنوان افزایش پوشش گیاهی تفسیر شده است. در واقع، در این اکوسیستم حساس، شاخص NDVI به جای اندازه‌گیری پوشش گیاهی، به تغییرات سطح نمک و شوری حساسیت نشان داده است.

^۱ gypsum



شکل ۷. نمودار روند تغییرات شاخص نرمال شده تفاوت رطوبت NDMI پالایای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)



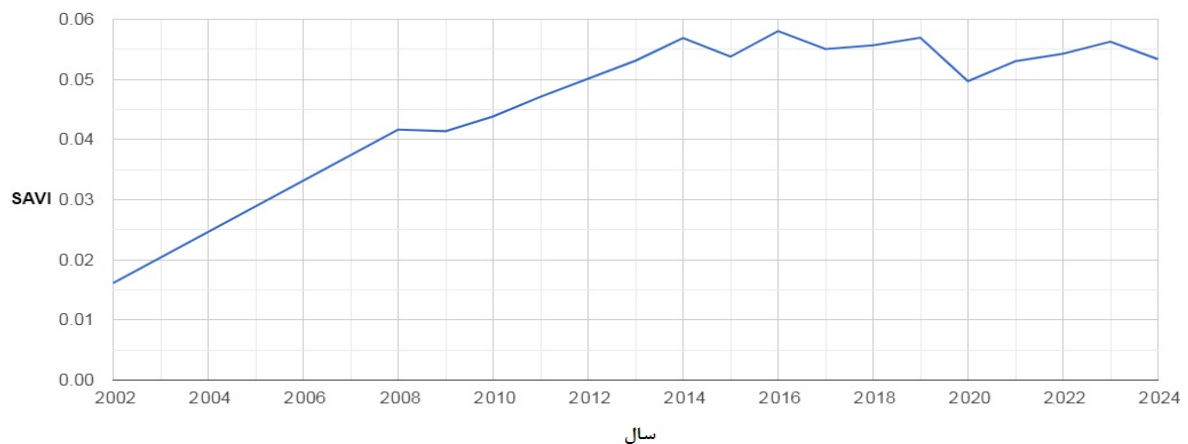
شکل ۸. نمودار روند تغییرات شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI پالایای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)

علاوه بر شاخص NDVI، شاخص‌های پوشش گیاهی دیگری نیز برای بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، تحلیل شدند. شاخص‌های SAVI (شکل ۹)، EVI (شکل ۱۰) و T-SAVI (شکل ۱۱) که برای تعدیل اثرات خاک در مناطق با پوشش گیاهی کم طراحی شده‌اند، نیز روند صعودی معنی‌داری را در طول دوره مطالعه در سطح یک درصد نشان دادند. نتایج حاصل از این شاخص‌ها نیز مانند NDVI، با نقشه‌های طبقه‌بندی شده و مشاهدات میدانی مبنی بر کاهش پوشش گیاهی در تضاد بود. این یافته نشان می‌دهد که حتی شاخص‌هایی که برای تصحیح اثرات خاک طراحی شده‌اند نیز در شرایط افراطی یک پالایای نمکی، به دلیل بازتاب شدید نور از سطوح نمکی و گچی، کارایی لازم را ندارند. در واقع، این شاخص‌ها نیز به جای پوشش گیاهی، به تغییرات فیزیکی سطح زمین حساسیت نشان داده‌اند. بررسی نتایج روند تغییرات شاخص شوری SI در منطقه پالایای ابرکوه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ (شکل ۱۲) روند صعودی معنی‌داری را در سطح پنج درصد نشان داد (جدول ۲). نتایج نشان‌دهنده میزان افزایش شاخص شوری خاک با گذشت زمان است.

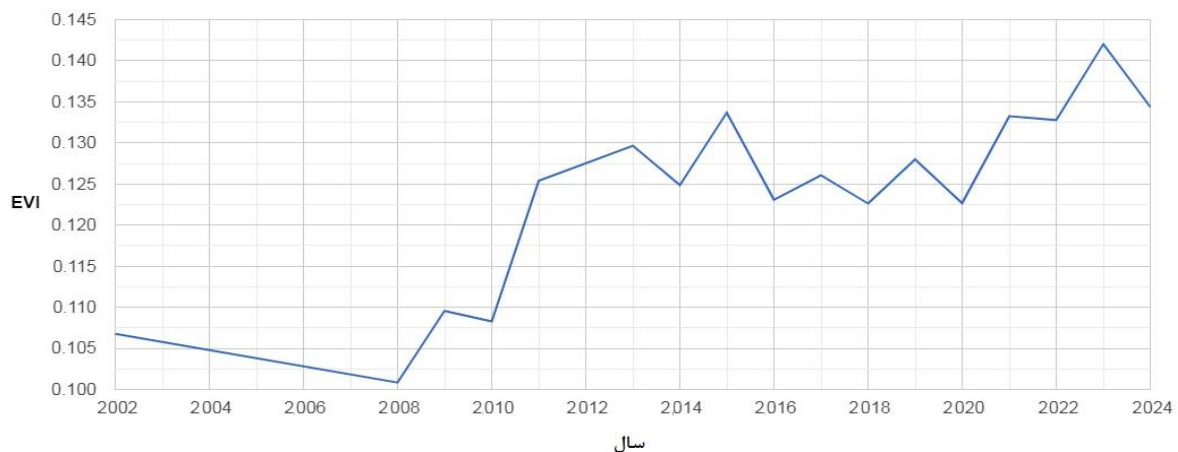
۴. بحث و نتیجه گیری

این مطالعه با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور در محیط گوگل ارث انجین (GEE) به بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی و

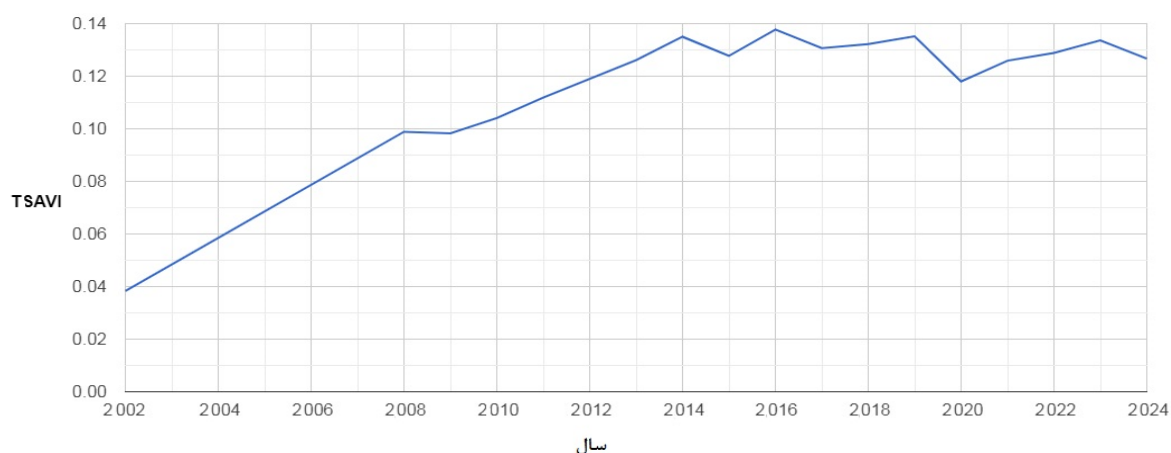
محیطی در پالایای نمکی ابرکوه طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌های طبقه‌بندی و تحلیل شاخص‌های طیفی، تغییرات قابل توجهی را در رخساره‌های ژئومورفولوژیکی این پالایا آشکار می‌سازد. یافته‌های طبقه‌بندی نشان می‌دهد که پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی در این دوره زمانی به‌ترتیب حدود ۶۵٪ و ۵۱٪ کاهش یافته‌اند. در مقابل، اراضی شور، رسی و ماسه‌ای به‌ترتیب با افزایش تقریباً ۲۳٪، ۶۶٪ و ۱۰۳٪ مواجه بوده‌اند. این تغییرات گسترده در رخساره‌های ژئومورفولوژیک می‌تواند پیامدهای منفی جدی برای تعادل محیطی و جوامع محلی داشته باشد. کاهش آب و پوشش گیاهی، پالایا را در برابر باد آسیب‌پذیرتر کرده و خطر تولید و انتشار گردوغبار نمکی را افزایش می‌دهد.



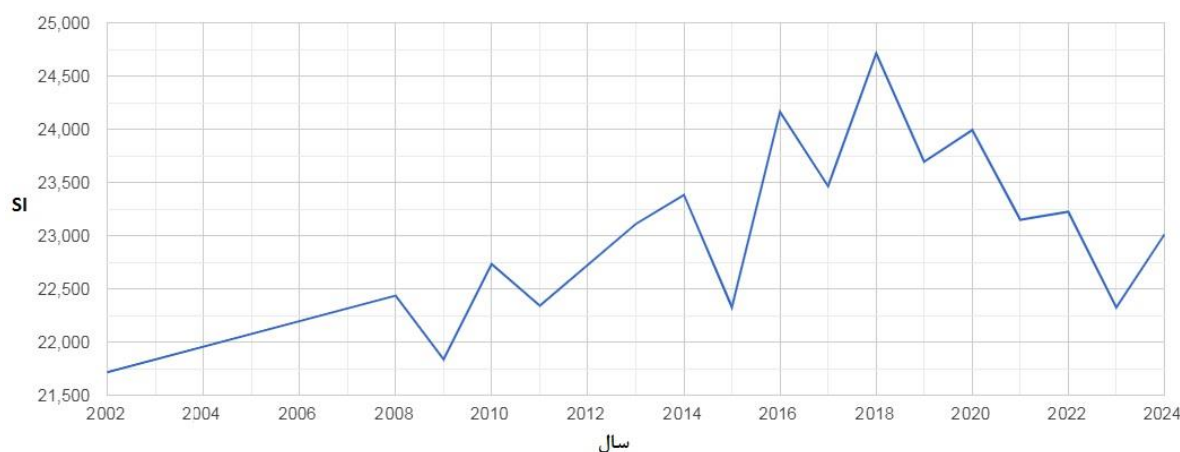
شکل ۹. نمودار روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده با خاک SAVI پالایای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)



شکل ۱۰. نمودار روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته EVI پالایای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)



شکل ۱۱. نمودار روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده با خاک تبدیل شده TSaVI پلايای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)



شکل ۱۲. نمودار روند تغییرات شاخص شوری خاک SI پلايای نمکی ابرکوه (۲۰۰۲-۲۰۲۴)

همچنین بررسی روند شاخص‌های طیفی روند کاهشی معناداری را در شاخص MNDWI نشان داد که نشان‌دهنده کاهش سطح آب در دریاچه نمکی ابرکوه است. این نتیجه با کاهش مساحت پهنه‌های آبی در نقشه‌های طبقه‌بندی شده همسو است. در بررسی شاخص شوری SI نتایج روند افزایشی معناداری را نشان داد که بیانگر افزایش شوری خاک در منطقه است. این افزایش شوری می‌تواند به دلیل کاهش سطح آب و تبخیر بیشتر باشد و بر اکوسیستم منطقه تأثیر منفی بگذارد. از منظر شاخص رطوبت خاک NDMI اگرچه نتایج شیب منفی در نمودار NDMI را نشان داد، اما روند کاهشی معناداری در رطوبت خاک مشاهده نشد. و در نهایت بررسی شاخص پوشش گیاهی NDVI روند افزایشی معناداری را نشان داد، در حالی که نقشه‌های طبقه‌بندی کاهش پوشش گیاهی را نشان می‌دادند.

نتایج پژوهش حاضر به وضوح نشان‌دهنده کاهش قابل توجهی در پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی و در مقابل، افزایش در اراضی شور و رسی در پلايای ابرکوه است. این روند در سایر پلايها و دریاچه‌های نمکی ایران نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال، بررسی‌ها در تالاب گاوخونی در مرکز ایران نشان داده است که این تالاب از سال ۲۰۰۰ به طور فزاینده‌ای خشک شده و در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ تقریباً به طور کامل خشک بوده است (Shiran et al., 2021). همچنین، مطالعات بر روی دریاچه ارومیه و دریاچه نمک در ایران نیز کاهش شدید سطح آب و نوسانات مرتبط با دما و بارش را گزارش کرده‌اند (Abbasszadeh Tehrani & Janalipour, 2021).

(Feizizadeh et al., 2022). این کاهش سطح آب به طور مستقیم با افزایش شوری خاک مرتبط است، همانطور که در شمال استان اصفهان نیز روند افزایشی شاخص شوری (SI) در اراضی دشتی (مانند پلایاها و تشت‌های رسی) مشاهده شده است (Ganjali et al., 2022). این مشاهدات تأکید می‌کنند که تغییرات هیدرولوژیکی و افزایش شوری یک چالش منطقه‌ای و حتی جهانی برای اکوسیستم‌های پلایا محسوب می‌شود، همانند مقایسه انجام شده بین دریاچه ارومیه و دریاچه نمک بزرگ در آمریکا که هر دو با کاهش ورودی آب شیرین و افزایش شدید شوری مواجه هستند (Ziaee & Kapralova, 2025). با این حال، مهم‌ترین یافته این پژوهش، تضاد میان نتایج شاخص‌های پوشش گیاهی و نقشه‌های طبقه‌بندی شده است. در حالی که نقشه‌های طبقه‌بندی به درستی کاهش ۵۱ درصدی پوشش گیاهی را نشان می‌دهند، تحلیل روند شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI، SAVI، EVI و TSAVI)، یک روند افزایشی معنادار را ارائه می‌دهد. این پدیده، ناشی از حساسیت بالای این شاخص‌ها به ویژگی‌های طیفی سطوح نمکی و خاک‌های شور است (Huete, 1988; MNDWI با خشک شدن پلایا و کاهش رطوبت (همانطور که با روند منفی MNDWI تأیید می‌شود)، سطح نمک و گچ پدیدار می‌شود. این سطوح، به ویژه در باند مادون قرمز نزدیک، بازتاب طیفی بالایی دارند که توسط شاخص‌های پوشش گیاهی به اشتباه به عنوان افزایش پوشش گیاهی تفسیر می‌شود. این امر نشان می‌دهد که حتی شاخص‌های تعدیل شده خاک مانند SAVI، EVI و TSAVI نیز در اکوسیستم‌های پلایا، به دلیل بازتاب طیفی قوی و منحصر به فرد نمک و گچ، قادر به ارائه نتایج دقیق نیستند. بنابراین، افزایش شاخص‌های پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، نه به دلیل رشد یا سازگاری پوشش گیاهی، بلکه نتیجه مستقیم افزایش سطح نمک و شوری است که در نتایج شاخص SI نیز تأیید شده است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که در تحلیل سنجش از دور مناطق خشک و شور، استفاده از یک شاخص به تنهایی می‌تواند منجر به نتایج گمراه‌کننده شود و ترکیب داده‌های مختلف (مانند شاخص‌های رطوبتی، شوری و نقشه‌های طبقه‌بندی) برای درک کامل تغییرات محیطی ضروری است.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تبخیر در دریاچه‌های نمکی انتهایی منجر به از دست رفتن آب، کاهش سطح آب و افزایش شوری می‌شود که بر تعامل بین آب شور و آب‌های زیرزمینی ساحلی تأثیر می‌گذارد. مکانیسم نفوذ آب شور به عنوان یک مسئله اجتناب‌ناپذیر زیست‌محیطی در اطراف دریاچه‌های خشک‌شده بر اساس تعادل شوری-سطح آب به وقوع می‌پیوندد (Ahmadi et al., 2024). در پژوهشی دیگر بر روی میزان تراز آبی حوضه دریاچه ارومیه برای تعیین حداقل سطح آب مورد نیاز برای جلوگیری از تشکیل طوفان‌های نمکی‌های، رابطه معناداری بین کاهش سطح آب دریاچه و گسترش زمین‌های کشاورزی و افزایش دمای هوا وجود دارد. مصرف بیش از حد آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی منجر به کاهش منابع آب زیرزمینی، افزایش دمای خاک و افزایش تبخیر شده است (Boloorani et al., 2024).

همانند پلایای ابرکوه، سایر مطالعات نیز خشکسالی‌های پی‌درپی و فعالیت‌های انسانی ناپایدار را به عنوان عوامل اصلی تغییرات ژئومورفولوژیکی و محیطی در پلایاها شناسایی کرده‌اند (Feizizadeh et al., 2022; Shiran et al., 2021; Ziaee & Kapralova, 2025). رشد جمعیت، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، و برداشت بی‌رویه از منابع آب شیرین، فشار زیادی بر هیدرولوژی مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی وارد کرده و تشدید پدیده بیابان‌زایی و شور شدن اراضی را به دنبال داشته است.

افزایش سطح اراضی شور و کاهش سطح اراضی مرطوب در نتیجه خشک شدن این اراضی، نشان‌دهنده افزایش حساسیت اراضی مورد بررسی نسبت به فرسایش بادی و ایجاد کانون‌های گردوغبار نمکی در سطح منطقه، و انتقال ذرات ماسه و نمک به سمت اراضی پایین دست همراه با وزش بادهای غالب و فصلی در منطقه است. در پژوهشی بر روی پیش‌بینی مناطق مستعد گردوغبار در پلایای مرکزی ایران، منطقه ابرکوه به عنوان منطقه‌ای با حساسیت بالا و منبع گرد و غبار با شدت متوسط تا شدید مشخص شده است (جعفری^۱).

^۱ Jafari

و همکاران، ۲۰۲۴) که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. همچنین در پژوهش بر روی آشکارسازی کانون‌های گردوغبار، مناطق بدون پوشش و یا اراضی رها شده، کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی منطقه و حضور پهنه‌های ماسه‌ای مناطق مستعد کانون‌های گردوغبار معرفی شده است (رایگانی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹) که این شرایط مشابه به وضعیت فعلی محدوده مطالعاتی در پژوهش حاضر است و استمرار این شرایط زنگ خطری برای تولید یک کانون جدید گردوغبار در محدوده خشک شده دریاچه نمکی ابرکوه به عنوان منبع برداشت ذرات نمک و وقوع طوفان‌های نمکی خواهد بود. همچنین در پژوهشی بر روی تحلیل مکانی و زمانی تغییرات سطح منطقه غربی کویر ابرکوه با استفاده از داده‌های بازتاب راداری، مشخص گردید که کویر ابرکوه به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است و تغییر در رخساره‌های ژئومورفولوژیک در آن مشهود بوده است (Mirzadeh et al., 2023). این نتایج با یافته‌های به‌دست آمده از پژوهش حاضر منطبق بود و تغییر در مرز و سطح رخساره‌های ژئومورفولوژیک منطقه به‌طور واضح مشاهده گردید.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کویر نمکی ابرکوه در طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ دستخوش تغییرات ژئومورفولوژیکی قابل توجهی شده است. کاهش سطح پهنه‌های آبی و مرطوب، پوشش گیاهی و افزایش سطح اراضی شور، رسی و ماسه‌ای، نشان‌دهنده تأثیر عوامل مختلفی مانند خشکسالی و فعالیت‌های انسانی بر این اکوسیستم حساس است. تحلیل شاخص‌های طیفی نیز مؤید این تغییرات بود. روند کاهش معنادار در سطح آب و روند افزایشی معنادار در شوری خاک، نشان‌دهنده تأثیر خشکسالی بر این منطقه است.

پژوهش حاضر تأکید می‌کند که استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور پیشرفته و پلتفرم‌هایی مانند گوگل ارث انجین برای پایش بلندمدت تغییرات کاربری و پوشش اراضی در مناطق خشک و حساس مانند پلایاهای نمکی ضروری است. اطلاعات دقیق و قابل اعتماد ارائه شده توسط این رویکرد می‌تواند در اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای حفاظت از این اکوسیستم‌های ارزشمند و کاهش پیامدهای منفی ناشی از تغییرات محیطی کمک مؤثری نماید. نیاز به مدیریت پایدار منابع آب و اتخاذ رویکردهای همه‌جانبه برای مقابله با خشکسالی و بیابان‌زایی بیش از پیش احساس می‌شود تا از تخریب بیشتر این اکوسیستم‌های حیاتی جلوگیری به عمل آید.

با توجه به حساسیت کویر نمکی ابرکوه و اهمیت آن در تعادل اکولوژیکی منطقه، لازم است اقدامات مدیریتی مناسبی برای حفاظت از این اکوسیستم ارزشمند انجام شود. بنابراین انجام مطالعات بیشتر در زمینه شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات ژئومورفولوژیکی کویر نمکی ابرکوه و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب برای آن پیشنهاد می‌گردد.

References

- Abbas, A., & Khan, S. (2007). Using remote sensing techniques for appraisal of irrigated soil salinity. International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM), Christchurch, New Zealand.
- Abbasszadeh Tehrani, N., & Janalipour, M. (2021). Predicting ecosystem shift in a Salt Lake by using remote sensing indicators and spatial statistics methods (case study: Lake Urmia basin). *Environmental Engineering Research*, 26(4), 200225-200220. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.225>
- Ahmadi, H., Motallebian, M., & Javadi, H. (2024). Dynamics of saltwater intrusion around drying saline lakes: impact of salinity and water level changes. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40808-024-02217-7>
- Baret, F., Guyot, G., & Major, D. J. (1989, 10-14 July 1989). TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium,
- Bolloorani, A. D., Sharif, M., Samany, N. N., Chehrenegar, B., & Amiraslani, F. (2024). Determining the Minimum Water Level Required for the Urmia Lake to Prevent Formation of Salt Storms: A Satellite-Based Analysis. *International Journal of Environmental Research*, 19(1), 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41742-024-00695-2>
- Camilleri, S., De Giglio, M., Stecchi, F., & Pérez-Hurtado, A. (2017). Land use and land cover change analysis in predominantly man-made coastal wetlands: towards a methodological framework. *Wetlands Ecology and Management*, 25(1), 23-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11273-016-9500-4>

¹ Rayegani

- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Cha, S.-y., & Park, C.-h. (2007). The utilization of Google Earth images as reference data for the multitemporal land cover classification with MODIS data of North Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(5), 483-491.
- Chen, D., Wang, Y., Shen, Z., Liao, J., Chen, J., & Sun, S. (2022). Long Time-Series Mapping and Change Detection of Coastal Zone Land Use Based on Google Earth Engine and Multi-Source Data Fusion. *Remote Sensing*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.3390/rs14010001>
- Embabi, N. S., & Moawad, M. B. (2014). A semi-automated approach for mapping geomorphology of El Bardawil Lake, Northern Sinai, Egypt, using integrated remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(1), 41-60. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.02.002>
- Fatemi, M., & Jebali, A. (2022). Path analysis of the effect of climatic elements on wind speed and desertification progress in Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(10), 930. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10064-y>
- Feizizadeh, B., Abdollahi, Z., & Shokati, B. (2022). A GIS-Based Spatiotemporal Impact Assessment of Droughts in the Hyper-Saline Urmia Lake Basin on the Hydro-Geochemical Quality of Nearby Aquifers. *Remote Sensing*, 14(11), 2516.
- Fu, B., Lan, F., Xie, S., Liu, M., He, H., Li, Y.,...Chen, Z. (2022). Spatio-temporal coupling coordination analysis between marsh vegetation and hydrology change from 1985 to 2019 using LandTrendr algorithm and Google Earth Engine. *Ecological Indicators*, 137, 108763. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108763>
- Ganjali, J., Halabian, A., Karam, A., & hajehforoshnia, s. (2022). Investigation of soil salinity changes related to landforms of desert areas in the northern Isfahan province. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(3), 220-253. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.350895.1366> (In Persian)
- Ge, Y., Abuduwaili, J., Ma, L., Wu, N., & Liu, D. (2016). Potential transport pathways of dust emanating from the playa of Ebinur Lake, Xinjiang, in arid northwest China. *Atmospheric Research*, 178-179, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.002>
- Gill, T., Collett, L., Armston, J., Eustace, A., Danaher, T., Scarth, P.,...Phinn, S. (2010). Geometric correction and accuracy assessment of Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM imagery used for vegetation cover monitoring in Queensland, Australia from 1988 to 2007. *Journal of Spatial Science*, 55(2), 273-287. <https://doi.org/10.1080/14498596.2010.521977>
- Hamzehpour, N., Marcolli, C., Klumpp, K., Thöny, D., & Peter, T. (2022). The Urmia playa as a source of airborne dust and ice-nucleating particles-Part 2: Unraveling the relationship between soil dust composition and ice nucleation activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(22), 14931-14956. <https://doi.org/10.5194/acp-11-9155-2011>
- Harati, H., Kiadaliri, M., Tavana, A., Rahnavard, A., & Amirnezhad, R. (2021). Urmia Lake dust storms occurrences: investigating the relationships with changes in water zone and land cover in the eastern part using remote sensing and GIS. *Environ Monit Assess*, 193(2), 70. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08851-3>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Jafari, R., Amiri, M., & Jebali, A. (2024). Machine learning-driven scenario-based models for predicting desert dust sources in central playas of Iran. *CATENA*, 234, 107618. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107618>
- Jebali, A., & Zare Chahouki, A. (2021). Evaluation of Wind Erosion Risk in Abarkouh Plain Using Landsat Satellite Imageries. *Desert Management*, 9(3), 17-32. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.538377.1350> (In Persian)
- Liu, X., Song, H., Lei, T., Liu, P., Xu, C., Wang, D.,...Zhao, H. (2021). Effects of natural and anthropogenic factors and their interactions on dust events in Northern China. *CATENA*, 196, 104919. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104919>
- Liu, Y., Shen, X., Zhang, J., Wang, Y., Wu, L., Ma, R.,...Jiang, M. (2023). Variation in Vegetation Phenology and Its Response to Climate Change in Marshes of Inner Mongolian. *Plants*, 12(11), 2072. <https://doi.org/10.3390/plants12112072>
- Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S. B. (2005). Partially Supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 559-570. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.842022>

- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, 24, 53-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Mirzadeh, S. M. J., Jin, S., & Amani, M. (2023). Spatial-Temporal Changes of Abarkuh Playa Landform from Sentinel-1 Time Series Data. *Remote Sensing*, 15(11), 2774. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15112774>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247-259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Neal, J. T. (1975). *Playas and dried lakes: occurrence and development*, Dowden, Hutchinson & Ross. Stroudsburg
- Rao, B. R. M., Sharma, R. C., Ravi Sankar, T., Das, S. N., Dwivedi, R. S., Thammappa, S. S., & Venkataratnam, L. (1995). Spectral behaviour of salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, 16(12), 2125-2136. <https://doi.org/10.1080/01431169508954546>
- Rayegani, B., Barati Ghahfarokhi, S., & Khoshnava, A. (2019). Dust & Sand Source Identification Using Remotely Sensed Data: a comprehensive Approach. *Journal of Range and Watershed Managment*, 72(1), 83-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.251015.1223> (In Persian)
- Rosen, M. R. (1994). The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. In M. R. Rosen (Ed.), *Paleoclimate and Basin Evolution of Playa Systems* (pp. 0). Geological Society of America. <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/SPE289-p1>
- Saremi Naeini, M. A. (2021). Evaluation of the effects of land use change in Meybod and Ardakan cities on the intensity of wind erosion. *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(1), 121-135. <https://doi.org/https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.310687.1534> (In Persian)
- Sharp, R. P., & Glazner, A. F. (1997). *Geology Underfoot in Death Valley and Owens Valley*. Mountain Press Publishing.
- Shiran, M., Mozzi, P., Adab, H., & Zangeneh Asadi, M. A. (2021). Remote sensing assessment of changes of surface parameters in response to prolonged drought in the arid zone of central Iran (Gavkhoni playa). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100575>
- Skakun, R. S., Wulder, M. A., & Franklin, S. E. (2003). Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 433-443. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00112-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00112-3)
- Smith, M., & Pain, C. (2009). Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 33(4), 568-582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0309133309346648>
- Tian, Y., Zhou, D., & Jiang, G. (2020). Conflict or Coordination? Multiscale assessment of the spatio-temporal coupling relationship between urbanization and ecosystem services: The case of the Jingjinji Region, China. *Ecological Indicators*, 117, 106543. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106543>
- Turk, L. J. (1970). Evaporation of Brine: A Field Study on the Bonneville Salt Flats, Utah. *Water Resources Research*, 6(4), 1209-1215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR006i004p01209>
- Vélez, S., Martínez-Peña, R., & Castrillo, D. (2023). Beyond Vegetation: A Review Unveiling Additional Insights into Agriculture and Forestry through the Application of Vegetation Indices. *J*, 6(3), 421-436.
- Verstappen, H. T. (2011). Chapter Two - Old and New Trends in Geomorphological and Landform Mapping. In M. J. Smith, P. Paron, & J. S. Griffiths (Eds.), *Developments in earth surface processes* (Vol. 15, pp. 13-38). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53446-0.00002-1>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yasir, M., Hui, S., Binghu, H., & Rahman, S. U. (2020). Coastline extraction and land use change analysis using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technology—A review of the literature. *Reviews on environmental health*, 35(4), 453-460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/revch-2019-0103>
- Zhang, Y., Xu, Q., Wang, T., & Li, J. (2008). A Robust Biased Estimator for Exterior Orientation of Linear Array Pushbroom Satellite Imagery. *Geomatica*, 62(1), 33-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.5623/geomat-2008-0005>
- Ziaee, A., & Kapralova, D. O. (2025). Using Remote Sensing Methods for the Three Lakes' and Evaluating Their Water Surface and Their Fluctuations. *Indonesian Journal of Social and Environmental Issues (IJSEI)*, 6(1), 19-29. <https://doi.org/10.47540/ijsei.v6i1.1467>