



Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin)

Mahin Saedpanah^a, Jamil Amanollahi^{b*}

^a PhD Student in Environment Science, Department of Environmental Sciences, University of Kurdistan, Iran.

^b Associate Professor in Environmental Science, Department of Environmental Sciences, University of Kurdistan, Iran.

Received: 22 December 2023

Revised: 2 June 2024

Accepted 10 June 2024:

Extended Abstract

Introduction

Since the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) is derived from various aspects and characteristics of an ecosystem, it can be used as a reliable index to show environmental quality or assess the condition of a region or ecosystem. The quality of urban ecosystems is determined by several indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), leaf area index (LAI), Land Surface Temperature (LST), Land Surface Moisture (LSM), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Index-Based Built-up Index (IBI), and Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI). However, most of these indicators are not comprehensive enough and cannot evaluate all the important and effective aspects of urban environmental quality. RSEI integrates various indices without requiring manual weighting. This index is a comprehensive measure derived from four indices—vegetation, humidity, dryness, and heat—using Principal Component Analysis (PCA).

Wang et al. (2022) investigated the environmental quality of eastern China using RSEI. The average RSEI values for the years 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were reported as 0.67, 0.55, 0.59, 0.58, and 0.63, respectively, showing an initial decline followed by an increase. The purpose of the current research is to investigate the environmental quality of the Zaribar Lake basin using RSEI. The variables required to calculate this index were obtained under the conceptual model of Pressure-State-Response.

Material and Methods

Zaribar Lake, covering an area of 20 km² with an average depth of 5 m, is located 3 km west of Marivan city, Kurdistan province, at an altitude of 1,320 m above sea level. Landsat

*.Corresponding author : Jamil Amanollahi Email: j.amanollahi@uok.ac.ir Tel:+989379701832

How to cite this Article: Sedpanah, M. , & Amanollahi, J. (2024). Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4) ,269-290



satellite images for 1998, 2010, and 2022 were downloaded from the United States Geological Survey website (<https://earthexplorer.usgs.gov>). After performing the pre-processing operations, land use maps were created using the supervised classification method and the maximum likelihood algorithm in ENVI 5.3 software. The maps categorized land into five classes: built-up areas, agricultural lands, lakes, forests, and reeds.

To verify the accuracy of the classified maps, a random sampling method was employed with ground truth points (control points). Control points were collected through Google Earth images, and classification accuracy was assessed using an error matrix and statistical parameters (kappa coefficient and overall accuracy). The RSEI was calculated using NDVI, LSM, LST, and NDBSI, representing greenness, humidity, heat, and dryness, respectively.

Results and Discussion

Considering the large water area of Zaribar Lake, the lake was excluded from the computational analysis. The results indicated that the specific values of Principal Component 1 (PC1) for each year exceeded 60%, ranging from 63.78% to 71.35%. Two contrasting groups of indicators were observed based on their contribution to environmental quality. NDVI and LSM indices were positively associated, while LST and NDBSI were negatively associated with environmental quality.

The average RSEI for 1998, 2010, and 2022 was 0.39, 0.38, and 0.37, respectively, showing a declining trend. The values suggest an average RSEI of less than 0.40, indicating poor environmental quality in the Zaribar Lake basin. Environmental quality improved with increased vegetation, humidity, and surface water content, while higher NDBSI and LST values indicated greater soil degradation and poorer conditions.

Between 1998 and 2022, NDVI decreased from 0.56 to 0.45, and LSM decreased from 0.64 to 0.62, both negatively impacting environmental quality. Conversely, NDBSI increased from 0.63 to 0.65, and LST rose from 0.77 to 0.87, contributing to environmental degradation. NDBSI reflects changes in urban construction and highlights how urbanization in the Zaribar Lake basin has significantly affected environmental quality.

Conclusion

The analysis of environmental quality changes in the Zaribar Lake basin for 1998, 2010, and 2022 using RSEI revealed that vegetation and humidity positively influenced the environment, whereas heat and dryness had negative effects. The inhibitory effects of NDBSI and LST were more pronounced than the positive effects of NDVI and LSM. The weak RSEI category occupied the largest area, while excellent and good levels were primarily observed in forest and reed lands around Zaribar Lake.

The findings demonstrate that environmental quality in the Zaribar Lake basin has significantly declined, with the average RSEI decreasing from 0.39 in 1998 to 0.37 in 2022. Land use changes were identified as a major factor contributing to the degradation of environmental quality. Therefore, effective urban planning and sustainable land management practices are essential to improve and maintain the ecological quality of the Zaribar Lake basin.

Keywords: Remote Sensing Index , Land Use Changes, Vegetation Index , Moran Index , Environmental Quality Assessment.



ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص‌های کیفی اکولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریبار)

مهین ساعد پناه-دانشجوی دکترای محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

جمیل امان‌اللهی^۱ - دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱

چکیده

فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند به‌طور عینی و کمی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست را ارزیابی کند. پی بردن به کیفیت محیط‌زیست منطقه‌ای و تغییرات اکولوژیکی برای نظارت و مدیریت محیط‌زیست و برنامه‌ریزی ساخت‌وساز شهری بسیار مهم است. به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار از تصاویر لندست سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ جهت استخراج چهار شاخص پوشش گیاهی، رطوبت، گرما و خشکی استفاده شد. سپس شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی به-دست آمد. ناهمگنی فضایی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در دوره مورد مطالعه توسط شاخص موران ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که اثر بازدارندگی NDBSI و LST به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از اثر ترویجی NDVI و LSM بر محیط‌زیست محدوده مورد مطالعه است. بر اساس نتایج RSEI مساحت طبقه با کیفیت محیط‌زیست ضعیف در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۵۹/۳۶، ۶۵/۴۹ و ۵۶/۰۲ درصد به‌دست آمد. منطقه با سطوح عالی و خوب RSEI عمدتاً متعلق به اراضی جنگلی و نیزار بود. مقادیر میانگین RSEI حاکی از کاهش کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار بود. نتایج نمودارهای پراکندگی شاخص جهانی موران، در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۸۵ و ۰/۷۱ تعیین شد که حاکی از کاهش همگنی در این دوره بود. محیط‌زیست محیطی پیچیده است، بنابراین با استفاده از چهار شاخص RSEI می‌توان وضعیت آن را تخمین زد. در مطالعات آینده می‌توان از داده‌های مکانی متنوع‌تری مانند بهره‌وری خالص اولیه و ذرات معلق در هوا استفاده شود. **کلیدواژه‌ها:** شاخص سنجش از دور، تغییرات کاربری زمین، شاخص پوشش گیاهی، شاخص موران، ارزیابی کیفیت محیط زیست.

۱- مقدمه

از آنجایی که شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور (RSEI^۱) با استفاده از جنبه‌ها و ویژگی‌های مختلف یک بوم‌سازگان به دست می‌آید، می‌توان آن را به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای نشان دادن وضعیت کیفیت محیط‌زیست یک منطقه یا بوم‌سازگان در نظر گرفت (Karbalaei Saleh, Amoushahi & Gholipour, 2021). کیفیت محیط‌زیست به مناسب بودن ترکیب کلی یا جزئی عوامل اکولوژیکی در یک محدوده مکانی و زمانی خاص برای بقای انسان و توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی اشاره دارد. در دهه ۱۹۹۰، سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD^۲) مدل فشار-حالت-پاسخ (PSR^۳) را برای نظارت و ارزیابی کیفیت محیط-زیست منطقه‌ای پیشنهاد کرد که به طور گسترده توسط پژوهشگران در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Wu, Zhao, Qin, Liu & Shen, 2023). کیفیت بوم‌سازگان شهری توسط چندین شاخص از جمله شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI^۴) یا شاخص سطح برگ (LAI^۵)، دمای سطح زمین (LST^۶)، رطوبت سطح زمین (LSM^۷)، شاخص تفاضل نرمال شده مناطق ساخته شده (NDBI^۸)، شاخص مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته شده (IBI^۹) و شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDISI^{۱۰}) ارزیابی شده است (Hu & Xu, 2018; Ariken, Zhang, Liu, Fang & Kung, 2020; Karbalaei Saleh et al., 2021). با این حال، اکثر این شاخص‌ها به اندازه کافی جامع نیستند و نمی‌توانند تمام جنبه‌های مهم و مؤثر کیفیت محیط شهری را ارزیابی کنند. از این رو، اخیراً توجه پژوهشگران به شاخص‌های ترکیبی آغاز شده است. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور (Xu, 2013)، شاخص‌های مختلفی را ادغام می‌کند و نیازی به تعیین وزن به صورت دستی ندارد (Zhang, Cai, Yang & Guo, 2022). این شاخص، یک شاخص جامع مشتق شده از چهار شاخص شامل: سبزی، رطوبت، خشکی و گرما است که با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA^{۱۱}) ساخته می‌شود. بنابراین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور می‌تواند فشارهای وارده بر محیط‌زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی (به عنوان مثال، شهرنشینی)، تغییرات در وضعیت محیطی (به عنوان مثال، پوشش گیاهی) (Arekhi, Mahmoudian & Emadaddian, 2022) و واکنش‌های تغییرات آب‌وهوایی (به عنوان مثال، دما و رطوبت) را منعکس کند (Esmaeili, Mirmousavi & Soheili, 2022).

¹. Remote Sensing-Based Ecological Index

². Organization for Economic Cooperation and Development

³. Pressure-State-Response

⁴. Normalized Difference Vegetation Index

⁵. Leaf Area Index

⁶. Land Surface Temperature

⁷. Land Surface Moisture

⁸. Normalized Difference Built-up Index

⁹. Index-Based Built-up Index

¹⁰. Normalized Difference Impervious Surface Index

¹¹. Principal Components Analysis

همچنین این شاخص برای ارزیابی کمی تنوع کیفیت محیط‌زیست در مقیاس منطقه‌ای مطلوب است (Hang, Li, Luo, Xu & Han, 2020). اعتبار و پایایی شاخص‌های اکولوژیکی سنجش‌ازدور در مطالعات قبلی تأیید شده است. جلیلیان و امان‌اللهی (Jalilian & Amanollahi, 2023) پتانسیل تخریب اکولوژیک را در منطقه حفاظت شده کوسالان با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS بررسی کردند، آن‌ها نشان دادند که نزدیک به ۵۰ درصد مساحت منطقه دارای پتانسیل تخریب اکولوژیک هستند و مناطق نزدیک به روستا بیشتر در معرض تخریب قرار دارند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) به تجزیه و تحلیل تغییر کیفیت محیط‌زیست در حوضه رودخانه Yellow با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور پرداختند. طی ۳۰ سال گذشته، کیفیت محیط‌زیست در حوضه مذکور به‌طور کلی بهبود یافت، و این بهبود را می‌توان به دو دوره با بهبود سریع (۱۹۹۰-۲۰۰۰) و بهبود آهسته (۲۰۰۰-۲۰۲۰) تقسیم کرد. وانگ و همکاران (Wang, Zhang & Xi, 2022) کیفیت محیط‌زیست شرق چین را بر اساس شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور موردبررسی قرار دادند. مقادیر میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۵۵، ۰/۵۹، ۰/۵۸ و ۰/۶۳ به‌دست آمد که مقادیر میانگین ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر ژای و همکاران (Zhai, Xie, Li & Zhang, 2019) کیفیت محیط‌زیست شهر ژینجیکو^۱ چین را توسط شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سه بازه زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۳ بررسی نمودند و یافته‌ها حاکی از کاهش کیفیت اکولوژیکی شهر بود. حوضه دریاچه زیربار با کاربری‌های متنوع در غرب ایران، مشابه بسیاری از مناطق در معرض تهدید فعالیت‌های انسانی است. این حوضه در سال‌های اخیر به‌دلیل جنگل‌زدایی و تغییر اراضی به کشاورزی و مسکونی و همچنین کاهش میزان بارندگی دستخوش تغییرات زیادی شده است (Sadeghi, Khaledi & Nyman, 2018). این فعالیت‌ها می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست وارد کنند (Lin, Hao, Post & Mikhailova, 2022). به‌منظور ارزیابی مؤثر کیفیت محیط‌زیست برای نوع بشر و حفظ توسعه پایدار، تشخیص کیفیت اکولوژیکی به‌ویژه پویایی بلندمدت محیط‌زیست ضروری است. هدف از پژوهش حاضر بررسی کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زیربار با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور است. متغیرهای موردنیاز جهت استخراج این شاخص جدید تحت مدل مفهومی فشار-حالت-پاسخ به‌دست آمد.

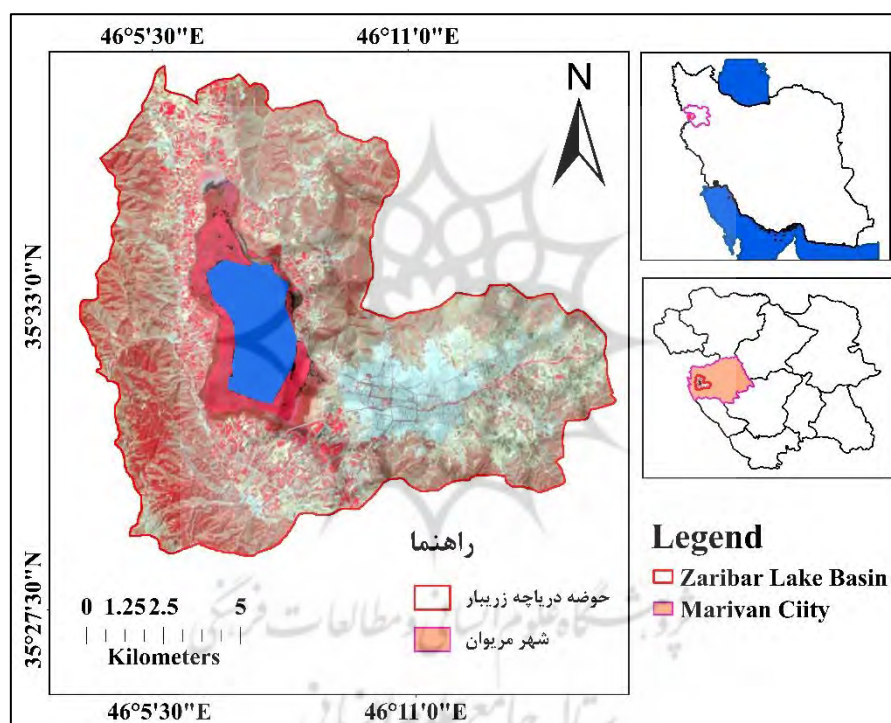
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

دریاچه زیربار به وسعت ۲۰ کیلومتر مربع و عمق متوسط پنج‌متر در فاصله سه کیلومتری غرب شهرستان مریوان، استان کردستان (مختصات مرکز دریاچه طول جغرافیایی ۴۶°، ۳'، ۱۰" و عرض جغرافیایی

¹ Xinjiekou

"۳۷°۳۳'۳۰" با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). محدوده این دریاچه دارای آبوهوای مدیترانه‌ای بوده و میانگین بارندگی و دمای سالانه آن به ترتیب ۹۹۱/۲ میلی‌متر و ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین بارندگی در اواخر زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد. کوه‌ها و تپه‌ها بخش مهمی از حوضه دریاچه زریبار را تشکیل می‌دهند. تأمین آب دریاچه توسط چشمه‌های آب شیرین و عدم ارتباط آن با رودخانه، زریبار را به بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین ایران تبدیل کرده است. حوضه آبخیز محدوده وسیعی را تغذیه می‌کند که کشاورزی در آن استفاده اولیه از زمین و منبع درآمد است. کشاورزان بیشتر محصولاتی مانند انگور و توت‌فرنگی تولید می‌کنند که به آب زیادی نیاز دارد و به‌طور سنتی از طریق استخراج آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شود (Sadeghi et al., 2018).



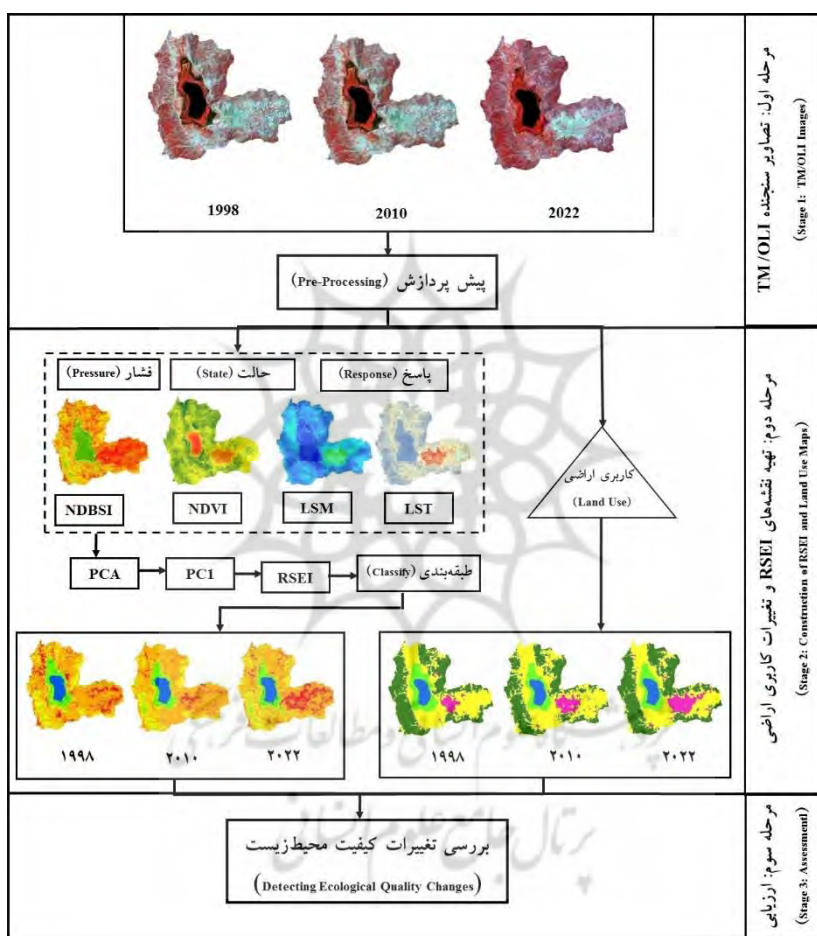
شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

Fig. 1. Geographical position of study area

۲-۲- جمع‌آوری، پیش‌پردازش داده‌ها و نقشه‌کاری اراضی

این مطالعه همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ از وبگاه زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دانلود شدند. ویژگی‌های دقیق آن در جدول ۱ ارائه شده است. پس از انجام عملیات پیش‌پردازش، نقشه‌های کاربری اراضی بر اساس روش طبقه‌بندی نظارت شده- الگوریتم

حداکثر احتمال توسط نرم‌افزار ENVI5.3 در پنج کلاس (مناطق ساخته شده، اراضی کشاورزی، دریاچه، جنگل و نیزار) طبقه‌بندی شدند. به منظور بررسی صحت نقشه‌های به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای از روش نمونه‌گیری تصادفی به عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترل) استفاده شد. سپس با جمع‌آوری نقاط کنترلی از طریق تصاویر Google Earth، صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (ضریب کاپا و صحت کلی) محاسبه شد (جدول ۲). در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.6.1 نقشه کاربری اراضی برای سه سال مورد مطالعه استخراج شد.



شکل ۲- فلوچارت مراحل مختلف روش کار

Fig. 2. Flowchart of different steps of the methodology

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شده در پژوهش

Table 1- Characteristics of satellite images selected in the current research

ردیف	ستون	تاریخ دریافت تصویر	قدرت تفکیک (متر)	سنجنده	لندست
Rows	Columns	Date of images	Spatial Resolution	Sensor	Landsate
168	35	1998.05.14، 1998.07.17	30	TM	لندست ۵ Landsate 5

168	35	2010.05.18، 2010.07.18	30	TM	لندست ۵ Landsat5
168	35	2022.05.16، 2022.07.19	30	OLI	لندست ۸ Landsat8

جدول ۲- ضریب کاپا و صحت کلی حاصل از طبقه‌بندی

Table 2- Kappa coefficient and overall accuracy of classification

صحت کلی	ضریب کاپا	سال	نوع طبقه‌بندی
Overall Accuracy	Kappa Coefficient	Years	Classification Type
98.45	0.98	1998	الگوریتم حداکثر احتمال Maximum likelihood Algorithm
97.87	0.97	2010	
98.67	0.98	2022	

۲-۳- شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور

شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور از یک شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، رطوبت سطح زمین (LSM)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDBSI) تشکیل شده است که به ترتیب چهار مؤلفه اکولوژیکی سبزی، رطوبت، گرما و خشکی را منعکس می‌کنند و ارتباط نزدیکی با بقای انسان دارند. آب می‌تواند بر بار تجزیه مؤلفه اصلی و ارزیابی کیفیت محیط‌زیست منطقه تأثیر بگذارد؛ بنابراین، شاخص تغییر نرمال شده آب اصلاح شده (mNDWI^۱) (رابطه ۱) برای پوشاندن بدنه آبی (دریاچه زیربار) قبل از محاسبه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور استفاده شد تا رطوبت واقعاً نشان‌دهنده رطوبت محدوده مورد مطالعه باشد (Xiong et al., 2021).

$$\text{mNDWI} = (\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SWIR1}}) / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن ρ_{Green} باند سبز و ρ_{SWIR1} باند مادون‌قرمز میانی می‌باشد.

۲-۳-۱- شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی

این شاخص بر پایه ارتباط جذب انرژی در محدوده طیفی قرمز توسط کلروفیل و افزایش انعکاس در طیف مادون‌قرمز نزدیک برای پوشش گیاهی سالم استوار است و از رابطه (۲) به‌دست آمد.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن ρ_{NIR} باند مادون‌قرمز نزدیک و ρ_{Red} باند قرمز می‌باشد. محدوده عددی رابطه (۲) از -۱ تا +۱ است. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، این شاخص به +۱ تمایل دارد، درحالی‌که در مناطق با تراکم گیاهی کم به -۱ کاهش می‌یابد (Karbalaei Saleh et al., 2021).

¹. Modified Normalized Difference Water Index

۲-۳-۲- شاخص رطوبت سطح زمین

شاخص رطوبت سطح زمین معمولاً برای تعیین کیفیت محیط‌زیست یک منطقه به دلیل ارتباط مستقیم بین اجزای تبدیل کلاهیک منگوله‌ای (TCT) از جمله روشنایی، رطوبت و سبزی با ویژگی‌های سطح زمین استفاده می‌شود (Zawadzki, Przeździecki & Miatkowski, 2016). شاخص LSM برای لندست ۵ (TM) و لندست ۸ (OLI) به ترتیب به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه شد:

$$LSM_{TM} = 0.03151\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$LSM_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن‌ها ρ_{Blue} باند آبی، ρ_{Green} باند سبز، ρ_{Red} باند قرمز، ρ_{NIR} باند مادون قرمز نزدیک، ρ_{SWIR1} باند مادون قرمز میانی اول و ρ_{SWIR2} باند مادون قرمز میانی دوم را نشان می‌دهد.

۲-۳-۳- شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر

ساختمان‌ها بخش مهمی از بوم‌سازگان شهری هستند و سطوح نفوذناپذیر ساختمان‌ها، جایگزین بوم-سازگان طبیعی اولیه و منجر به «خشکی» سطح زمین شده است؛ بنابراین، شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر برای نشان دادن «خشکی» استفاده شد (Hu & Xu, 2018). برای تعیین این شاخص از شاخص مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته شده (IBI) و شاخص خاک برهنه (BI^2) استفاده شد که نتیجه آن را شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDBSI) می‌نامند و به کمک رابطه (۵) الی (۷) به دست آمد:

$$NDBSI = (IBI + BI)/2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$BI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$IBI = \frac{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + [\rho_{Green}/\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}]]\}}{\{2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{Red}) + [\rho_{Green}/\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}]]\}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

¹. Tasseled Cap Transformation

². Bare Soil Index

که در آن‌ها ρ_{Blue} باند آبی، ρ_{Green} باند سبز، ρ_{Red} باند قرمز، ρ_{NIR} باند مادون قرمز نزدیک و ρ_{SWIR1} باند مادون قرمز میانی اول را نشان می‌دهد.

۲-۳-۴- شاخص دمای سطح زمین

به منظور استخراج دمای سطح زمین از الگوریتم سبال استفاده شد. در این روش دمای سطح زمین با استفاده از اطلاعات مربوط به باندهای حرارتی ماهواره لندست ۵ (باند ۶) و ماهواره لندست ۸ (باند ۱۰) بر اساس رابطه (۸) برآورد شد (Allen, Tasumi, Mors & Terzza, 2002):

$$T_s = \frac{k_2}{\ln \frac{\epsilon_{\text{NB}} \times k_1}{R_c}} + 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن k_1 و k_2 ضرایب کالیبراسیون، R_c رادیانس حرارتی تصحیح شده و ϵ_{NB} گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی می‌باشد. رادیانس حرارتی تصحیح شده، رادیانس واقعی گسیل شده از سطح زمین است که برای محاسبه آن نیاز به گسیلمندی در باند حرارتی می‌باشد (رابطه ۹) (Allen et al., 2002):

$$R_c = \frac{L_\lambda - R_p}{\tau_{\text{NB}}} - (1 - \epsilon_{\text{NB}})R_{\text{sky}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن L_λ رادیانس طیفی در بالای اتمسفر، R_p رادیانس مسیر در باند حرارتی، τ_{NB} قابلیت عبور اتمسفری در باند حرارتی، ϵ_{NB} گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی و R_{sky} تابش آسمان صاف در باند حرارتی می‌باشد. کلیه اجسامی که دمای آن‌ها زیاده از صفر مطلق باشد از خود حرارت گسیل می‌کنند. بر این اساس، داده‌های رسیده به سنجنده می‌توانند با استفاده از رابطه (۱۰) به تابش طیفی در سطح سنجنده تبدیل شوند (Allen et al., 2002):

$$L_\lambda = M_L \times Q_{\text{CAL}} + A_L \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن M_L عامل مقیاس‌سازی ضربی اختصاصی باند، Q_{CAL} عدد رقومی و A_L عامل مقیاس‌سازی افزایشی اختصاصی باند می‌باشد. گسیلمندی سطحی کم عرض در قسمت مرئی با توجه به تراکم پوشش گیاهی و روابط ارائه شده در جدول ۳ به دست آمد.

جدول ۳- گسیلمندی سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی و سطح برگ (Allen et al., 2002)

Table 3- Land surface emissivity and vegetation and leaf surface indices

NDVI	LAI<4	$\epsilon_{\text{NB}}=0.97+0.0037\text{LAI}$
NDVI>0	LAI≥3	$\epsilon_{\text{NB}}=0.98$
(Water) NDVI<0	$\alpha<0.47$	$\epsilon_{\text{NB}}=0.99$
(Snow) NDVI<0	$\alpha\geq 0.47$	$\epsilon_{\text{NB}}=0.99$

پس از محاسبه شاخص‌ها، به منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرها و تولید نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، از تجزیه مؤلفه‌های اصلی در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی یک روش مهم برای فشرده‌سازی داده‌های چندبعدی است که می‌تواند به حذف اثر هم‌خطی بین متغیرها کمک کند (Mishra, Taraphder, Swain & Laishram, 2017). از آنجایی که محدوده مقادیر در شاخص‌های مختلف متفاوت است، همه شاخص‌ها باید قبل از اعمال تجزیه مؤلفه‌های اصلی نرمال شوند تا محدوده اعداد بین ۰ تا ۱ باشد (Jolliffe & Cadima, 2016). نرمال‌سازی شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار Terrset2020 انجام شد. در نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، مقدار پیکسل نزدیک‌تر به ۱ منجر به وضعیت محیط‌زیستی بهتر، درحالی‌که مقدار نزدیک‌تر به ۰ منجر به وضعیت محیط‌زیستی ضعیف‌تر می‌شود. علاوه بر این، مقادیر شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور به پنج طبقه با فواصل ۰/۲ طبقه‌بندی و به‌عنوان خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی نام‌گذاری شدند تا کیفیت محیط‌زیست محدوده مورد مطالعه را با جزئیات بیشتری نشان دهد. به منظور استخراج شاخص RSEI از اولین مؤلفه PCA که بیشترین درصد تغییرات را دارد، استفاده شد (رابطه ۱۱).

$$RSEI_0 = PC1[f(NDVI; LSM; NDBSI; LST)] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در مواردی که نقشه شاخص‌های مثبت (پوشش گیاهی و رطوبت سطح زمین) در مؤلفه اول منفی باشد، شاخص RSEI با استفاده از رابطه (۱۲) اصلاح می‌شود، تا مقادیر بالاتر نشان‌دهنده وضعیت محیط‌زیستی بهتری باشد (Hu & Xu, 2018).

$$RSEI = 1 - RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI; LSM; NDBSI; LST)] \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

۴-۲- خودهمبستگی فضایی

شاخص خودهمبستگی فضایی جهانی موران (Moran's I) و شاخص محلی تحلیل فضایی (LISA^۱) برای تجزیه و تحلیل همبستگی فضایی کیفیت محیط‌زیست استفاده شد. هرچه قدر مطلق Moran's I به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی فضایی قوی‌تر است. شاخص LISA می‌تواند مقدار Moran's I را در هر واحد فضایی تجزیه و تحلیل و به‌طور مؤثر ارتباط فضایی محلی را منعکس کند. هنگامی که خودهمبستگی فضایی جهانی وجود داشته باشد، می‌تواند تجزیه و تحلیل کند که آیا ناهمگنی فضایی وجود دارد یا خیر (Jing et al., 2020). شاخص جهانی موران و شاخص محلی تحلیل فضایی به ترتیب با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) (Karbalaei Saleh et al., 2021) و خودهمبستگی فضایی با استفاده از نرم‌افزار Geoda محاسبه شد.

^۱. Local Indicator of Spatial Analysis

در نهایت، نقشه‌ای به دست آمد که نقشه RSEI را به پنج طبقه خوشه‌بندی، یعنی بالا-بالا (نقاط داغ)، پایین-پایین (نقاط سرد)، پایین-بالا، بالا-پایین و غیرقابل توجه تقسیم می‌کند.

$$I_g = N \sum_i \sum_j W_{ij} (x_i - \mu)(x_j - \mu) / (\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (x_i - \mu)^2 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$I_l = (x_i - \mu) / \sum_i (x_i - \mu)^2 \sum_j W_{ij} (x_j - \mu) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

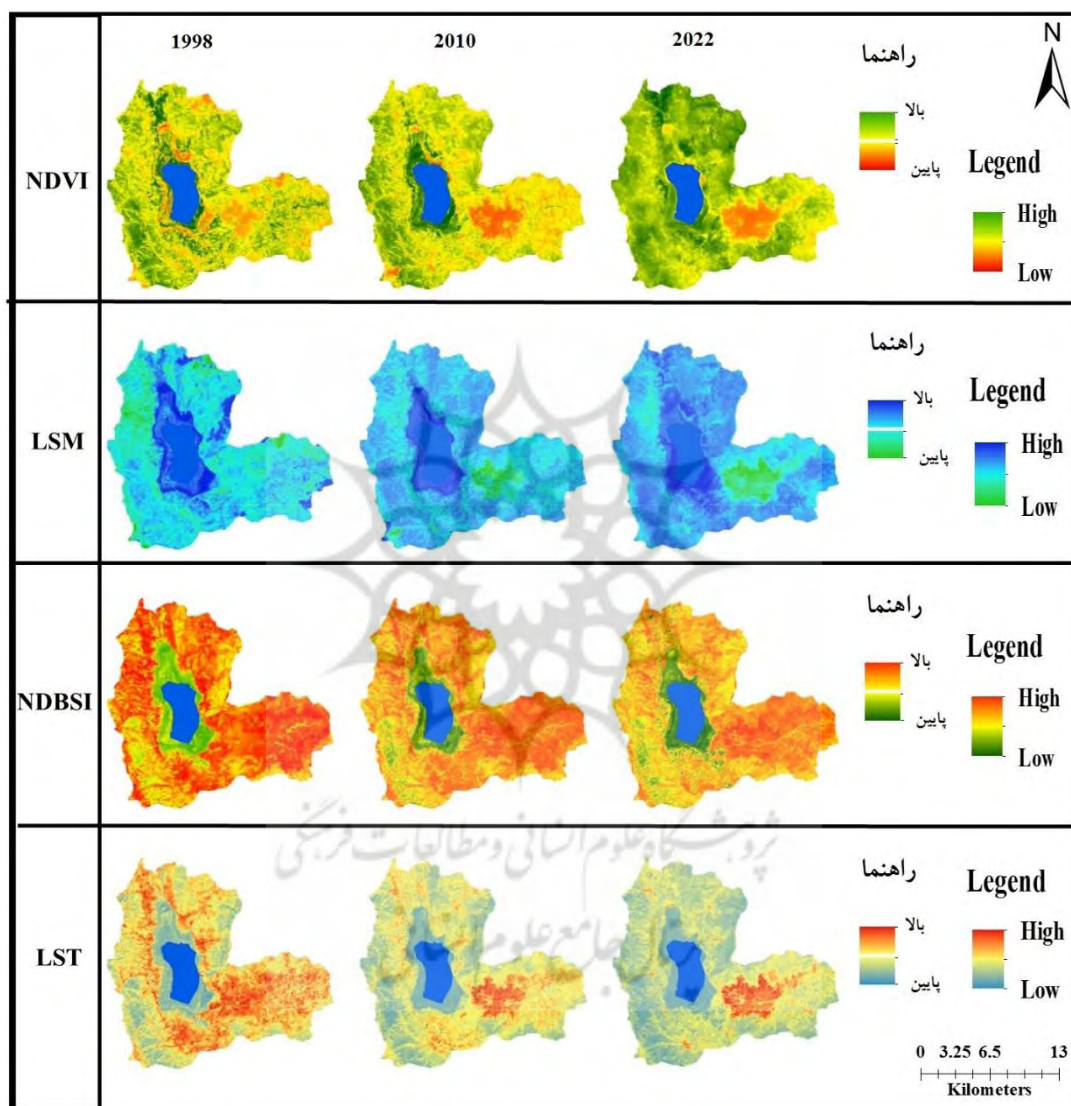
که در آن‌ها W_{ij} ، x_i ، x_j و μ و N به ترتیب وزن‌های نرمال شده، مقدار RSEI در پیکسل i ، مقدار RSEI در پیکسل j ، میانگین مقدار RSEI محدوده مورد مطالعه و تعداد کل پیکسل‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست

با در نظر گرفتن تأثیر یک منطقه بزرگ از آب (دریاچه زریبار) بر نتایج محاسباتی، محدوده دریاچه پوشانده شد. در این مطالعه از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور برای شناسایی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ با امتیازدهی مؤلفه اصلی اول (PC1) از چهار شاخص (NDVI، LSM، NDBSI و LST) استفاده شد (شکل ۳). همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقادیر ویژه PC1 در هر سال بیش از ۶۰ درصد (از ۶۳/۷۸ تا ۷۱/۳۵ درصد) است. دو گروه متضاد از شاخص‌ها بر اساس سهم آن‌ها در کیفیت محیط‌زیست مشاهده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های NDVI و LSM در یک گروه و شاخص‌های LST و NDBSI در گروه دیگری برای ایجاد شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور قرار دارند. به‌منظور تجزیه و تحلیل کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار در سال‌های مذکور، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور و چهار شاخص مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۵). بر اساس نتایج، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۳۸ و ۰/۳۷ بوده است و روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور کم‌تر از ۰/۴۰ به‌دست آمد که نشان‌دهنده وضعیت نه‌چندان مناسب حوضه دریاچه زریبار است. هرچه مقدار سبزی و پوشش گیاهی و مقدار رطوبت و محتوای آب سطحی بیشتر باشد، کیفیت محیط‌زیست بهتر است و بالعکس. هرچه مقدار NDBSI بالاتر باشد، تخریب خاک در منطقه جدی‌تر و کیفیت محیط‌زیست بدتر می‌شود. هرچه ارزش حرارتی بالاتر باشد، کیفیت محیط‌زیست در منطقه بدتر است (Liu, Yu & Mu, 2022). LSM و NDVI که تأثیر مثبتی بر کیفیت محیط‌زیست دارند، بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ به ترتیب از ۰/۵۶ به ۰/۴۵ و از ۰/۶۴ به ۰/۶۲ کاهش و LST و NDBSI که

اثر منفی بر کیفیت محیط‌زیست تحمیل می‌کنند، به ترتیب از ۰/۶۳ به ۰/۶۵ و از ۰/۷۷ به ۰/۸۷ افزایش یافتند. شاخص NDBSI منعکس‌کننده تغییر ساخت‌وساز در منطقه مورد مطالعه است. این پدیده نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی شهری و ساخت‌وساز در حوضه دریاچه زریبار تأثیرات آشکاری بر کیفیت محیط‌زیست شهری دارد.



شکل ۳- شاخص‌های NDVI، LSM، NDBSI و LST در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

Fig. 3. NDVI, LSM, NDBSI and LST indices in 1998, 2010 and 2022

جدول ۴- مشارکت چهار شاخص در مؤلفه اصلی اول (PC1)

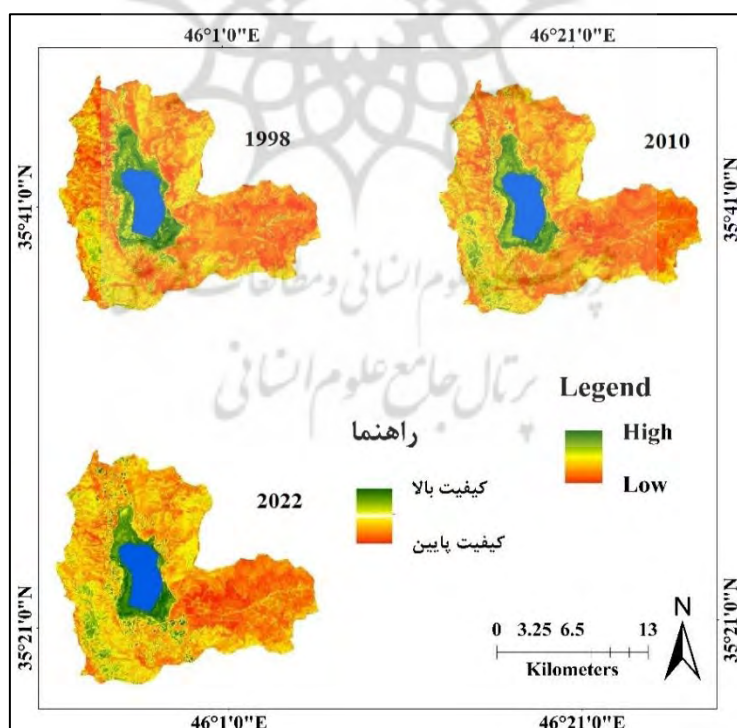
Table 4- Participation of four indicators in the first principal component (PC1)

2020	2010	1998	شاخص/مؤلفه اصلی اول
			PC1
-0.32	-0.25	-0.22	NDVI
-0.54	-0.55	-0.55	LSM
0.58	0.58	0.58	NDBSI
0.50	0.52	0.54	LST
71.35	67.33	63.78	مقادیر ویژه (درصد)
			Eign Value (%)

جدول ۵- میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش از دور و چهار شاخص (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Table 5- Average RSEI and four indices (1998, 2010 and 2022)

2020	2010	1998	شاخص‌ها
			Indices
0.45	0.53	0.56	NDVI
0.62	0.63	0.64	LSM
0.65	0.64	0.63	NDBSI
0.87	0.82	0.77	LST
0.37	0.38	0.39	RSEI



شکل ۴- نقشه شاخص اکولوژیکی سنجش از دور حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 4. RSEI map of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

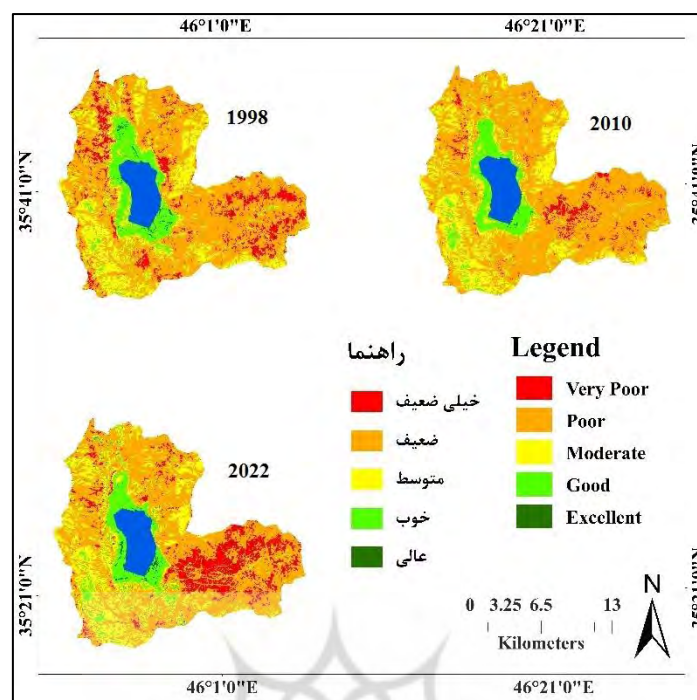
همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مناطق خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی که به ترتیب با رنگ های قرمز، نارنجی، زرد، سبز روشن و سبز ارائه شده است، نشان دهنده تفاوت در سطوح کیفیت محیط زیست مناطق مختلف حوضه دریاچه زریبار است. جدول ۶ مقادیر عددی مربوط به پنج طبقه شاخص اکولوژیکی سنجش از دور را نشان می دهد. مساحت طبقه با کیفیت محیط زیست ضعیف در سال های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۵۹/۳۶، ۶۵/۴۹ و ۵۶/۰۲ درصد به دست آمد. علاوه بر این، بدیهی است که مناطق با کیفیت محیط زیست خیلی ضعیف در سال های مورد مطالعه تنها بخش کوچکی از محدوده مورد مطالعه را نسبت به طبقه ضعیف به خود اختصاص داده اند، به استثنای سال ۲۰۲۲ که وسعت این طبقه به ۱۲/۱۳ درصد از محدوده مورد مطالعه رسید. در طبقه با کیفیت محیط زیست متوسط از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ روند افزایشی مشاهده شد. بر اساس نتایج طبقه بندی شده (جدول ۶ و شکل ۵)، تقریباً بیش از ۸۰ درصد از کل محدوده مورد مطالعه متعلق به طبقات ضعیف و متوسط بوده است. برای مناطق با سطح شاخص اکولوژیکی سنجش از دور ضعیف و متوسط، حفاظت از خاک و جلوگیری از تبدیل مساحت زیادی از اراضی کشاورزی به مناطق ساخته شده در طول توسعه شهری ضروری است. لین و همکاران (Lin et al., 2020) گزارش دادند که مناطق ساخته شده از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ به میزان ۱۶/۲۰ درصد افزایش یافته است، و بسیاری از اراضی زیر کشت به مناطق ساخته شده در جزیره های تان^۱ تبدیل شده است. در پژوهش حاضر طبقه با کیفیت محیط زیست خوب تا سال ۲۰۱۰ روند کاهشی را تجربه کرد، سپس در سال ۲۰۲۲ روند افزایشی نشان داد. این روند برای طبقه عالی نیز مشاهده شد (جدول ۶). منطقه با سطوح عالی و خوب شاخص اکولوژیکی سنجش از دور عمدتاً متعلق به اراضی جنگلی و نیزار است که در آن باید از مزاحمت انسانی به ویژه در مناطق اطراف دریاچه زریبار اجتناب شود.

جدول ۶- طبقه بندی حوضه دریاچه زریبار در سال های مورد مطالعه بر اساس شاخص اکولوژیکی سنجش از دور

Table 6- Classification of Zaribar lake basin in the studied years Based on RSEI

عالی Excellent		خوب Good		متوسط Moderate		ضعیف Poor		خیلی ضعیف Very Poor		سال/کیفیت اکولوژیکی طبقه Class of Ecological Quality
درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	درصد (%)	هکتار (ha)	
0.69	105.98	10.04	1529.46	20.19	3047.22	59.36	9036.27	9.69	1475.64	1998
0.24	37.68	8.68	1322.10	21.47	3268.35	65.49	9968.58	4.09	623.97	2010
0.75	114.36	9.51	1448.01	21.56	3283.02	56.02	8527.86	12.13	1847.43	2022

¹ Haitan



شکل ۵- نقشه‌های طبقه‌بندی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 5. Classification maps of RSEI of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۲-۳- مقایسه شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور با نقشه کاربری اراضی

از آنجایی که کاربری اراضی و تغییرات آن‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کیفیت محیط‌زیست داشته باشد (Kafy, Rahman, Faisal, Hasan & Islam, 2020)، به منظور تفسیر بهتر وضعیت کیفیت محیط‌زیست حوضه دریاچه زریبار، نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ تهیه شد (شکل ۶). بر اساس بوم‌سازگان حوضه دریاچه زریبار، پنج نوع کاربری (مناطق ساخته شده، اراضی کشاورزی، دریاچه، جنگل و نیزار) برای طبقه‌بندی در سه سال مورد مطالعه انتخاب شدند. جدول ۷ تغییرات مساحت هر کاربری را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که انواع کاربری اراضی و مقادیر شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال‌های مختلف سازگاری خوبی دارند، همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۷ ارائه شده است، بیشتر تغییرات مربوط به اراضی کشاورزی است. مساحت اراضی کشاورزی در سال ۲۰۲۲، ۱۰/۴۷ درصد کاهش یافت. همچنین تغییر اراضی جنگلی به عنوان شاخصی مثبت برای کیفیت محیط‌زیست حدود ۸/۵۷ درصد در سال ۲۰۲۲ نسبت به ۲۰۱۰ افزایش نشان داد. مناطق ساخته شده با کیفیت محیط‌زیست رابطه معکوس دارند و تغییرات آن بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۰، ۲/۳۳ درصد می‌باشد. با توسعه شهرنشینی، سطح غیرقابل نفوذ در حوضه دریاچه زریبار افزایش و تا حدودی بر روند بهبود کیفیت محیط‌زیست تأثیر گذاشته است، به این معنی که ارزش شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در منطقه روند کاهشی نشان داده است. این موارد نشان

می‌دهد که روند کیفیت محیط‌زیست در محدوده مورد مطالعه به انواع کاربری اراضی مرتبط است. لین و همکاران (Lin et al., 2020) از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور برای ارزیابی تغییرات اکولوژیکی شهرستان پینگتان^۱ (یک شهر ساحلی در چین) استفاده کردند و روند کاهشی در این شاخص را گزارش دادند. آن‌ها ادعا نمودند که روند کاهشی شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور عمدتاً به کاهش پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی مربوط می‌شود. ژو و همکاران (Zhu, Chen, Zhen & Niu, 2020) تغییرات کاربری اراضی ناشی از گسترش شهری را عامل اصلی بدتر شدن شرایط اکولوژیکی شهر ژنگجو^۲ در چین معرفی کردند. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور تحت مدل مفهومی فشار-حالت-پاسخ، که یکی از متداول‌ترین مدل‌های مفهومی محیطی است، توسعه یافته است. در میان چهار شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، NDBSI برای نشان دادن فشار ناشی از فعالیت‌های انسانی بر روی یک بوم‌سازگان استفاده می‌شود، NDVI حالت اکولوژیکی سطح زمین را قبل و بعد از تغییرات اندازه‌گیری می‌کند، LST و LSM پاسخ بوم‌سازگان به آب و هوا را منعکس می‌کنند (Wu et al., 2023). تجزیه و تحلیل بیشتر شاخص‌های مورد مطالعه برای شناسایی علل اصلی تغییرات ضروری است. شاخص NDVI که نمایانگر پوشش گیاهی است در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۳ و ۰/۴۵ به دست آمد. همان‌طور که در نقشه کاربری اراضی (شکل ۶ و جدول ۷) نشان داده شده است، درصد پوشش گیاهی (اراضی کشاورزی، جنگل و به ویژه نیزار) در برخی از این سال‌ها با NDVI رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، درصد اراضی کشاورزی در سال ۲۰۲۲ و جنگل در سال ۲۰۱۰ به ترتیب حدود ۱۰/۴۷ و ۷/۶۹ درصد کاهش نشان داد. میانگین شاخص NDBSI در منطقه نشان داد که فشارهای انسانی در منطقه در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۶۴ و ۰/۶۵ بوده است. این شاخص در طی دوره مورد مطالعه افزایش یافت. بین این شاخص با مناطق ساخته شده رابطه مستقیم مشاهده شد. از این رو، تغییرات کاربری اراضی، به عنوان مهم‌ترین عوامل تغییر کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زیربار شناخته شد که با یافته‌های سایر پژوهشگران همسو است (Karbalaei Saleh et al., 2021; Hang, Luo, Cao & Li, 2020).

جدول ۷- تغییرات مساحت کاربری اراضی حوضه دریاچه زیربار در سال ۱۹۹۸-۲۰۲۲

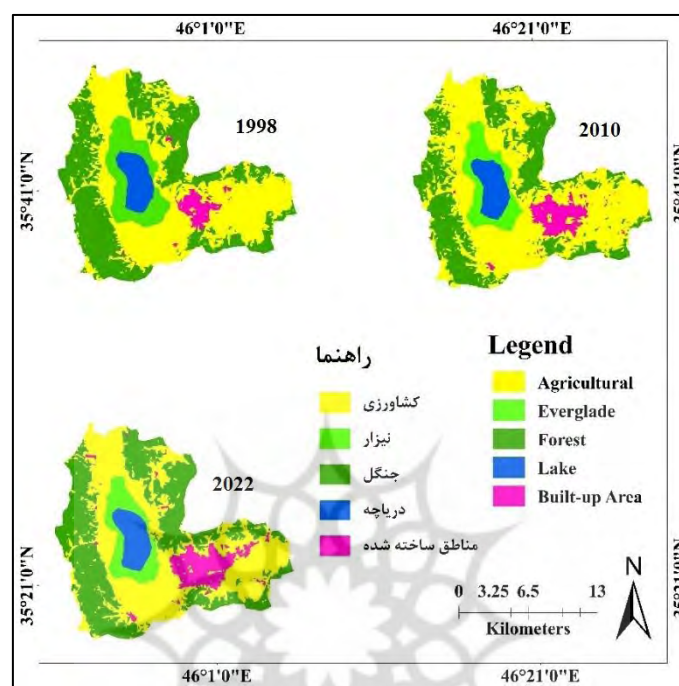
Table 7- Changes in the land use area of Zaribar lake basin in 1998-2022

نیزار Everglade		جنگل Forest		اراضی کشاورزی Agricultural Area		مناطق ساخته شده Built-up Area		سال/نوع کاربری اراضی Land use Type
درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	
(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	
9.68	1554.84	36.49	5859.82	45.86	7365.91	3.03	486.83	1998
-2.23	-355.29	-7.69	-1226.15	8.01	1300.36	1.91	309.30	تغییرات (۲۰۱۰-۱۹۹۸)

¹ Pingtan

² Zhengzhou

7.45	1199.51	28.80	4633.47	53.87	8666.27	4.94	796.13	Changes (1998-2010)
-0.33	-55.62	8.75	1367.53	-10.47	-1740.39	2.33	371.99	تغییرات (۲۰۲۲-۲۰۱۰)
7.12	1143.89	37.37	6001.20	43.13	6925.29	7.27	1168.12	Changes (2010-2022)
								2022



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوضه دریاچه زیربار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

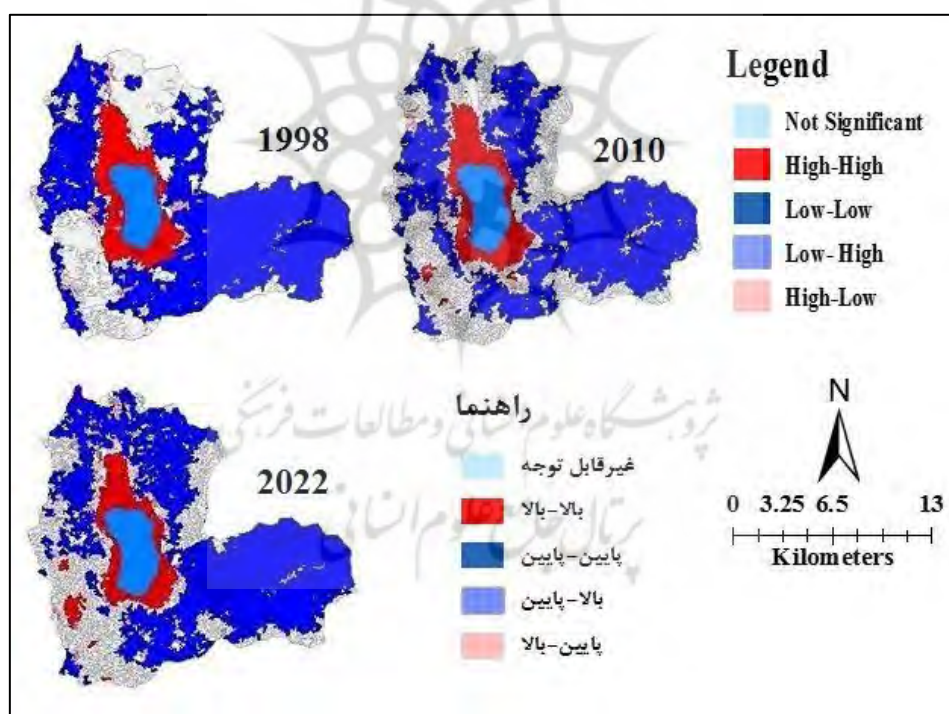
Fig. 6. Land use map of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۳-۳- تحلیل خودهمبستگی فضایی

به منظور درک توزیع مکانی-زمانی کیفیت محیط زیست، الگوی همبستگی فضایی شاخص اکولوژیکی سنجش از دور با استفاده از نقشه خوشه بندی شاخص محلی تحلیل فضایی (LISA) به دست آمد (شکل ۷). همان طور که مشاهده می شود، منطقه خوشه بندی بالا-بالا (نقاط داغ) در مناطقی از حوضه دریاچه زیربار که از پوشش گیاهی متراکم (جنگل و نیزار) برخوردار می باشد توزیع شده است. علاوه بر این، منطقه خوشه بندی پایین-پایین (نقاط سرد)، در مناطقی با کمبود پوشش گیاهی یا مناطقی که بیشتر توسط انسان تخریب شده اند مانند مناطق ساخته شده شایع تر است. منطقه خوشه بندی پایین-پایین (نقاط سرد) به طور مداوم از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ افزایش یافته است، که نشان دهنده توسعه شهرنشینی می باشد و منجر به بدتر شدن کیفیت محیط زیست شده است. در پژوهش ژیونگ و همکاران (Xiong et al., 2021) توزیع منطقه خوشه بندی پایین-پایین (نقاط سرد) عمدتاً در نواحی اطراف دریاچه ارهای^۱ مشاهده شد. این مناطق پرجمعیت با

¹ Erhai

فعالیت‌های مکرر انسانی بودند. مساحت مناطق ساخته شده در نواحی اطراف دریاچه اراهای از ۹۳/۳۸ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به ۱۰۳/۵۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۵ افزایش یافت. بر اساس نتایج پژوهش لی و همکاران (Li, Bai & Alatalo, 2020) در برخی از مناطق توسعه اقتصادی (به‌عنوان مثال تیانجینگ^۱ و مانجیانگ^۲) منطقه خوشه‌بندی پایین-پایین (نقاط سرد) به‌طور مداوم از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹ افزایش یافت. این افزایش سطح عمدتاً ناشی از تبدیل اراضی کشاورزی و علفزار به مناطق ساخته شده بود. نتایج نمودارهای پراکندگی شاخص جهانی موران، کاهش پیوسته همبستگی را از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد، زیرا از حدود ۰/۸۶ در سال ۱۹۹۸ به ۰/۷۱ در سال ۲۰۲۲ تغییر کرد (شکل ۸). کاهش شاخص جهانی موران نشان دهنده کاهش همگنی در سال‌های مورد مطالعه بود. با کاهش همگنی، نقاط با کیفیت محیط‌زیست بالا از یکدیگر جدا و تکه تکه شده‌اند. توسعه سریع اقتصادی و گسترش شهری، سطوح غیرقابل نفوذ، اراضی اکولوژیکی بیشتری را در مقیاس شهری اشغال کرده‌اند که منجر به کیفیت محیط‌زیست ضعیف‌تر و درنهایت کاهش ارزش شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در حوضه دریاچه زریبار شده است.

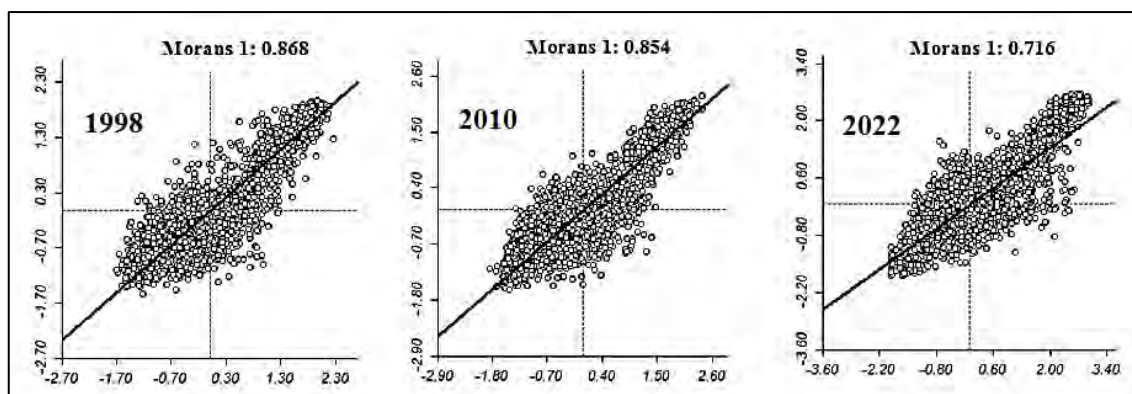


شکل ۷- نقشه شاخص محلی تحلیل فضایی حوضه دریاچه زریبار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 7. Local index map of spatial analysis of Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

¹ Tianjing

² Manjiang



شکل ۸- نمودار پراکندگی شاخص موران در حوضه دریاچه زیربار (۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲)

Fig. 8. Scatter diagram of Moran index in Zaribar lake basin (1998, 2010 & 2022)

۴- جمع‌بندی

بوم‌سازگان آبی در معرض تأثیرات قابل توجه افزایش فعالیت‌های انسانی، بازسازی سیمای سرزمین و گسترش شهری هستند که منجر به تغییرات در کیفیت محیط‌زیست و مسائل امنیتی اکولوژیکی شهری می‌شود.

فناوری سنجش‌ازدور برای تعیین توزیع فضایی وضعیت محیط‌زیستی دارای ارزش است و معیارهای اندازه‌گیری فرایندهای محیط‌زیستی را فراهم می‌کند. در این مطالعه از تصاویر لندست ۵ و ۸ برای استخراج سبزی، رطوبت، گرما و خشکی استفاده شد. شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور نه تنها یک مقدار عددی واحد برای توصیف وضعیت کلی محیط‌زیستی فراهم می‌کند، بلکه یک تصویر محیط‌زیستی قابل مشاهده نیز دارد که موقعیت و میزان شرایط مختلف محیط‌زیستی را نشان می‌دهد. چنین اطلاعاتی برای فرایند تصمیم‌گیری در مورد مدیریت و بازیابی کیفیت محیط‌زیستی منطقه از جمله اقدامات کنترل تخریب اراضی جنگلی از اهمیت بالایی برخوردار است. تجزیه و تحلیل تغییرات کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زیربار برای سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور انجام شد. علاوه بر این، ویژگی‌های تمایز مکانی کیفیت محیط‌زیست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرسبزی و رطوبت اثرات مثبت و گرما و خشکی اثرات منفی بر کیفیت محیط‌زیست دارند. اثر بازدارندگی NDBSI و LST به‌طور قابل توجهی بیشتر از اثر ترویجی NDVI و LSM بر محیط‌زیست محدوده مورد مطالعه بود. طبقه ضعیف شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور بیشترین مساحت را به خود اختصاص داد. سطوح عالی و خوب شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور عمدتاً مربوط به اراضی جنگلی و نیزار اطراف دریاچه زیربار بود. یافته‌ها حاکی از آن است که کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زیربار کاهش چشمگیری داشته به‌صورتی که میانگین شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور در سال ۱۹۹۸ مقدار ۰/۳۹ بوده اما در سال ۲۰۲۲ این مقدار به

۰/۳۷ رسیده است. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه نقشه کاربری اراضی با شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور، تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار شناسایی شد. نتایج حاصل از شاخص موران نشان داد که میزان خودهمبستگی فضایی در سال ۲۰۲۲ در مقایسه با سال ۱۹۹۸ نسبتاً ضعیف بوده و توزیع فضایی تصادفی و پراکنده‌ای در محدوده مورد مطالعه مشاهده شد که می‌توان آن را به مداخلات انسانی نسبت داد. محیط‌زیست محیطی پیچیده است، بنابراین با استفاده از چهار شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور می‌توان وضعیت آن را تخمین زد. در مطالعات آینده می‌توان از داده‌های مکانی متنوع‌تری مانند بهره‌وری خالص اولیه و ذرات معلق در هوا استفاده شود.

References

- Allen, R. G., Tasumi, M., Mors, A., & Terzza, R. (2002). Satellite-Based Evapotranspiration by Energy Balance for Western States Water Management. *US Bureau Reclamation Evapotranspiration workshop*. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)556](https://doi.org/10.1061/40792(173)556)
- Arekhi, S., Mahmoudian, A., & Emadaddian, S. (2022). Forest Degradation using GIS and Logistic Regression (Case Study: Forests of Sardasht). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(4), 69-92. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.70743.1070>
- Ariken, M., Zhang, F., Liu, K., Fang, C., & Kung, H. T. (2020). Coupling coordination analysis of urbanization and ecoenvironment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data. *Ecological Indicators*, 114, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106331>
- Esmaeili, H., Mirmousavi, S., & Soheili, E. (2022). Investigation of Agricultural Drought Time Series in Darab City using Remote Sensing and Google Earth Engine System. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(4), 185-203. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.69186.1029>
- Hang, X., Li, Y., Luo, X., Xu, M., & Han, X. (2020). Assessing the ecological quality of Nanjing during its urbanization process by using satellite, meteorological, and socioeconomic data. *Journal of Meteorological Research*, 34(2), 280-293. <https://doi.org/10.1007/s13351-020-9150-6>
- Hang, X., Luo, X. C., Cao, Y., & Li, Y. C. (2020). Ecological quality assessment and urbanization impact based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 219-229. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202001.030>
- Hu, X., & Xu, H. (2018). A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, 89, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.006>
- Jalilian, Z., & Amanollahi, J. (2023). Evaluating Ecological Degradation of Kosalan Protected Area using Remote Sensing and GIS. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 41-61. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75467.1184>
- Jing, Y., Zhang, F., He, Y., Kung, H., Johnson, V. C., & Arikena, M. (2020). Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 110, 105874. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105874>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kafy, A. A., Rahman, M. S., Faisal, A. A., Hasan, M. M., & Islam, M. (2020). Modelling future land use land cover changes and their impacts on land surface temperatures in Rajshahi, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100314>

- Karbalaie Saleh, S., Amoushahi, A., & Gholipour, M. (2021). Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: a case study of central Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 193(5), 305. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09082-2>
- Li, J., Bai, Y., & Alatalo, J. M. (2020). Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystem Services*, 42, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101081>
- Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., & Mikhailova, E. A. (2022). Monitoring Ecological Changes on a Rapidly Urbanizing Island Using a Remote Sensing-Based Ecological Index Produced Time Series. *Remote Sensing*, 14(22), 5773. <https://doi.org/10.3390/rs14225773>
- Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Yu, K., Yang, L., & Liu, J. (2020). Monitoring land cover change on a rapidly urbanizing island using Google Earth Engine. *Applied Sciences*, 10(20), 7336. <https://doi.org/10.3390/app10207336>
- Liu, Q., Yu, F., & Mu, X. (2022). Evaluation of the Ecological Environment Quality of the Kuye River Source Basin Using the Remote Sensing Ecological Index. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12500. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912500>
- Mishra, S. P., Taraphder, S., Swain, D., & Laishram, M. (2017). Multivariate statistical data analysis-principal component analysis (PCA). *International Journal of Livestock Research*, 7(5), 60-78. <http://dx.doi.org/10.5455/ijlr.20170415115235>
- Sadeghi, A., Khaledi, J., & Nyman, P. (2018). Rainfall Variability and Land-Use Change in Arid Basins with Traditional Agricultural Practices; Insight from Ground Water Monitoring in Northwestern Iran. *Journal of Earth Science and Climatic Change*, 9(11), 2-7. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000498>
- Wang, S., Zhang, M., & Xi, X. (2022). Ecological Environment Evaluation Based on Remote Sensing Ecological Index: A Case Study in East China over the Past 20 Years. *Sustainability*, 14(23), 15771. <https://doi.org/10.3390/su142315771>
- Wu, A., Zhao, Y., Qin, Y., Liu, X., & Shen, H. (2023). Analysis of Ecological Environment Quality and Its Driving Factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China. *Sustainability*, 15(10), 7898. <https://doi.org/10.3390/su15107898>
- Xiong, Y., Xu, W., Lu, N., Huang, S., Wu, C., Wang, L., ... & Kou, W. (2021). Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China. *Ecological Indicators*, 125, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107518>
- Xu, H. Q. (2013). A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. *China Environmental Science*, 33(5), 889-897.
- Yang, Z., Tian, J., Su, W., Wu, J., Liu, J., Liu, W., & Guo, R. (2022). Analysis of ecological environmental quality change in the yellow river basin using the remote-sensing-based ecological index. *Sustainability*, 14(17), 10726. <https://doi.org/10.3390/su141710726>
- Zawadzki, J., Przeździecki, K., & Miatkowski, Z. (2016). Determining the area of influence of depression cone in the vicinity of lignite mine by means of triangle method and LANDSAT TM/ETM+ satellite images. *Journal of Environmental Management*, 166, 605-614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.010>
- Zhai, H., Xie, W., Li, S., & Zhang, Q. (2019). Urban Ecological Environment Construction Based on Remote Sensing Ecological Index. *Ekoloji Dergisi*, (108), 1583-1588.
- Zhang, Z., Cai, Z., Yang, J., & Guo, X. (2022). Ecological environmental quality assessment of Chinese estuarine wetlands during 2000–2020 based on a remote sensing ecological index. *Frontiers in Marine Science*, 9, 981139. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.981139>
- Zhu, D., Chen, T., Zhen, N., & Niu, R. (2020). Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15716-15728. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08054-2>