

Monitoring the Desertification Trend in the Areas Surrounding Lake Urmia (2000-2018)

Fatemeh Khodaei Gheshlagh¹, Shahram Roostaei^{2*}, Davood Mokhtari³

1- PhD Candidate in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Professor of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*Corresponding Author Email: roostaei@tabrizu.ac.ir)

3- Professor of Geomorphology University of Tabriz, Tabriz, Iran

Extended Abstract

Introduction

According to the First World Conference on Deserts and Desertification, desertification refers to the destruction and degradation of natural ecosystems in arid, semi-arid, and sub-humid arid regions, which results in lower biomass production and the emergence of soil erosion (Ekhtesasi et al., 2011). Desertification results from natural factors such as climate variables and anthropogenic activities (Binal et al, 2018; Claado et al, 2002) and its impact on ecological processes is enormous and complex. Therefore, counteracting desertification is necessary to maintain long-term soil fertility in arid areas of the world. The present study aimed at evaluating desertification trends in the areas surrounding Lake Urmia in the period from 2000 to 2018. The main objectives of this study were 1) identification of the most suitable spectral index pair of desertification in the study area during the study period, taking into account the statistical relations; 2) mapping the desertification risk for the study period and the assessment of desertification trend in the study area by using the spectral biophysical indices such as normalized difference vegetation index (NDVI), surface albedo, Tasseled cap along with three components of brightness, Wetness, and greenness, and 3) identifying the most important factor that caused desertification in the study area by using the logistic regression model.

Methodology

In the present study, first, three frames of Landsat 5 TM sensor and seven frames of Sentinel 2 images were downloaded and analyzed by ENVI5.3 and QGIS software for July 2000 and 2018. In the next step, spectral indices of desertification, including the normalized difference vegetation index (NDVI), surface albedo, Tasseled Cap (including three components of brightness coefficient, Wetness, and greenness) were extracted for the study period. Thereafter, using the statistical relations and the determination coefficient, the most suitable spectral index pair of desertification in the study area was identified. After the identification of suitable spectral index pairs, the selected spectral index pair was normalized and the desertification mapping was performed for the years 2000 and 2018 taking into account the obtained gradient by using the linear regression relation. Finally, by applying the statistical change detection method, changes in the class's risk were investigated and using the Logistic Regression model, the most effective factor in the occurrence of desertification was identified.

Discussion

The normalized difference vegetation index (NDVI), wetness, and greenness were considered as the independent variables and surface albedo and brightness coefficient as dependent variables. The pairs of NDVI-Albedo spectral indicators have a positive correlation, but two spectral index pairs of humidity-brightness coefficient and brightness coefficient-greenness due to having a negative correlation were selected as the desertification index pairs and then normalized in the next step through the relevant relations. After mapping the desertification risk according to the index pairs of brightness coefficient-greenness and humidity-brightness, the combined map of desertification was obtained using line slope from the normalized relationship of the selected index pair and overlay function for the years 2000 and 2018 in 5 classes of non-desertification, weak, moderate, severe, and relatively severe desertification risks. To verify the results, using the classification algorithm, the Maximum Likelihood Algorithm and the Error Matrix were obtained, and the algorithm, with the accuracy of 91.96 and the kappa coefficient of 0.95 for 2000, and accuracy of 91.25 and a kappa coefficient of 0.89 for 2018 indicated a good correlation between the obtained results and the real-world data.

Conclusion

The results of this study were as follows: A) The two spectral index pairs of humidity-brightness coefficient and brightness coefficient-greenness were selected as the most suitable desertification indices in the study area, and therefore, the desertification risk maps were obtained through using this spectral index pair, B) The classification algorithm showed the highest degree of similarity with the accuracy of 91.96 and the kappa coefficient of 0.95 for the maps of 2000, and accuracy of 91.25 and a kappa coefficient of 0.89 for the maps of 2018, which indicated a good correlation between the obtained results and the real-world data, C) According to the results of statistical change detection analysis method, the areas of severe, relatively severe, and moderate desertification risk classes were increasing from 2000 to 2018, D) The desertification risk maps of 2000 and 2018 showed that the lands on the eastern coast, and especially on the southeast of the Lake Urmia, and the areas at the marginal edge of Tabriz Plain, overlooking the Lake Urmia were more sensitive to the desertification risk, and showed more severe degradation, compared to those on the west coast of Lake Urmia, F) Indicators such as underground water electric conductivity, chlorine index of underground water, Sodium adsorption ratio, drought index, Percentage of vegetation, had a high impact on the occurrence of desertification.

Keywords: Desertification Monitoring, Lake Urmia, ENVI 5.3, Logistic Regression, Maximum Likelihood Algorithm.

References:

- Binal A., Christian, P. S., & Dhinwa, A. (2018). Long-term Monitoring and Assessment of Desertification Processes Using Medium and High Resolution Satellite Data. **Journal of Applied Geography**, 97, 10-24.
- Boali, A. H., Jafari, R., & Bashari, H. (2016). **Boali, A. H., Jafari, R., & Bashari, H. (2017).** Analyzing the Effect of Groundwater Quality on Desertification using Bayesian Belief Networks in Segzi Desertification Hotspot. **JWSS-Isfahan University of Technology**, 21(3), 205-218.
- Collado, A. D., Chuvieco, E., & Camarasa, A. (2002). Satellite Remote Sensing Analysis to Monitor Desertification Processes in the Crop-rangeland Boundary of Argentina. **Journal of Arid Environments**, 52(1), 121-133.
- Cui, G., Lee, W. K., Kwak, D. A., Choi, S., Park, T., & Lee, J. (2011). Desertification Monitoring by LANDSAT TM Satellite Imagery. **Journal of Forest Science and Technology**, 7(3), 110-116.
- Davri, S., Rashki, A. R., Akbari, M., Talebanfard, A.A. (2018). Monitoring of Spatio-Temporal Indices on Desertification in Arid Regions of South of Khorasan Razavi Province. **Journal of RS & GIS for Natural Resources**, (9)2, 17-30.
- Ekhtesasi, M. R., & Sepehr, A. (2011). **Methods and Models of Desertification Assessment and Mapping**. Yazd: Yazd University Press.
- Foody, G. M. (2002). Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. **Journal of Remote Sensing of Environment**, (80)1, 185-201.
- Hasheminasab, S. & Jafari, R. (2018). Evaluation of Land Use Changes to Desertification Monitoring Using Remote Sensing Techniques. **Journal of Spatial Analysis Environmental Hazard**, (5)3, 67-82.
- Jedari Eyvazi, J. (1982). Geomorphological Characters of Kabudan Desert. **Journal of Research of geography, University of Tehran**, 18, 1-27.
- Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K., & Dutta, D. (2014). Monitoring the Extent of Desertification Processes in Western Rajasthan (India) Using Geo-Information Science. **Journal of Arab Geoscience**, (8)8, 5727-5737.
- Lamqadem, A. A., Hafid, S., & Biswajeet, P. (2018). Quantitative Assessment of Desertification in an Arid, Oasis Using Remote Sensing Data and Spectral. **Journal of Remote Sensing**, 10, 1-18.
- Liangliang, J., Guli, J., Anming, B., Alishir, K., Hao, G., Guoxiong, Z., & Philippe De, M. (2019). Monitoring the Long-Term Desertification Process and Assessing the Relative Roles of Its Drivers in Central Asia. **Ecological Indicators**, 104(1), 195-208.
- Masoudi, M., Parviz, J., & Biswajeet, P. (2018). A New Approach for Land Degradation and Desertification Assessment Using Geospatial Techniques. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 18, 1133–1140.

- Rahimi, Hossein (2012), **Spatial-Spatial Modeling of Land Cover Changes by Combining Markov Chain Analysis, Artificial Neural Networks, and Automated Cells (Case Study: Eastern Part of Tabriz Plain)**. PhD Thesis, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz.
- Soltanian, M., & Halabian A. H. (2018). **Application of Remote Sensing in the Environmental Science (Method of satellite Processing in ENVI)**. Isfahan: University of Isfahan Press.
- Tavosi, T., Shojae, F., Akbari, E., & Asgari, E. (2016). Assessment of Land Use Change and Analysis Process Climate Desertification Wetland of Gavkhyny. **Geographical Space Journal**, (16)56, 79-94.
- Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., & Pan, J. (2009). Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale- A Case Study in the Ordos Plateau, China. **Journal of Sensors**, (9)3, 1738-1753.



پایش روند بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه (۲۰۰۰-۲۰۱۸)

فاطمه خدائی قشلاق، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

fatimekhodaie@gmail.com

شهرام روستایی*، استاد ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

roostaei@tabrizu.ac.ir

داود مختاری، استاد ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف پایش روند بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی انجام شده است. برای رسیدن به این هدف، نخست هفت فریم از تصاویر سنتینل-۲ مربوط به سال ۲۰۱۸ و سه فریم از تصاویر ماهواره لندست ۵ مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی با استفاده از نرم‌افزار QGIS و ENVI 5.3 پیش‌پردازش و پردازش، و شاخص‌های معرف بیابان‌زایی در قالب زوج شاخص‌های طیفی آلبدو - شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، میزان سبزی‌نگی - ضریب روشنایی و میزان رطوبت - ضریب روشنایی استخراج شد. در مرحله بعد روابط آماری موجود بین زوج شاخص‌های یادشده بررسی شد.

براساس نتایج حاصل، زوج شاخص‌های میزان سبزی‌نگی - ضریب روشنایی و میزان رطوبت - ضریب روشنایی، با کسب همبستگی منفی به‌منابۀ زوج شاخص‌های معرف بیابان‌زایی انتخاب و نقشه شدت خطر بیابان‌زایی بر مبنای آنها تهیه شد. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم بیشترین درجه شباهت به کار رفت. الگوریتم یادشده با کسب درجه صحت ۹۱/۹۶ و ضریب کاپای ۰/۹۵ برای سال ۲۰۰۰ میلادی، درجه صحت ۹۱/۲۵ و ضریب کاپای ۰/۸۹ در سال ۲۰۱۸ نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج کسب‌شده با واقعیت‌های زمینی است. برای پایش روند وقوع پدیده بیابان‌زایی، تغییر مساحت کلاس‌های خطر بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده بررسی شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مساحت کلاس‌های خطر شدید (۵/۰۱ درصد)، نسبتاً شدید (۱۱/۴۷ درصد) و متوسط (۶/۱۲ درصد) رشد مثبت و مساحت کلاس‌های خطر ضعیف (۹/۱۷ درصد) و بدون بیابان‌زایی (۱۳/۴۳ درصد) رشد منفی دارد؛ بنابراین روند افزایشی درصد مساحت کلاس‌های خطر شدید، نسبتاً شدید، متوسط و کاهش مساحت کلاس‌های خطر ضعیف و بدون خطر بیابان‌زایی نشان‌دهنده روند صعودی وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده است. معیار آب زیرزمینی، اقلیم و درصد پوشش گیاهی، مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده است.

واژه‌های کلیدی: پایش بیابان‌زایی، دریاچه ارومیه، سنتینل-۲، لندست-۵، الگوریتم بیشترین درجه شباهت

۱. مقدمه

براساس تعریف ارائه‌شده در نخستین کنفرانس جهانی بیابان و بیابان‌زایی^۱، پدیده بیابان‌زایی فرایند تخریب و انهدام اکوسیستم‌های طبیعی در مناطق خشک، نیمه‌خشک و خشک نیمه‌مرطوب است که کاهش تولید زیست‌توده و ظهور آثار تخریب خاک یا فرسایش را در پی دارد (اختصاصی و سپهر، ۱۳۹۰: ۱۴). بیابان‌زایی بر اثر عوامل طبیعی نظیر متغیرهای اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی می‌دهد (Binal et al., 2018: 10; Collado et al., 2002: 121) و تأثیر آن بر فرایندهای اکولوژیکی بسیار زیاد و پیچیده است؛ نظیر تأثیر منفی بر ویژگی‌های گیاهی (مانند بیومس، تراکم و مساحت اراضی زیر پوشش گیاهی)، کاهش و نقصان تنوع زیستی و باروری خاک و تغییر در الگوهای چشم‌اندازی نواحی خشک در مقیاس‌های مختلف جغرافیایی (Xu et al., 2009: 1738)؛ بنابراین مبارزه با بیابان‌زایی برای اطمینان از بهره‌وری طولانی‌مدت خاک و اراضی در مناطق خشک جهان ضروری است؛ از این رو ارزیابی و بررسی موجودیت مکانی وقوع پدیده بیابان‌زایی و نظارت بر آن، پیش‌نیاز اصلی تدوین راهبردهای مرتبط با کاهش آثار بیابان‌زایی و افزایش پایداری و مقاومت محیطی در برابر تهدید خطر تخریب زمین و بیابان‌زایی است (Binal et al., 2018: 11).

تاکنون پژوهشگران داخلی و خارجی مطالعات بسیاری درباره پایش روند و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع بیابان‌زایی انجام داده‌اند.

کلادو و همکاران^۲ (2002) با استفاده از تکنیک مقایسه تغییرات چندزمانه و دو شاخص تغییرات بارندگی و کاربری اراضی، روند بیابان‌زایی را در بخش مرکزی سن لویس^۳ آرژانتین بررسی کرده‌اند. در این پژوهش از دو تصویر متعلق به سال‌های ۱۹۸۲ و ۱۹۹۲ برای شناسایی اراضی با درجه خطر زیاد بیابان‌زایی و همچنین شناسایی تغییرات به وقوع پیوسته در مساحت کلاس‌های اراضی استفاده شد.

کوی و همکاران^۴ (2011) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و بررسی تغییرات دو شاخص پوشش گیاهی و خاک، روند بیابان‌زایی را طی ۱۰ سال اخیر در صحرای گبی چین ارزیابی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که گسترش بیابان‌زایی به‌طور واضحی در منطقه شرق صحرای گبی و اراضی کشاورزی مجاور آن مشاهده می‌شود.

کوندو و همکاران^۵ (2014) از تصاویر TM ماهواره لندست ۵ و ۷ مربوط به سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۹۵-۱۹۹۹ میلادی و تصاویر ETM لندست ۷ مربوط به سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۹ میلادی برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و اراضی بایر براساس روش ترکیب طیفی خطی^۶ در غرب ایالت راجستان^۷ هند استفاده کرده‌اند. نتایج حاکی از کاهش پوشش گیاهی در بعضی نواحی و افزایش اراضی بایر به نفع بیابان‌زایی است.

1. United Nation Conference on Combating Desertification (UNCCD)
2. Collado et al.
3. San Luis Province
4. Cui et al.
5. Kundu, A. Patel, N. Saha, S. Dutta, D
6. linear spectral unmixing (LSU) method
7. Rajasthan

لیانگلیانگ و همکاران^۱ (2019) با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی روند بیابان‌زایی را در خلال سال‌های ۱۹۸۲-۲۰۱۲ در منطقه آسیای مرکزی بررسی کرده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، متغیرهای اقلیم نظیر کاهش بارندگی، افزایش دما، خشکسالی و عوامل انسانی، مهم‌ترین عوامل ماشه‌ای بیابان‌زایی در کلاس‌های مختلف کاربری اراضی در محدوده مطالعه شده است.

هاشمی‌نسب و جعفری (۱۳۹۷) تغییرات ۲۷ ساله کاربری اراضی را در گسترش روند بیابانی شدن اراضی در منطقه شرق اصفهان و اراضی کشاورزی زاینده‌رود بررسی کرده‌اند. پژوهش یادشده با به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور و با استفاده از تصاویر سنجنده‌های TM و ETM⁺ لندست ۵ و ۷ و ۸ انجام شده است. نتایج نشان داد در دوره زمانی ۲۷ ساله، حاشیه زاینده‌رود تغییرات چشمگیری داشته است؛ به‌طوری که ۸۶/۴۳ درصد حاشیه رودخانه به دلیل گسترش فعالیت‌های کشاورزی در حریم رودخانه و خشک شدن رودخانه تخریب شده است.

طاووسی و همکاران (۱۳۹۵) تغییرات کاربری اراضی و تحلیل روند بیابانی شدن اراضی را با استفاده از دو عنصر اقلیمی دما و بارش در چاله گاوخونی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره لندست ۵ سنجنده TM مربوط به سال ۱۹۹۰ و تصاویر سنجنده ETM طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴ شناسایی کرده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده به دلیل تخریب تالاب، پدیده‌های مرتبط با آن مانند تنوع و تراکم پوشش گیاهی و مساحت بخش آبگیر کاهش یافته است؛ از سوی دیگر روند افزایشی مؤلفه‌های تبخیر-تعرق و دما، شرایط بیابان‌زایی را در محدوده مطالعه شده تشدید کرده است.

داوری و همکاران (۱۳۹۷) برای پایش تغییرات زمانی-مکانی شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی مناطق خشک جنوب خراسان رضوی با استفاده از مدل IMDPA^۲ اقدام کرده‌اند. داده‌های اولیه پژوهش شامل پارامترهای اقلیمی، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، آب‌های زیرزمینی و سطحی، کشاورزی و اطلاعات اقتصادی-اجتماعی است. نتایج ارزیابی شدت خطر بیابان‌زایی نشان داد مساحت مناطق واقع در دو کلاس متوسط و شدید به ترتیب به مقدار ۲۲ و ۷۷ درصد از کل مساحت محدوده مطالعه شده است.

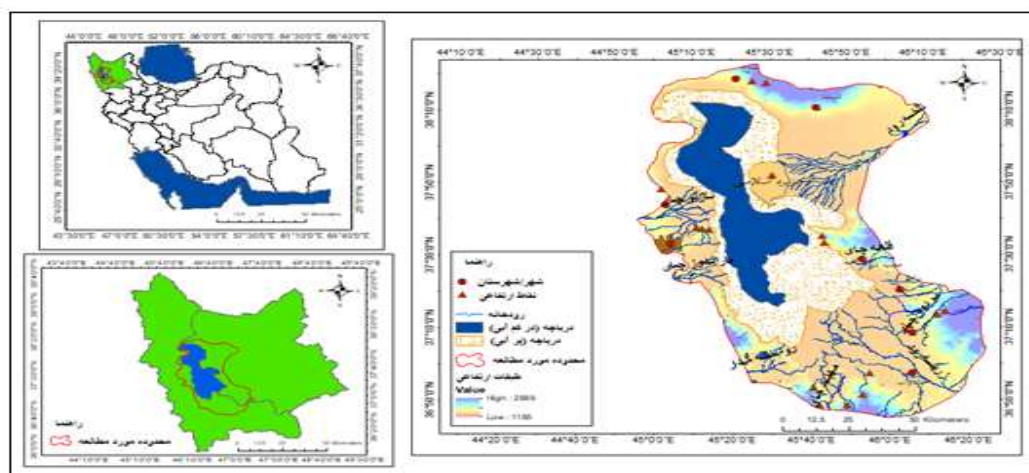
پژوهش حاضر با رویکرد ارزیابی روند وقوع بیابانی شدن اراضی و شناسایی عوامل مؤثر در وقوع آن، در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی انجام شده است. مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر بررسی روابط آماری موجود بین شاخص‌های طیفی مطالعه شده (پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده^۳، آلبدوی سطح زمین^۴، تسلدکپ به همراه سه مؤلفه ضریب روشنایی^۵، میزان رطوبت^۶ و میزان سبزی‌نگی^۷)، شناسایی بهترین زوج شاخص طیفی معرف بیابان‌زایی، تهیه نقشه خطر وقوع بیابان‌زایی برای سال‌های بررسی شده، ارزیابی روند وقوع پدیده بیابان‌زایی و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه شده است.

1. Liangliang et al.
2. Iranian Model of Desertification Potential Assessment
3. Normalized Different Vegetation Index
4. Albedo
5. Brightness (TCT)
6. Wetness (TCT)
7. Greenness (TCT)

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه پژوهش

محدوده پژوهش بخشی از حوضه آبریز ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی است و مساحتی معادل ۱۴۳۹۵ کیلومتر مربع دارد. پیوسته کوهستان به دشت مشخص‌کننده مرزهای محدوده است. دریاچه ارومیه، مهم‌ترین پیکره آبی محدوده پژوهش است؛ در حالی که دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه میشوداغ مشخص‌کننده مرز شمالی محدوده است، در سمت شرق آن رشته‌کوههایی با روند شمالی- جنوبی واقع شده‌اند که به دشت‌های آبرفتی و پست سواحل شرقی دریاچه ارومیه محدود می‌شوند. رودخانه‌های آجی‌چای، قلعه‌چای، صوفی‌چای، بهنق‌چای، مردوق‌چای، مردی‌چای، چرچر، گدار، باراندوزچای، شهرچای، قره‌چی، ازبک‌چای، نازلوچای، زرينه‌رود، سیمینه‌رود و مه‌بادچای، شاخص‌ترین رودخانه‌های محدوده پژوهش هستند. شکل ۱ نشان‌دهنده موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش (ترسیم: نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 1. Geographical location of the study area (Source: Authors, 2019)

۲.۲. روش‌های استفاده‌شده

۲.۲.۱. استخراج شاخص‌های طیفی

شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌سازی‌شده: این شاخص، یکی از روش‌های متداول برای استخراج پوشش گیاهی است (Maharani et al., 2013: 4; Masoudi et al., 2017: 1135). ارزش (NDVI) بین ۱- (بدنه‌های آبی) و ۱+ (مناطق دارای پوشش گیاهی بسیار متراکم) تغییر می‌یابد و براساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad \text{رابطه ۱}$$

R و NIR = باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۵.

آلبدو: به منظور محاسبه میزان آلبدو برای داده‌های سنتینل-۲ از فرمول لینگوس^۱ (رابطه ۲: Naegeli et al., 2017:

8) و برای تصاویر ماهواره لندست ۵ سنجنده TM از الگوریتم سبال استفاده شد.

1. Liang's formula

$$\text{Albedo } (\hat{\alpha}) = [(0.356 \times b_2) + (0.130 \times b_4) + (0.373 \times b_8) + (0.85 \times b_{11}) + (0.072 \times b_{12}) - 0.018] / 1.016 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$b_1, b_2, b_3, \dots = \text{باند‌های یک تا سیزده ماهواره سنتینل-۲}$$

تبدیلات تسلدکپ

تبدیل تسلدکپ سه شاخص موضوعی دارد؛ درجه روشنایی، میزان سبزی‌نگی و میزان نمناکی. درجه روشنایی نشان‌دهنده خاک‌های روشن یا اراضی بایر و نبود پوشش گیاهی، میزان سبزی‌نگی نشان‌دهنده انواع مختلف و میزان‌های مختلف تراکم پوشش گیاهی و میزان نمناکی نشان‌دهنده میزان رطوبت خاک است. تبدیلات تسلدکپ برای تصاویر لندست ۵ با استفاده از الگوریتم موجود در نرم‌افزار ENVI 5.3 صورت می‌پذیرد؛ ولی در سنتینل-۲ به ضرایب باندهای خاصی نیاز دارد. جدول ۱ نشان‌دهنده ضرایب استفاده‌شده در مطالعه حاضر برای استخراج تسلدکپ از تصاویر چندطیفی سنتینل-۲ است.

جدول ۱. ضرایب باندهای سیزده‌گانه سنتینل-۲ برای محاسبه تسلدکپ (Lamqadem, 2018: 6)

Table 1. Coefficients of the transformation of Sentinel-2MSI image to tasseled cap transformation (TCT); (Lamqadem, 2018: 6)

شاخص	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
روشنایی	۰/۰۳۵۶	۰/۰۸۲۲	۰/۱۳۶۰	۰/۲۶۱۱	۰/۲۹۶۶	۰/۳۳۳۸	۰/۳۸۷۷
سبزی‌نگی	-۰/۰۳۶۵	-۰/۱۱۲۸	-۰/۱۶۸۰	-۰/۳۴۸۰	-۰/۳۳۰۳	۰/۰۸۵۲	۰/۳۳۰۲
رطوبت	۰/۰۶۴۹	۰/۱۳۶۳	۰/۲۸۲۰	۰/۳۰۷۲	۰/۵۲۸۸	۰/۱۳۷۹	-۰/۰۰۰۱
شاخص	باند ۸	باند ۸ (A)	باند ۹	باند ۱۰	باند ۱۱	باند ۱۲	
روشنایی	۰/۴۷۵۰	۰/۳۸۹۵	۰/۹۴۹	۰/۰۰۰۹	۰/۳۸۸۲	۰/۱۳۶۶	
سبزی‌نگی	۰/۳۶۲۵	۰/۳۱۶۵	۰/۰۴۶۷	-۰/۰۰۰۹	-۰/۴۵۷۸	-۰/۴۰۶۴	
رطوبت	-۰/۱۳۸۹	-۰/۰۸۰۷	-۰/۰۳۰۲	۰/۰۰۰۳	-۰/۴۰۶۴	-۰/۵۶۰۲	

۲.۲.۲. مدل رگرسیون لجستیک

مدل رگرسیون لجستیک، یکی از روش‌های آماری پیش‌بینی‌کننده دوجزئی برای متغیرهای وابسته دارای ماهیت باینری است. حالت محتمل چنین متغیرهایی در دو حالت صفر و یک (وقوع و عدم وقوع) محدود می‌شود. روش رگرسیون لجستیک برای تشریح رابطه غیرخطی موجود میان یک یا چند متغیر مستقل با یک متغیر وابسته باینری به کار می‌رود. رگرسیون لجستیک از روال برآوردکننده حداکثر احتمال (MLE) برای یافتن بهترین برازش مجموعه پارامترها (ضرایب) بهره می‌گیرد (رحیمی، ۱۳۹۱: ۲۳). تابع حداکثر احتمالی که با رگرسیون لجستیک استفاده می‌شود، به شکل رابطه زیر است:

$$L = \prod_{i=1}^N \mu_i^{y_i} \times (1-\mu_i)^{(1-y_i)} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه L : احتمال و μ_i : مقدار پیش‌بینی‌کننده متغیر وابسته برای نمونه i است؛ به گونه‌ای که این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_i = \exp(\sum_{K=0}^K b_K X_{iK}) / (1 + \exp(\sum_{K=0}^K b_K X_{iK})) \quad \text{رابطه ۴}$$

Y_i : بیان‌کننده مقدار مشاهده متغیر وابسته برای نمونه i است.

در پژوهش حاضر، نگارندگان طی مراحل زیر وقوع پدیده بیابان‌زایی و شناسایی عوامل مؤثر در وقوع این پدیده را بررسی کرده‌اند.

مرحله اول: سه فریم از تصاویر ماهواره لندست ۵ سنجنده TM و هفت فریم از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ متعلق به ماه جولای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ تهیه و با استفاده از دو نرم‌افزار ENVI5.3 و کواتوم جی‌آی‌اس^۱ پیش‌پردازش شد. در این ماه از سال پوشش گیاهی طبیعی و فصلی در حداقل میزان خود است و از سوی دیگر تمام محصولات زراعی نیز برداشت می‌شوند (Lamqadem et al., 2018: 4).

مرحله دوم: شاخص‌های طیفی معرف بیابان‌زایی شامل پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، آلبدوی سطحی و تسلدکپ (شامل سه مؤلفه ضریب روشنایی، میزان سبزی‌نگی و میزان نمناکی) برای سال‌های مطالعه شده استخراج شد. در زمینه پایش وقوع بیابان‌زایی به دلیل استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، میزان سبزی‌نگی و میزان نمناکی به مثابه متغیرهای مستقل و شاخص میزان روشنایی و آلبدوی سطحی به مثابه متغیرهای وابسته تعیین می‌شوند.

مرحله سوم: در مرحله سوم و در زمینه پایش روند وقوع بیابان‌زایی، براساس مطالعات پیشین شاخص‌های طیفی به صورت متغیرهای مستقل و وابسته تعریف و پس از بررسی روابط آماری موجود بین زوج شاخص‌های طیفی با استفاده از نرم‌افزار SAGA_GIS و SPSS اقدام به شناسایی بهترین زوج شاخص‌های طیفی معرف بیابان‌زایی در محدوده پژوهش شد. پس از شناسایی زوج شاخص‌های طیفی مناسب، نرمال‌سازی زوج شاخص‌های طیفی منتخب انجام و مقدار شیب رابطه رگرسیون خطی محاسبه شد.

مرحله چهارم: با استفاده از مقدار شیب روابط خطی موجود در میان زوج شاخص‌های طیفی نرمال‌شده، نقشه بیابان‌زایی برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ تهیه شد.

مرحله پنجم: در این مرحله با استفاده از نقاط کنترل مستخرج از Google-Earth صحت نقشه‌های خطر بیابان‌زایی بررسی شد.

مرحله ششم: در مرحله ششم با استفاده از روش آشکارسازی تغییرات آماری، تغییرات به وقوع پیوسته در مساحت کلاس‌های خطر بررسی و روند وقوع خطر بیابان‌زایی پایش شد.

مرحله هفتم: در مرحله هفتم (مرحله شناسایی)، مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع بیابان‌زایی براساس مطالعات صورت پذیرفته درباره پدیده بیابان‌زایی برمبنای ویژگی‌های طبیعی محدوده پژوهش تهیه و با استفاده از اجرای مدل رگرسیون لجستیک، یک مدل منطقه‌ای ایجاد و مهم‌ترین این عوامل شناسایی شد. در این بخش و با توجه به ماهیت این مرحله از پژوهش، معیارهایی نظیر اقلیم، پوشش گیاهی، آب‌های زیرزمینی، خاک، کاربری اراضی و فرسایش

بادی و شاخص‌های مربوط به هر معیار به‌مثابه متغیر مستقل، و پهنه‌های بیابانی شناسایی شده در مرحله پایش روند بیابانزایی به‌مثابه متغیر وابسته مطرح شد. شکل ۲ نشان‌دهنده مراحل پژوهش حاضر است.



شکل ۲. فلوچارت انجام مراحل پژوهش (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 2. Flowchart of research steps (Authors, 2019)

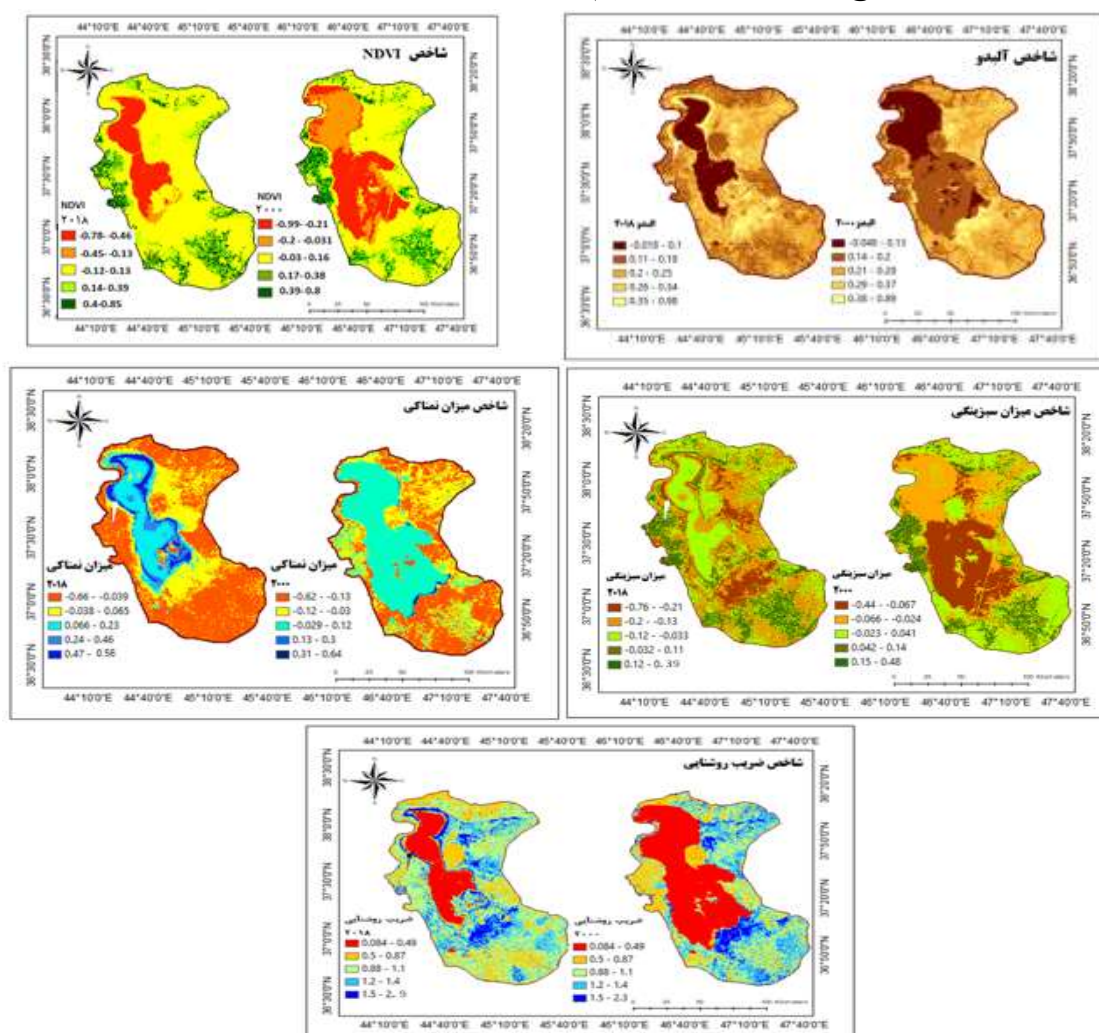
۳. یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

۳.۱. بررسی شاخص‌های طیفی معرف بیابانزایی در محدوده پژوهش

براساس نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین درباره بررسی روند بیابانزایی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، میزان نمناکی و میزان سبزیگی به‌مثابه متغیرهای مستقل و آلدوی سطحی و ضریب روشنایی به‌مثابه متغیرهای وابسته در نظر گرفته می‌شود. میزان آلدوی سطحی با کاهش پوشش گیاهی افزایش می‌یابد؛ به بیانی افزایش یا کاهش میزان آلدوی سطحی، تابعی از افزایش یا کاهش میزان پوشش گیاهی است. تغییر در میزان آلدو بر میزان بازتابش سطحی تأثیر می‌گذارد و سبب تغییر در دمای سطح زمین می‌شود. آشکار است تغییر در دمای سطح زمین به از دست رفتن میزان رطوبت بیشتر از سطح زمین منجر می‌شود (lamqadem et al., 2018: 6).

کاهش در میزان رطوبت خاک به معنی کاهش میزان آب در دسترس گیاه است. کاهش میزان سبزیگی خاک با

میزان ضریب روشنایی خاک رابطه عکس دارد؛ به بیانی خاک‌های با ضریب روشنایی بیشتر، میزان سبزیگی کمتری دارند؛ زیرا این نوع خاک‌ها عموماً خاک‌های بایر و فاقد توان بیولوژیکی هستند؛ بنابراین روند کاهشی در متغیرهای مستقل و پیرو آن روند افزایشی در متغیرهای وابسته نشان از وقوع پدیده بیابان‌زایی دارد. در محدوده پژوهش میزان پوشش گیاهی، میزان نمناکی و میزان سبزیگی در بازه زمانی مدنظر (۲۰۰۰-۲۰۱۸ م) کاهش و میزان آلودگی و ضریب روشنایی افزایش یافته است؛ به بیان دیگر بر وسعت نواحی دارای ضریب روشنایی یا میزان آلودگی سطحی بیشتر افزوده شده است؛ بدین ترتیب در مطالعات مرتبط با بیابان‌زایی که با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور انجام می‌پذیرد، با استفاده از تکنیک‌های آماری رابطه منفی موجود در بین آنها بررسی و زوج شاخص طیفی دارای همبستگی منفی (یعنی کاهش متغیر مستقل به افزایش مقدار متغیر وابسته می‌انجامد) به مثابه زوج شاخص معرف بیابان‌زایی انتخاب و نقشه بیابان‌زایی در محدوده پژوهش براساس آن زوج شاخص طیفی تهیه می‌شود. در پژوهش حاضر نیز ابتدا برای استخراج شاخص‌های طیفی اقدام شد (شکل ۳).

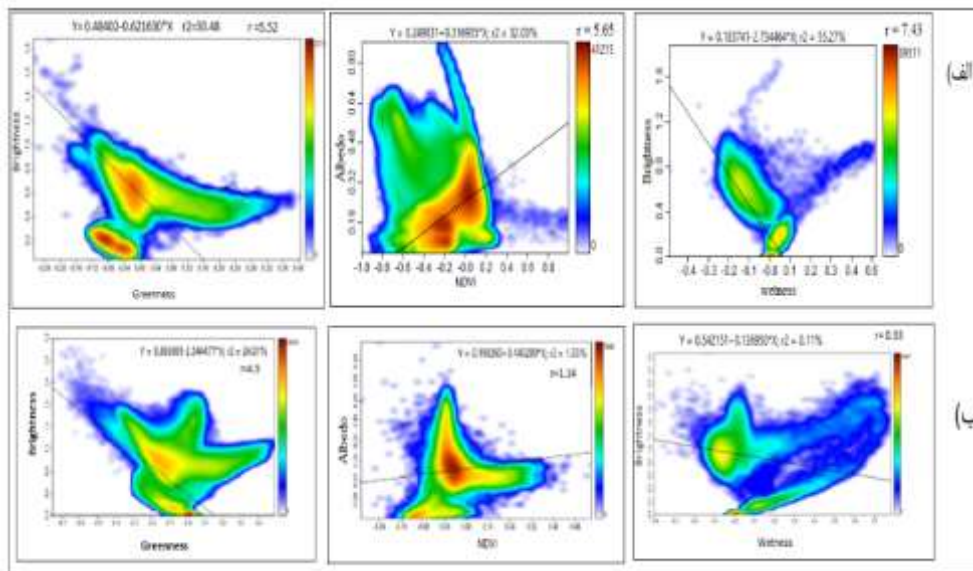


شکل ۳. شاخص‌های طیفی استفاده‌شده در پژوهش حاضر (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 3. Spectral indicators used in the present study (Authors, 2019)

۳.۲. بررسی روابط آماری موجود در بین شاخص‌های طیفی مطالعه‌شده

پس از استخراج شاخص‌های طیفی، روابط آماری موجود در بین متغیرهای مستقل و وابسته بررسی شد. شکل ۴ نشان‌دهنده اسکاتریپلات‌های به‌دست‌آمده در این مرحله است. براساس نمودارهای نشان داده شده در شکل ۴ و روابط خطی یادشده در جدول ۲، زوج شاخص‌های میزان سبزی‌نگی - ضریب روشنایی و میزان نمناکی - ضریب روشنایی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ م همبستگی منفی دارند و زوج شاخص آلبدو - پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده به دلیل داشتن رابطه رگرسیونی مثبت معرف خوبی برای بیابان‌زایی در محدوده پژوهش نیست.



شکل ۴. اسکاتریپلات‌های به‌دست‌آمده از به‌کارگیری الحاقیه SAGAGIS (الف: سال ۲۰۰۰ - ب: سال ۲۰۱۸):

(نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 4. Scatter plots obtained from the use of the SAGA-GIS (A: 2000 - B: 2018); (Authors, 2019)

جدول ۲. روابط خطی به‌دست‌آمده میان متغیرهای مستقل و وابسته (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Table 2. Linear relationships obtained between independent and dependent variables (Authors, 2019)

سال آماری	زوج شاخص	رابطه رگرسیون خطی
۲۰۰۰ م (۱۳۹۷)	Brightness-Greenness	$Y = 0.48 - 0.62X$
	Brightness-Wetness	$Y = 0.18 - 2.73X$
	Albedo-NDVI	$Y = 0.24 + 0.13X$
۲۰۱۸ م (۱۳۹۷)	Brightness-Greenness	$Y = 0.39 - 2.05X$
	Brightness-Wetness	$Y = 0.54 - 0.13X$
	Albedo-NDVI	$Y = 0.19 + 0.14X$

پس از انتخاب زوج شاخص‌های طیفی معرف بیابان‌زایی (زوج شاخص‌های دارای همبستگی منفی)، نرمال‌سازی زوج شاخص‌های یادشده براساس جدول ۳ انجام شد. در مرحله بعد و با استفاده از شیب خط به‌دست‌آمده از رابطه نرمال‌سازی‌شده زوج شاخص‌های منتخب (جدول ۵) و تابع Over layer در نرم‌افزار ArcGIS 10.6، نقشه تلفیقی بیابان‌زایی در ۵ کلاس بدون خطر بیابان‌زایی، ضعیف، متوسط، شدید و نسبتاً شدید تهیه شد (شکل ۶).

جدول ۳. روابط استفاده‌شده برای نرمال‌سازی زوج شاخص‌های طیفی منتخب (Lamqadem et al., 2018: 9)

Table 3. Relationships used to normalize the pair of selected spectral indices (Lamqadem et al., 2018: 9)

$TCW_{normalized} = (TCW - TCW_{min}) / (TCW_{min} + TCW_{max}) \times 100$	رابطه ۵
$TCB_{normalized} = (TCB - TCB_{min}) / (TCB_{min} + TCB_{max}) \times 100$	رابطه ۶
$TCG_{normalized} = (TCG - TCG_{min}) / (TCG_{min} + TCG_{max}) \times 100$	رابطه ۷

جدول ۴. معادلات رگرسیونی به‌دست‌آمده پس از نرمال‌سازی (نویسندگان، ۱۳۹۸)

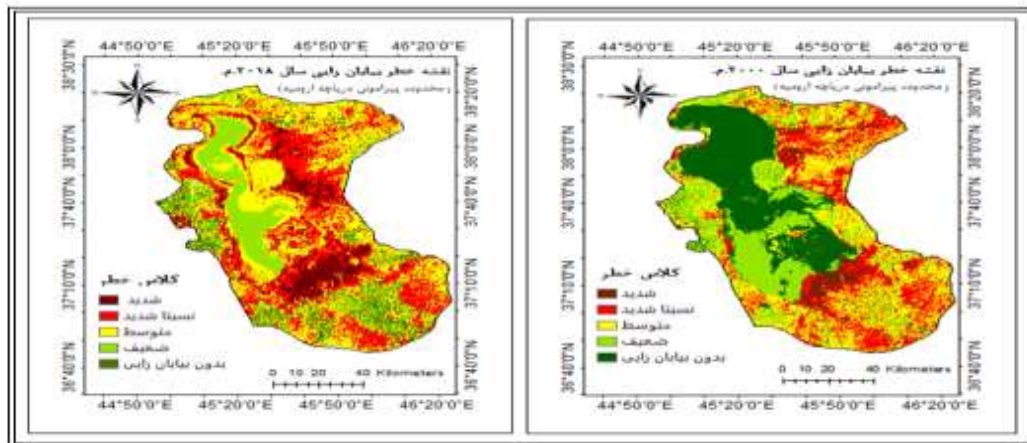
Table 4. Regression equations obtained after normalization (Authors, 2019)

سال آماری	زوج شاخص	رابطه رگرسیونی
۲۰۰۰	Brightness-Greenness	$-۰/۱۴X - ۳۹/۲۸$
	Brightness-Wetness	$-۱/۴۳X + ۶۲/۱۶$
۲۰۱۸	Brightness-Greenness	$-۰/۰۶X - ۵۰/۸۸$
	Brightness-Wetness	$-۰/۷۵X + ۷۲/۸۲$

جدول ۵. ضرایب استفاده‌شده در تهیه نقشه شدت بیابان‌زایی (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Table 5. Coefficients used in preparing the intensity map of desertification (Authors, 2019)

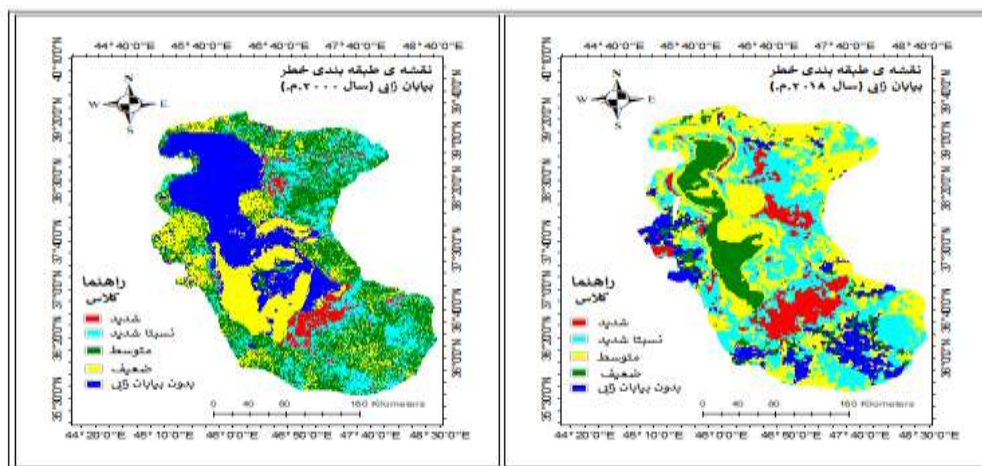
سال آماری	شیب به‌دست‌آمده از برقراری رابطه رگرسیونی	فرمول	شماره رابطه
۲۰۰۰	$۱ \div (-۱/۴۳) = -۰/۶۹$	$DDI = a \times TCW - TCB$ = نقشه میزان رطوبت = TCW = نقشه ضریب روشنایی = TCB = A شیب حاصل از برقراری رابطه خطی	(۸)
۲۰۰۰	$۱ \div -۰/۱۴ = -۷/۱۴$	$DDI = a \times TCG - TCB$ = نقشه ضریب روشنایی = TCB = نقشه میزان سبزیگی = TCG = A شیب حاصل از برقراری رابطه خطی	(۹)



شکل ۵. نقشه خطر بیابان‌زایی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ میلادی (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 5. Desertification risk map of 2000 and 2018 (Authors, 2019)

در مرحله بعد صحت نتایج و به بیانی اعتبار و صحت نقشه‌های خطر بیابان‌زایی برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ م با الگوریتم بیشترین درجه شباهت^۱ بررسی شد. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار ENVI5.3 نمونه‌های مطالعاتی در قالب ROI^۲ ایجاد شد؛ در ادامه با استفاده از Google- Earth نقاط کنترل زمینی برای سال‌های آماری ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ میلادی تهیه شد؛ سپس با استفاده از ابزار ماتریس خطا^۳ درجه صحت نتایج به دست آمده ارزیابی شد (شکل ۶). صحت طبقه‌بندی معمولاً برای بررسی میزان تطابق نقشه طبقه‌بندی به دست آمده با واقعیت به کار گرفته و خطای طبقه‌بندی به صورت تناقضات و اختلافات موجود بین وضعیت به تصویر کشیده شده در نقشه موضوعی و واقعیت زمینی تعریف می‌شود (Foody, 2002: 186). کسب درجه صحت ۹۱/۲۵ و ضریب کاپای ۰/۸۹ برای نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۸ میلادی نشان از انطباق خوب و مناسب نتایج به دست آمده با واقعیت‌های زمینی دارد.



شکل ۶. نقشه‌های طبقه‌بندی حاصل از به کارگیری الگوریتم بیشترین درجه شباهت (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 6. Classification maps resulting from the use of the Maximum likelihood algorithm (Authors, 2019)

1. Maximum Likelihood
2. Region of Interest
3. Confusion Matrix using Ground Truth ROI

۳.۳. پایش روند بیابان‌زایی

به‌منظور پایش روند بیابان‌زایی در محدوده مدنظر و ارزیابی میزان تغییرات به وقوع پیوسته در آن در خلال سال‌های آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی، از الگوریتم کشف تغییرات آماری^۱ در نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. جدول ۶ نشان‌دهنده میزان تغییرات به وقوع پیوسته در میزان مساحت به درصد و کیلومترمربع است. براساس نتایج، مساحت کلاس خطر شدید از ۷۰۴ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ میلادی به ۱۴۲۵ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۸ میلادی افزایش یافته است؛ علاوه بر آن مساحت کلاس خطر نسبتاً شدید از ۲۷۵۴ کیلومترمربع به ۴۴۰۵ کیلومترمربع و مساحت کلاس خطر متوسط از ۴۵۱۶ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ میلادی به ۵۳۹۴ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۸ روند افزایشی داشته است. به‌موازات افزایش مساحت کلاس‌های یادشده، دو کلاس خطر ضعیف و کلاس بدون خطر بیابان‌زایی روند نزولی داشته و به بیانی نشان‌دهنده کاهش مساحت اراضی است که در سال ۲۰۰۰ میلادی جزو مناطق بدون خطر یا دارای خطر ضعیف از منظر وقوع پدیده بیابان‌زایی بوده است.

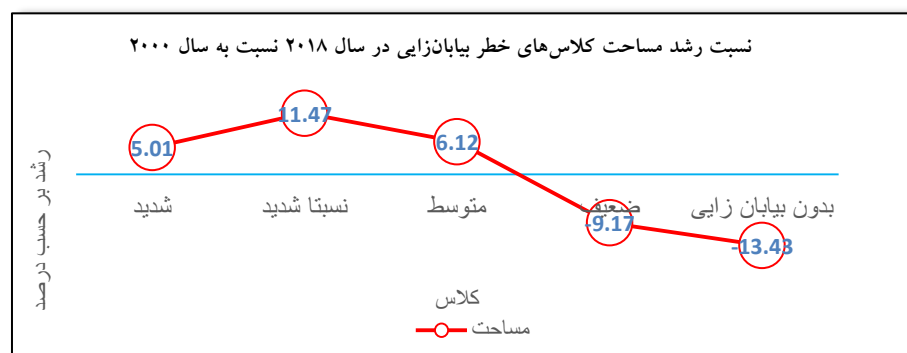
جدول ۶. تغییر مساحت کلاس‌های خطر بیابان‌زایی از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۸ م (مساحت به کیلومترمربع)؛

(نویسندگان، ۱۳۹۸)

Table 6. Change in the area of desertification risk classes from 2000 to 2018. (Area in square kilometers); (Authors, 2019)

کلاس	سال ۲۰۰۰ م		سال ۲۰۱۸ م	
	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت
شدید	۷۰۴	۴/۸۸	۱۴۲۵	۹/۸۹
نسبتاً شدید	۲۷۵۴	۱۹/۱۳	۴۴۰۵	۳۰/۶۰
متوسط	۴۵۱۶	۳۱/۳۶	۵۳۹۴	۳۷/۴۸
ضعیف	۳۱۰۹	۲۱/۵۹	۱۷۸۹	۱۲/۴۲
بدون بیابان‌زایی	۳۳۱۲	۲۳/۰۴	۱۳۸۲	۹/۶۱

برای ارزیابی روند صعودی یا نزولی بودن وقوع پدیده بیابان‌زایی در محدوده پژوهش، افزایش یا کاهش مساحت کلاس‌های خطر بیابان‌زایی بررسی شد. شکل ۷، نمودار تغییرات به وقوع پیوسته در کلاس‌های خطر را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار رشد مساحت کلاس‌های خطر در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۲۰۰۰ م (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 7. Growth Chart of the risk class area in 2018 compared to 2000 (Authors, 2019)

این نمودار نشان از ۵/۰۱ درصد افزایش در مساحت کلاس خطر شدید، ۱۱/۴۷ درصد افزایش در مساحت کلاس نسبتاً شدید و ۶/۱۲ درصد افزایش در مساحت کلاس متوسط دارد. علاوه بر مطالب بیان شده، با بررسی درصد مساحت کلاس های خطر ضعیف و بدون بیابانزایی به روند کاهش مساحت کلاس های یادشده برابر با ۹/۱۷ درصد برای کلاس خطر ضعیف و ۱۳/۴۳ درصد برای کلاس خطر بدون بیابانزایی پی برده می شود؛ بنابراین روند افزایشی درصد مساحت کلاس های خطر شدید، نسبتاً شدید، متوسط و روند کاهش مساحت مناطق واقع در کلاس های خطر ضعیف یا بدون خطر بیابانزایی به نفع وقوع پدیده بیابانزایی تفسیر می شود؛ زیرا روند کاهش مساحت کلاس های خطر بدون بیابانزایی و متوسط نشان دهنده افزایش وسعت اراضی است که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی وضعیت رو به نقصانی را پشت سر گذاشته و خطر بیابانزایی در آنها با شدت بیشتری افزایش یافته است؛ از سوی دیگر افزایش مساحت کلاس های خطر شدید، نسبتاً شدید و متوسط به شکل آشکاری نشان از وضعیت رو به افول اراضی تحت اشغال دارد.

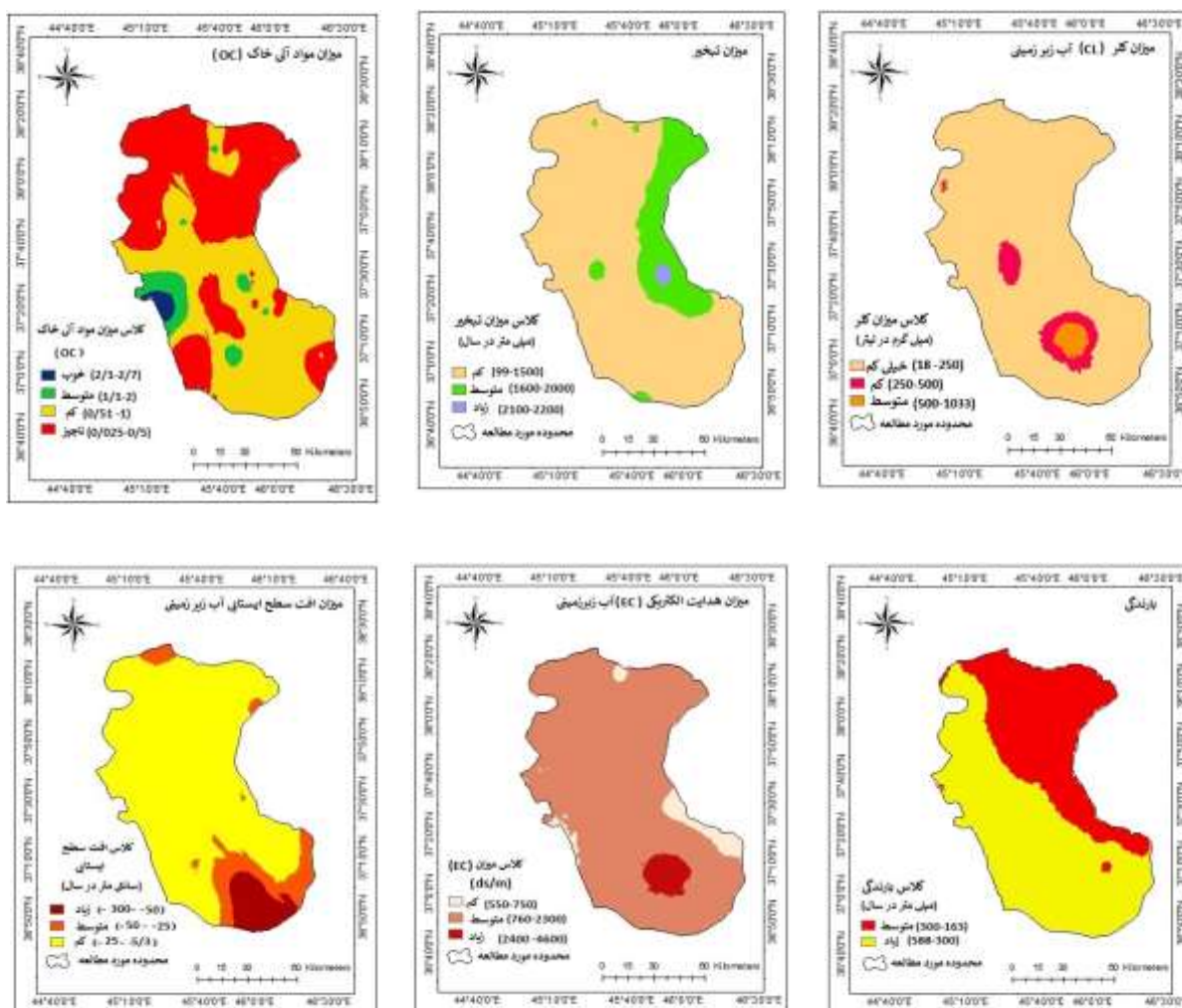
۴.۳. بررسی علل وقوع بیابانزایی در محدوده پژوهش

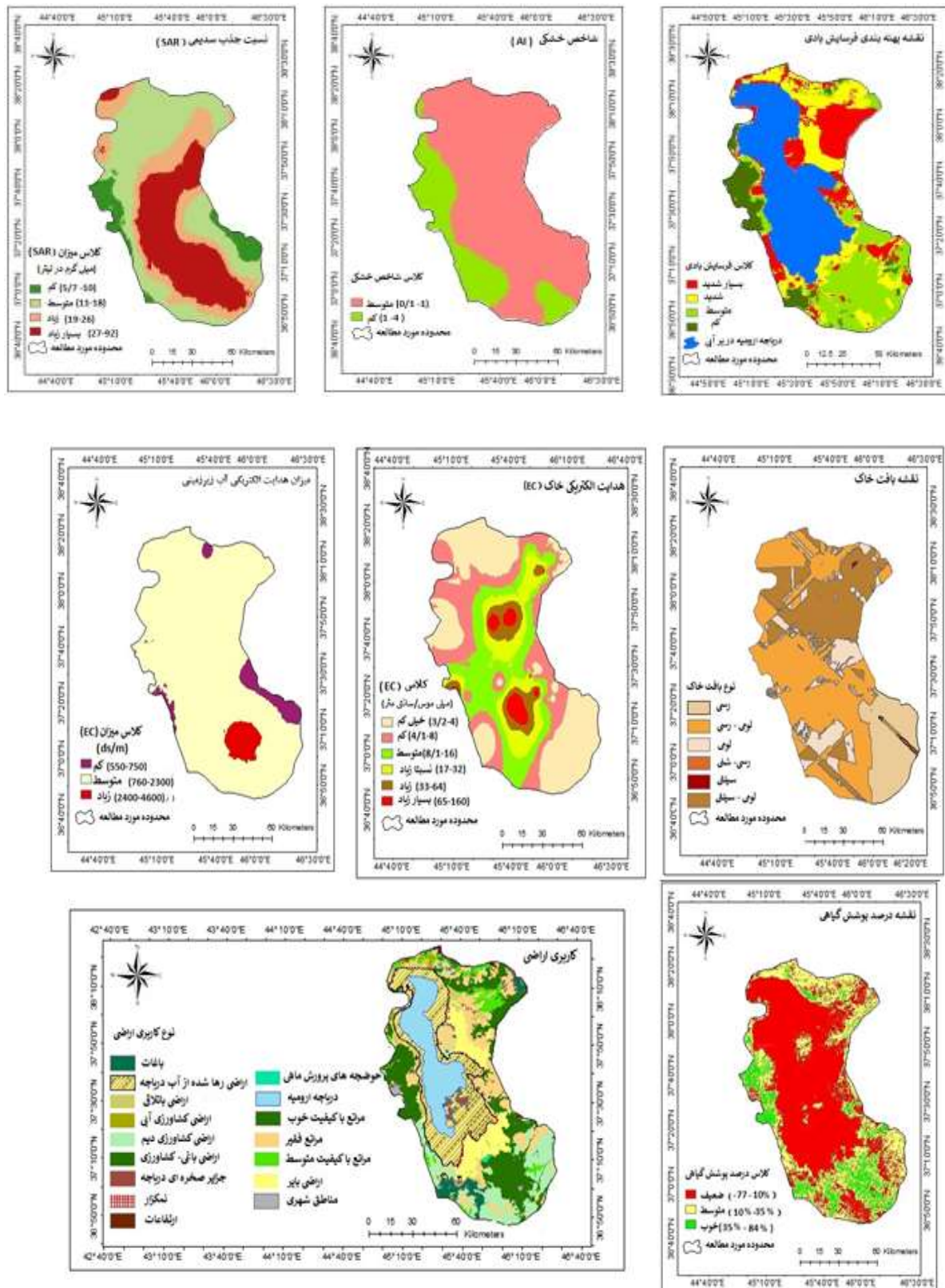
با مقایسه نقشه های خطر بیابانزایی و پیرو آن نقشه های طبقه بندی به دست آمده برای سال های ۲۰۰۰ (۱۳۷۹) و ۲۰۱۸ م (۱۳۹۷) و پس از بررسی نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم کشف تغییرات آماری در زمینه روند وقوع بیابانزایی به صعودی بودن آن طی بازه زمانی مدنظر (۱۸ساله) پی برده می شود. با توجه به شاخص های طیفی منتخب برای تهیه نقشه خطر بیابانزایی، مناطقی که کمترین میزان سبزیگی را دارند به مثابه مناطق کلاس خطر شدید و نسبتاً شدید شناسایی شده اند. این نواحی کمترین میزان نمناکی و خاک آنها بیشترین درجه روشنایی را دارد و در زمرة خاک های بایر است. براساس نتایج، نیمه شرقی محدوده پژوهش به ویژه اراضی واقع در شمال شرق و جنوب شرق دریاچه ارومیه بیش از نیمه غربی از وقوع پدیده بیابانزایی متأثر شده است. در شمال شرق (در فاصله بندر شرفخانه در شمال و آبادی داش کسن) پس از حریم دریاچه، جلگه کویری وسیعی قرار دارد که به سمت شرق تا نزدیکی های تبریز کشیده شده که در بعضی منابع با نام «کویر کبودان» شناخته شده است (جداری عیوضی، ۱۳۶۱: ۳). رنگ خاک عموماً در این نواحی خاکستری و جزو خاک های شور و قلیایی است. در این پهنه های خاکستری رنگ همانند پهنه های رسی، پوشش گیاهی زیادی وجود ندارد. فرسایش خاک در این جلگه با باد و باران و تشکیل تپه های ماسه ای، پیدایش تدریجی بیابان را نشان می دهد.

در جلگه رود گدار و در جهت جنوب و جنوب شرق دریاچه ارومیه در اثر نبود زهکشی مناسب و تراکم تدریجی نمک در خاک، کویرهای کوچکی وجود دارد که وسعت آنها در بازه زمانی مطالعه شده گسترش یافته است. اراضی حاصل از پس رفت دریاچه ارومیه در کلاس خطر بیابانزایی متوسط قرار گرفته اند. دلیل این امر ماهیت شاخص میزان نمناکی است. این اراضی به شکل شوره زاری پیرامون دریاچه تشکیل شده است و عرض آن متناسب با شیب و وسعت جلگه های ساحلی در جهات مختلف تغییر می کند. در فصل خشک قسمت هایی از این نوار بالایه ای از نمک غیرمترکم پوشیده می شود که رنگ آن صورتی دیده می شود. انتظار می رود در فصول پرآبی از وسعت این اراضی کاسته شود. مناطق دارای میزان سبزیگی مناسب که غالباً کاربری کشاورزی و باغی دارند، همانند باغ های انگور

میان‌دوآب (واقع در جنوب)، اراضی کشاورزی و مراتع واقع شده روی مخروط‌افکنه‌های شکل گرفته در پای می‌شوداغ (واقع در شمال) و بدنه‌های آبی حاضر در محدوده مطالعه شده مانند سد آبی تازه‌کند (واقع در جنوب غرب) در کلاس خطر بدون بیابان‌زایی یا در کلاس خطر بیابان‌زایی ضعیف قرار دارند.

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع پدیده بیابان‌زایی در هر محدوده‌ای نیازمند مدل‌سازی این پدیده براساس یک مدل منطقه‌ای مناسب است. برای شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع بیابان‌زایی با استفاده از مطالعات پیشین، مهم‌ترین معیارها و شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی نظیر معیار اقلیم (با سه شاخص بارندگی، تبخیر-تعرق و شاخص خشکی)، معیار آب‌های زیرزمینی (با چهار شاخص میزان هدایت الکتریکی، میزان کلر، میزان نسبت جذب سدیمی و افت سطح ایستابی)، معیار خاک (با سه شاخص میزان هدایت الکتریکی، بافت و مواد آلی خاک)، معیار درصد پوشش گیاهی، معیار نوع کاربری اراضی و معیار فرسایش بادی شناسایی و پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی آنها به محیط نرم‌افزار ادریسی و مدل رگرسیون لجستیک وارد شد. برای مدل‌سازی و شناسایی مهم‌ترین عوامل وقوع بیابان‌زایی، پهنه‌هایی (نواحی) که در مرحله پایش روند بیابان‌زایی به مثابه نواحی خط شدید و نسبتاً شدید شناسایی شده بودند، به مثابه متغیر وابسته و عوامل چهارده‌گانه بیان‌شده به مثابه متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون لجستیک معرفی شدند.

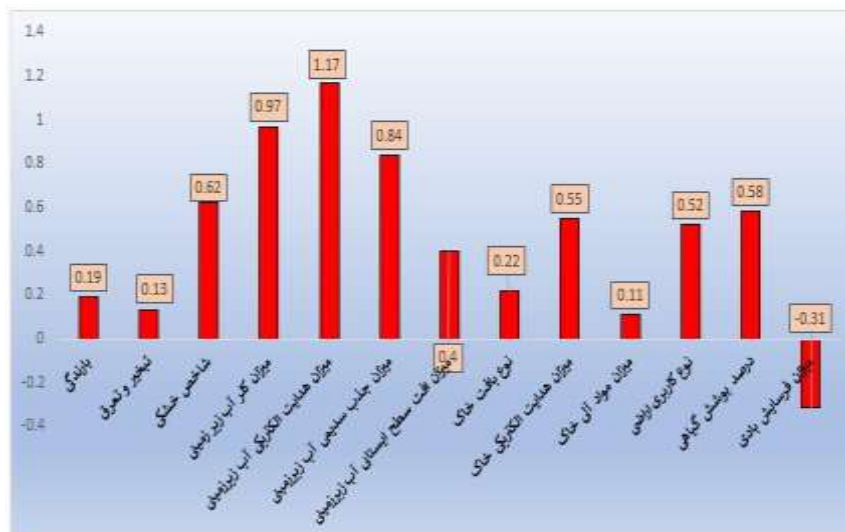




شکل ۸. عوامل مؤثر در وقوع بیابانزایی در محدوده مطالعه شده (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 8. Effective factors on the occurrence of desertification in the study area (Authors, 2019)

شکل ۹ ضریب تأثیرگذاری هریک از عوامل مؤثر را نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل رگرسیون لجستیک، معیار آب‌های زیرزمینی با شاخص‌هایی نظیر میزان هدایت الکتریکی آب (۱/۱۷)، میزان کلر (۰/۹۷)، میزان جذب سدیمی (۰/۸۴)، معیار اقلیم با شاخص خشکی (۰/۶۲) و درصد پوشش گیاهی (۰/۵۸)، بیشترین ضریب تأثیرگذاری را در وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده دارند.



شکل ۹. ضریب تأثیرگذاری عوامل مطالعه‌شده در وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 9. The coefficient of influence of the studied factors on the occurrence of desertification in the studied area (Authors, 2019)

آب‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک حاوی مقدار زیادی کلر است که بر اثر مصرف این گونه آب‌ها مقدار زیادی کلر در خاک‌های زراعی متراکم می‌شود. افزایش بیش از حد مجاز کلر در خاک، علاوه بر سمی کردن گیاهان باعث متوقف شدن فعالیت بیولوژیکی می‌شود و از این راه در تخریب اراضی و بیابان‌زایی نقش دارد (بوعلی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۱۴)؛ بنابراین میزان زیاد کلر موجود در آب‌های زیرزمینی از جمله عوامل شوری خاک و عامل محدودکننده رشد پوشش گیاهی در محدوده پژوهش است.

میزان هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعه‌شده نیز به دلیل کاهش بارندگی و افزایش میزان تبخیر زیاد است. همین امر به تخریب ساختمان خاک و ایجاد مشکلاتی در زهکشی اراضی منجر شده و پوشش گیاهی منطقه را از لحاظ کمی دچار نقصان و کاهش کرده است؛ از سوی دیگر شوری آب در منطقه ریشه دوانی گیاهان به تمرکز نمک منجر شده و انتقال آب از خاک به گیاهان را کاهش داده و پیرو آن باعث کاهش سلامت گیاهان و بیابان‌زایی شده است. در چنین شرایطی کاهش سطح تراز آب دریاچه ارومیه سبب آزاد شدن اراضی بستر دریاچه شده است. ماهیت ژئومورفولوژیکی اراضی حاصل از پس رفت آب دریاچه سبب افزایش وسعت اراضی بیابانی در محدوده پژوهش شده است.



پهنه‌های رسی - نمکی ایجادشده در اطراف دریاچه ارومیه
(ساحل شرقی - مسیر تبریز - ارومیه)

Clay-salt zones created around Lake Urmia (East coast- of Tabriz-Urmia road)



فرسایش و اضمحلال بافت خاک (فرسایش آبی)
(دشت تبریز - شمال روستای مایان)

Erosion and decay of soil texture (water erosion)
(Tabriz plain - north of the village Mayan)



اراضی بایر با پوشش گیاهی نامناسب و دچار فرسایش آبی
(قوم تپه)

Barren lands with inadequate vegetation and water erosion (kum Tape)



اراضی بایر (اراضی انتهایی منطقه موسوم به کویر کبودان به دریاچه ارومیه: این اراضی فاقد توان بیولوژیکی است)

Barren lands - the end lands of the region called Kaboudan desert to Lake Urmia:
These lands lack biological potential



اراضی بایر واقع در شمال محدوده مطالعه شده (اطراف خامنه)
Barren lands located in the north of the study area
(around Khamenei)



پهنه‌های رسی (تصویر سمت راست) و اراضی بایر دارای پوشش گیاهی ضعیف (تصویر سمت چپ)؛ (غرب شهرستان عجب‌شیر روستای رحمانلو)

Right: Clay Zones. Left: The lands with poor vegetation coverage

شکل ۱۰. تصاویری از اراضی بایر و دارای چهره بیابانی در محدوده مطالعه شده (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 10. Pictures of barren lands with desert faces in the study area (Authors, 2019)

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی وقوع پدیده بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه با استفاده از مهم‌ترین شاخص‌های طیفی معرف بیابان‌زایی شامل پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، آلبدوی سطحی و شاخص تسلدکپ با سه مؤلفه میزان نمناکی، ضریب روشنایی و میزان سبزی‌نگی در قالب زوج شاخص‌های طیفی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- دو زوج شاخص طیفی میزان سبزی‌نگی - ضریب روشنایی، میزان رطوبت و ضریب روشنایی با داشتن ضریب همبستگی منفی، بهترین زوج شاخص‌های معرف بیابان‌زایی در محدوده پژوهش هستند؛ از این رو نقشه‌های شدت خطر بیابان‌زایی با استفاده از به‌کارگیری زوج شاخص طیفی یادشده به دست آمد.
- صحت و دقت نقشه‌های به‌دست‌آمده در مرحله قبل با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی بیشترین درجه شباهت و ابزار ماتریس خطا بررسی شد و الگوریتم یادشده با کسب درجه صحت ۹۱/۹۶ و ضریب کاپای معادل ۰/۹۵ برای نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۰۰ میلادی و درجه صحت ۹۱/۲۵ و ضریب کاپای ۰/۸۹ برای نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۸ میلادی نشان از انطباق خوب و مناسب نتایج به‌دست‌آمده با واقعیت‌های زمینی دارد.
- براساس نتایج به‌دست‌آمده افزایش ۵/۰۱ درصدی مساحت کلاس خطر شدید، افزایش ۱۱/۴۷ درصدی مساحت کلاس نسبتاً شدید، افزایش ۶/۱۲ درصدی مساحت کلاس متوسط و کاهش ۹/۱۷ درصدی کلاس خطر ضعیف و کاهش ۱۳/۴۳ درصدی مساحت کلاس خطر بدون بیابان‌زایی به نفع وقوع پدیده بیابان‌زایی تفسیر می‌شود؛ بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت وقوع پدیده بیابان‌زایی طی سال‌های آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ روند صعودی داشته و خطر بیابان‌زایی در محدوده پژوهش با شدت بیشتری افزایش یافته است.
- نقشه‌های شدت خطر بیابان‌زایی در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸ میلادی نشان می‌دهد اراضی واقع در ساحل شرقی دریاچه ارومیه به‌ویژه اراضی واقع در جنوب شرق دریاچه ارومیه و اراضی واقع در منتهی‌الیه دشت تبریز و مشرف به دریاچه ارومیه در مقایسه با اراضی واقع در ساحل غربی دریاچه ارومیه حساسیت بیشتری در برابر خطر بیابان‌زایی دارد و تخریب اراضی در این نواحی در بازه زمانی مطالعه‌شده با شدت بیشتری رخ داده است. این نواحی ویژگی‌هایی همانند فقدان پوشش گیاهی مؤثر، ظهور شکوفه‌های نمکی در سطح زمین، کمبود رطوبت خاک و در نتیجه وجود خاک‌های خشک و مستعد فرسایش بادی دارند.
- مناطق دارای میزان زیاد پوشش گیاهی، خاک‌های مرطوب و زیر سیطره پیکره‌های آبی نظیر دریاچه ارومیه یا سد آبی واقع در جنوب غرب دریاچه و مناطق واقع در شمال غرب، جزو مناطق واقع در کلاس خطر ضعیف یا بدون خطر بیابان‌زایی هستند.
- براساس نتایج به‌دست‌آمده، معیار آب‌های زیرزمینی با شاخص‌هایی نظیر میزان هدایت الکتریکی آب (۱/۱۷)، میزان کلر آب زیرزمینی (۰/۹۷)، میزان جذب سدیمی آب زیرزمینی (۰/۸۴) و معیار اقلیم با شاخص خشکی (۰/۶۲) و درصد پوشش گیاهی (۰/۵۸)، بیشترین ضریب تأثیرگذاری را در وقوع بیابان‌زایی در محدوده مطالعه‌شده دارند.

منابع

- اختصاصی، محمدرضا، سپهر، عادل، (۱۳۹۰). روش‌ها و مدل‌های ارزیابی و تهیه نقشه بیابان‌زایی، چاپ ۱، یزد، انتشارات دانشگاه یزد.
- بوعلی، عبدالحسین، جعفری، رضا، بشری، حسن، (۱۳۹۶). بررسی تأثیر برخی شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی بر بیابان‌زایی اراضی دشت سگزی اصفهان با استفاده از **Bayesian Belief Networks**. نشریه علوم آب و خاک، سال ۲۱، شماره ۳، ۲۰۵-۲۱۸.
- جداری عیوضی، جمشید، (۱۳۶۱). کویر کبودان، ویژگی‌های ژئومورفولوژی، مؤسسه جغرافیای دانشگاه تهران، انتشارات جغرافیایی، شماره ۱۸، ۱-۲۷.
- جهاد کشاورزی، انتشارات مؤسسه آب و خاک، (۱۳۴۲). نقشه خاک‌شناسی ایران، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰۰.
- داوری، سرور، راشکی، علیرضا، اکبری، مرتضی، طالبان‌فرد، علی‌اصغر، (۱۳۹۷). پایش تغییرات زمانی-مکانی شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی مناطق خشک جنوب استان خراسان رضوی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۹، شماره ۲، ۱۷-۳۲.
- رحیمی، حسین، (۱۳۹۱). مدل‌سازی زمانی-مکانی تغییرات پوشش زمین با تلفیق تحلیل زنجیره مارکوف، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سلول‌های خودکار؛ مطالعه موردی: بخش شرقی دشت تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: رستم‌زاده، هاشم، دانشگاه تبریز، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی.
- طاووسی، تقی، شجاع، فائزه، اکبری، الهه، عسکری، الهه، (۱۳۹۵). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و تحلیل روند بیابان‌زایی اقلیمی چاله گاوخونی، فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی اهر، سال ۱۶، شماره ۵۶، ۹۴-۷۹.
- هاشمی‌نسب، نگار، جعفری، رضا، (۱۳۹۷). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی به‌منظور پایش بیابان‌زایی، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۵، شماره ۳، ۵۹-۷۴.
- Binal A., Christian, P.S., Dhinwa, A., (2018). *Long term monitoring and assessment of desertification processes using medium & high resolution satellite data*, Applied Geography, (97), 10- 24.
- Boali, A.H., Jafari, R., Bashari, H., (2016). *Analyzing the Effect of Groundwater Quality on Desertification using Bayesian Belief Networks in Segzi Desertification Hotspot*, Water and Soil Science (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour), (21) 3, 205-2018.
- Collado, A.D., Chuvieco, E., Camarasa, A., (2002). *Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop- rangeland boundary of Argentina*, Journal of Arid Environmental, (52) 1, 121- 133.
- Cui, Guishan, L., woo-kyun, K., Doo-Ahn, C., Sungho, P., Taeijin, E., Jongyeol, L., (2011). *Desertification monitoring by Landsat TM satellite imagery*, (7) 3, 110- 116.
- Davri, S., Rashki, A.R., Akbari, M., Talebanfard, A.A., (2018). *Monitoring of spatio-temporal indices on desertification in arid regions of south of Khorasan Razavi province*, RS & GIS for Natural Resources, (9) 2, 17- 30.
- Ekhatesasi, M.R., Sepehr, A., (2011). *Methods and Models of Desertification Assessment and Mapping*, first edition, Yazd: Yazd University Press.
- Foody, G.M., (2002). *Status of land cover classification accuracy assessment*, Remote Sensing of Environment, (80) 1, 185- 201.
- Hasheminasab, S., Jafari, R., (2018). *Evaluation of Land Use Changes order to Desertification*

- Monitoring Using Remote Sensing Techniques*, Journal of Spatial Analysis Environmental Hazard, (5) 3, 67- 82.
- Jedari Eyvazi, J., (1982). *Geomorphological character of Kabudan desert*, Research of geography, University of Tehran, (18), 1- 27.
- Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K., Dutta, D., (2014). *Monitoring the extent of desertification processes in western Rajasthan (India) using geo- information science*, Arab Geoscience, (8) 8, 5727- 5737.
- Lamqadem, A.A., Hafid, S., Biswajeet, P., (2018). *Quantitative Assessment of Desertification in an Arid, Oasis Using Remote Sensing Data and Spectral*, Remote Sens, (10) 1862, 1- 18.
- Liangliang, J., Guli, J., Anming, B., Alishir, K., Hao, G., Guoxiong, Z., Philippe De, M., (2019). *Monitoring the long-term desertification process and assessing the relative roles of its drivers in Central Asia*, Ecological Indicators, (104) 1, 195- 208.
- Masoudi, M., Parviz, J., Biswajeet, P., (2018). *A new approach for land degradation and desertification assessment using geospatial techniques*, Nat, Hazards Earth Syst Science, (18), 1133- 1140.
- Ministry of Agriculture –Jahad, Soil and Water Research Institute, *Soil map of Iran*, 1/25000000 Scale.
- Moharani, P.C., Shalu, S., Bhatt, R.K., (2013). *NDVI based assessment of desertification in Jaiaslmer district of Rajashan to regional climate variability*, Conference: xxx III INCA international congress at Jodhpur, (3), 1- 10 .
- Negli, K., Damm, A., Huss, M., Wulf, H., Scheapman, M., Hoelzle, M., (2017). *Cross-comparison of albedo products for glacier surface derived from air born and satellite sentinel-2 and landsat-8: optical data*, Remote sensing, (9) 2, 1- 22.
- Rahimi, Hossein, (2012). *Spatial-spatial modeling of land cover changes by combining Markov chain analysis, artificial neural networks and automated cells (Case study: Eastern part of Tabriz plain)*, Thesis for master's degree. Supervisor: Hashem Rostamzadeh, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz.
- Tavosi, T., Shojae, F., Akbari, E., Asgari, E., (2016). *Assessment of land use change and Analysis process climate desertification wetland Gavkhyny*, Geographical Space Journal, (16) 56, 79- 94.
- Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., Pan, J., (2009). *Quantitative Assessment of desertification Using Landsat Data on a Regional Scale- A case study in the Ordos Plateau, China*, Sensors, (9) 3, 1738- 1753.