Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Investigating the Effects of Land Use Changes on Water Quality in the Sattarkhan Dam, Ahar

Seyyed Farhad Shohadie[1], Hassan Ahmadzadeh[2]✉, Nader Habibzadeh[3], Ehsan Atazadeh[4]

1. Ph.D. Candidate, Department of Environmental Sciences, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran. E-mail: mfs2007hermes@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran. E-mail: hassan.ahmadzadeh@iau.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Environmental Sciences, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran. E-mail: habibzadeh@iau.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Plant, Cell and Molecular Biology, Faulty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: hassan.ahmadzadeh@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 28 March 2026
Revised: 21 April 2026
Accepted: 25 April 2026
Published: 29 April 2026

Keywords:
LULC changes,
Eutrophication,
Water Quality,
Object-Based Image Analysis,
Sattarkhan dam, Ahar.

ABSTRACT

Objective: The present study was conducted to investigate the effects of land use/land cover changes on water quality in the Sattarkhan Dam reservoir in Ahar, Iran. The quantity and quality of water resources are among the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), as the availability of high-quality surface water is essential for human health, the sustainability of agricultural production, and the integrity of natural ecosystems. Changes in land use and land cover significantly influence both the quantity and quality of surface water resources.

Methods: In this study, Landsat 5, 8, and 9 satellite imagery was acquired for the period from 1994 to 2024 at ten-year intervals. Pre-processing, processing, and post-processing operations were performed using ENVI 5.3, eCognition Developer, and GIS software. Image analysis was conducted employing Object-Based Image Analysis (OBIA) techniques.

Results: According to the obtained results, cultivated land exhibited the highest positive change over the 30-year study period, increasing by 162.66 km², which accounted for approximately 28.35% of the total land use change. This increase occurred primarily during the intervals of 2004–2014 (with an increase of 403.21 km² and an importance index of 76.42%) and 1994–2024 (with an importance index of 45.77%). In contrast, barren land experienced a substantial decrease over the same 30-year period, declining by 147.70 km², corresponding to an importance index of 44.47%. This reduction was most pronounced during the first and third intervals, namely 1994–2004 (a decrease of 325.28 km², importance index of 19.6%) and 2014–2024 (a decrease of 8.29 km², importance index of 43.02%).

Conclusions: This analysis examined the trends of land use/land cover change in the Sattarkhan Dam watershed in Ahar over the period from 1994 to 2024. The Sattarkhan Dam was constructed in the year 2000, which may have played a significant role in the spatial and land use transformations of the region. A comparison of changes before and after dam construction revealed that, overall, following the construction of the dam, the proportion of water-dependent land uses - such as fallow and cultivated agricultural lands - increased, whereas the share of barren lands and rangelands declined during the first decade after dam construction. The findings indicate that the expansion of built-up areas is strongly associated with increased nutrient enrichment over the three decades, highlighting the need for sustainable watershed planning and management to mitigate nutrient flux and preserve the essential ecosystem services of freshwater systems.

Cite this article: Shohadie, S.F., Ahmadzadeh, H., Habibzadeh, N. & Atazadeh, E. (2026). Investigating the Effects of Land Use Changes on Water Quality in the Sattarkhan Dam, Ahar. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (20), 97-122. http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.73343.1165

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.73343.1165

Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Introduction

The availability of high-quality surface water is essential for human health, sustainable agricultural production, and the integrity of natural ecosystems. The quantity and quality of water resources are recognized among the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) (Cheng et al., 2022). Land use change exerts profound impacts on ecological processes, surface runoff, and the hydrological cycle, thereby influencing river water quality (Guo et al., 2021). Consequently, attention to land use activities is of great importance in the context of water quality assessment. Lakes and reservoirs provide a wide range of services for human well-being, including drinking water, energy, fisheries, and recreation. However, these ecosystems are vulnerable to water pollution phenomena such as eutrophication — one of the most critical water resource management challenges worldwide (Bhagowati & Ahamad, 2019; Bonansea et al., 2021; Padedda et al., 2017). Although eutrophication is a naturally slow process, it has been substantially exacerbated by anthropogenic activities, thereby increasing health and developmental risks (Ferral et al., 2018; Le Moal et al., 2019).

In the present study, Landsat satellite imagery was employed to both map land use/land cover (LULC) and model and reconstruct historical chlorophyll-a concentrations — one of the key indicators of eutrophic status in aquatic environments — for the Sattarkhan Dam watershed in Ahar. This study seeks to address how the information derived from temporal changes in water quality and LULC within the study area (the Sattarkhan Dam watershed) can enhance our understanding of the impact of anthropogenic activities on the water quality of the Sattarkhan Dam reservoir.

Data and Method

In this study, Landsat 5, 8, and 9 satellite imagery was acquired for the period from 1994 to 2024 at ten-year intervals. Pre-processing, processing, and post-processing operations were performed using ENVI 5.3, eCognition Developer, and GIS software. Image analysis was conducted employing Object-Based Image Analysis (OBIA) techniques.

Results and Discussion

In this study, the trends of land use/land cover change in the Sattarkhan Dam watershed in Ahar were investigated over the period from 1994 to 2024. Built-up areas and water bodies within the watershed exhibited a continuous increasing trend throughout the study period. The expansion rate of built-up areas was 5.98% from 1994 to 2004, increased to 7.0% from 2004 to 2014, and subsequently declined to 2.47% from 2014 to 2024. Water bodies exhibited the highest rate of change (15.18%) during the 1994–2004 period, followed by negligible change between 2004 and 2014, and then an increase of 1.68% from 2014 to 2024 — the latter being primarily attributable to the formation of the tailings dam of the Sungun Copper Mine upstream of the reservoir.

Agricultural land exhibited a fluctuating pattern. Its proportion increased from 13.49% (124.95 km²) in 1994 to 20.64% (191.12 km²) in 2004, then decreased to 19.65% (181.91 km²) in 2014, and further declined to 19.13% (177.12 km²) in 2024. The rate of increase from 1994 to 2004 (+5.29%) exceeded the rates of decline during 2004–2014 (−0.48%) and 2014–2024 (−0.26%), indicating an overall net increasing trend.

Barren lands exhibited a continuous declining trend over the 30-year period. The rate of decrease was 1.0% from 1994 to 2004, slowed to 0.47% from 2004 to 2014, and then accelerated to 1.23% from 2014 to 2024.

Fallow lands decreased by 0.87% from 1994 to 2004, followed by increases of 0.62% and 0.21% during the 2004–2014 and 2014–2024 intervals, respectively, reflecting a net increasing trend in the latter half of the study period. Rangelands exhibited a continuous decline until 2014, with rates of −0.82% (1994–2004) and −0.30% (2004–2014); however, they increased by 1.95% from 2014 to 2024, indicating a trend reversal.

Conclusion

This study investigated the trends of land use/land cover change in the Sattarkhan Dam watershed in Ahar over the period from 1994 to 2024. The Sattarkhan Dam was constructed in the year 2000, which may have played a significant role in the spatial and land use transformations of the region.

Freshwater dam reservoirs are increasingly threatened by land use/land cover (LULC) changes, which lead to eutrophication and the deterioration of water quality. This study presents an integrated remote sensing and object-based image analysis (OBIA) approach to assess the impacts of LULC change on eutrophication

dynamics in the Sattarkhan Dam reservoir in Ahar. Multi-temporal Landsat imagery (1994–2024) was employed to classify LULC changes and to estimate chlorophyll-a concentrations.

A comparison of changes before and after dam construction revealed that, overall, following the construction of the dam, the proportion of water-dependent land uses — such as fallow and cultivated agricultural lands — increased, whereas the share of barren lands and rangelands declined during the first decade after dam construction. The findings indicate that the expansion of built-up areas is strongly associated with increased eutrophication over the three decades, highlighting the need for sustainable watershed planning and management to mitigate nutrient loading and preserve the essential ecosystem services of freshwater systems.

References

Arvor, D., Durieux, L., Andrés, S., & Laporte, M.-A. (2013). Advances in Geographic Object-Based Image Analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *82*, 125–137. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.-2013.05.003

Assegide, E., Shiferaw, H., Tibebe, D., Peppa, M. V., Walsh, C. L., Alamirew, T., & Zeleke, G. (2023). Spatiotemporal Dynamics of Water Quality Indicators in Koka Reservoir, Ethiopia. *Remote Sensing*, *15*(4), 1155. https://doi.org/10.3390/rs15041155

Azhand, D., Pirasteh, S., Varshosaz, M., Shahabi, H., Abdollahabadi, S., Teimouri, H., Pirnazar, M., Wang, X., & Li, W. (2024). Sentinel 1a-2a Incorporating an Object-Based Image Analysis Method for Flood Mapping and Extent Assessment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *X-1–2024*, 7–17. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-2024-7-2024

Bateni, F., Fakheran, S., & Soffianian, A. (2013). Assessment of land cover changes & water quality changes in the Zayandehroud River Basin between 1997–2008. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(12), 10511–10519. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3348-3

Baughman, C., Jones, B., Bartz, K., Young, D., & Zimmerman, C. (2015). Reconstructing Turbidity in a Glacially Influenced Lake Using the Landsat TM and ETM+ Surface Reflectance Climate Data Record Archive, Lake Clark, Alaska. *Remote Sensing*, *7*(10), 13692–13710. https://doi.org/10.3390/rs71013692

Bhagowati, B., & Ahamad, K. U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *19*(1), 155–166. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *65*(1), 2–16. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004

Bonansea, M., Bazán, R., Germán, A., Ferral, A., Beltramone, G., Cossavella, A., & Pinotti, L. (2021). Assessing land use and land cover change in Los Molinos reservoir watershed and the effect on the reservoir water quality. *Journal of South American Earth Sciences*, *108*, 103243. https://doi.org/10.1016/j.jsames.-2021.103243

Borderie, F., Alaoui-Sehmer, L., Bousta, F., Alaoui-Sossé, B., & Aleya, L. (2014). Cellular and molecular damage caused by high UV-C irradiation of the cave-harvested green alga Chlorella minutissima: Implications for cave management. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *93*, 118–130. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.05.014

Brezonik, P., Menken, K. D., & Bauer, M. (2005). Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM). *Lake and Reservoir Management*, *21*(4), 373–382. https://doi.org/10.1080/07438140509354442

Camara, M., Jamil, N. R., & Abdullah, A. F. Bin. (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. *Ecological Processes*, *8*(1), 10. https://doi.org/10.1186/s13717-019-0164-x

Carey, R. O., Hochmuth, G. J., Martinez, C. J., Boyer, T. H., Dukes, M. D., Toor, G. S., & Cisar, J. L. (2013). Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: Challenges and research opportunities. *Environmental Pollution*, *173*, 138–149. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.004

Chang, N.-B., Yang, Y. J., Daranpob, A., Jin, K.-R., & James, T. (2012). Spatiotemporal pattern validation of chlorophyll- a concentrations in Lake Okeechobee, Florida, using a comparative MODIS image mining

approach. *International Journal of Remote Sensing*, *33*(7), 2233–2260. Https://Doi.Org/10.1080/01431161.-2011.608089

Chawira, M., Dube, T., & Gumindoga, W. (2013). Remote sensing based water quality monitoring in Chivero and Manyame lakes of Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *66*, 38–44. https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.003

Chen, C., Yuan, X., Gan, S., Kang, X., Luo, W., Li, R., Bi, R., & Gao, S. (2024). A new strategy based on multi-source remote sensing data for improving the accuracy of land use/cover change classification. *Scientific Reports*, *14*(1), 26855. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75329-w

Cheng, C., Zhang, F., Shi, J., & Kung, H. Te. (2022). What is the relationship between land use and surface water quality? A review and prospects from remote sensing perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(38), 56887–56907. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21348-x

Cheraghpour-Ahmadmahmoodi, N., Saadat, M., Zamani-Ahmadmahmoodi, R., & Avokh, A. (2024). A four-season exploration of surface water quality and trophic status in the highly dynamic waters of Karun-4 Dam Lake, SW Iran. *Applied Water Science*, *14*(7), 158. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02222-2

Cohen, W. B., & Goward, S. N. (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, *54*(6), 535–545. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2

Dalu, T., Muthivhi, F. F., Dondofema, F., Munyai, L. F., Mpopetsi, P., Dube, T., & Wu, N. (2025). Understanding the Spatiotemporal Variation of Water Quality and Phytoplankton Biomass in Subtropical Reservoir Using the Blue–Sky Multispectral Data. *Ecohydrology*, *18*(5). https://doi.org/10.1002/eco.70070

Desta, H., & Fetene, A. (2020). Land-use and land-cover change in Lake Ziway watershed of the Ethiopian Central Rift Valley Region and its environmental impacts. *Land Use Policy*, *96*, 104682. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104682

Deutsch, E. S., & Alameddine, I. (2019). Hindcasting eutrophication and changes in temperature and storage volume in a semi-arid reservoir: a multi-decadal Landsat-based assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(1), 41. https://doi.org/10.1007/s10661-018-7180-7

Deutsch, E. S., Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2018). Monitoring water quality in a hypereutrophic reservoir using Landsat ETM+ and OLI sensors: how transferable are the water quality algorithms? *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(3), 141. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6506-9

Dlamini, S., Nhapi, I., Gumindoga, W., Nhiwatiwa, T., & Dube, T. (2016). Assessing the feasibility of integrating remote sensing and in-situ measurements in monitoring water quality status of Lake Chivero, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, *93*, 2–11. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.004

Drăguţ, L., & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, *81*(3–4), 330–344. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013

Dube, T., Gumindoga, W., & Chawira, M. (2014). Detection of land cover changes around Lake Mutirikwi, Zimbabwe, based on traditional remote sensing image classification techniques. *African Journal of Aquatic Science*, *39*(1), 89–95. https://doi.org/10.2989/16085914.2013.870068

Dube, T., Mutanga, O., Seutloali, K., Adelabu, S., & Shoko, C. (2015). Water quality monitoring in sub-Saharan African lakes: a review of remote sensing applications. *African Journal of Aquatic Science*, *40*(1), 1–7. https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1014994

Farajzadeh, A. M., & Rostamzadeh, H. (2007). Evaluating large dam effects on the land use change using RS & GIS (Case study: Sattarkhan Dam). *MJSP*, *11*(1), 47–66.

Feizizadeh, B., Kazemi Garajeh, M., Blaschke, T., & Lakes, T. (2021). An object based image analysis applied for volcanic and glacial landforms mapping in Sahand Mountain, Iran. *CATENA*, *198*, 105073. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105073

Feizizadeh, B., Kazemi Garajeh, M., Makki, M., Lakes, T., Yakar, M., Naboureh, A., & Thestorf, K. (2025). An integrated object-based-deep learning approach applied for mapping armed conflict impacts and land scars. *Science of Remote Sensing*, *12*, 100257. https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100257

Ferral, A., Luccini, E., Solis, V., Frery, A., Aleksinko, A., Bernasconi, I., & Scavuzzo, C. marcelo. (2018). IN-SITU AND SATELLITE MONITORING OF THE WATER QUALITY OF A EUTROPHIC LAKE INTERVENED WITH A SYSTEM OF ARTIFICIAL AIREATION. *IEEE Latin America Transactions*, *16*(2), 627–633. https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8327422

Gobry, J. J., Twisa, S. S., Ngassapa, F., & Kilulya, K. F. (2023). Impact of land-use/cover change on water quality in the Mindu Dam drainage, Tanzania. *Water Practice & Technology*, *18*(5), 1086–1098. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.067

Guan, Q., Feng, L., Hou, X., Schurgers, G., Zheng, Y., & Tang, J. (2020). Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations. *Remote Sensing of Environment*, *246*, 111890. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111890

Gun, Z., & Chen, J. (2023). Novel Knowledge Graph- and Knowledge Reasoning-Based Classification Prototype for OBIA Using High Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, *15*(2), 321. https://doi.org/10.3390/rs15020321

Guo, Y, Li, S., Liu, R., & Zhang, J. (2021). Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin. *Hupo Kexue*, *33*, 737–748.

Guo, Y., Liu, Y., Li, W., Cai, X., Liu, X., & Liao, H. (2025). Multi-Scale Impacts of Land Use Change on River Water Quality in the Xinxian River, Yangtze River Basin. *Water*, *17*(10), 1541. https://doi.org/10.3390/w17101541

Hicks, B. J., Stichbury, G. A., Brabyn, L. K., Allan, M. G., & Ashraf, S. (2013). Hindcasting water clarity from Landsat satellite images of unmonitored shallow lakes in the Waikato region, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(9), 7245–7261. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3098-2

Hinojosa-Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C., & Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluación de parámetros de segmentación en OBIA para la clasificación de coberturas del suelo a partir de imágenes VANT. *Revista de Teledetección*, *58*, 89. https://doi.org/10.4995/raet.2021.14782

Hinojosa-Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C., & Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluación de parámetros de segmentación en OBIA para la clasificación de coberturas del suelo a partir de imágenes VANT. *Revista de Teledetección*, *58*, 89. https://doi.org/10.4995/raet.2021.14782

Hossain, M. D., & Chen, D. (2019). Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *150*, 115–134. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009

Jordan, Y. C., Ghulam, A., & Herrmann, R. B. (2012). Floodplain ecosystem response to climate variability and land-cover and land-use change in Lower Missouri River basin. *Landscape Ecology*, *27*(6), 843–857. https://doi.org/10.1007/s10980-012-9748-x

Kayson Engineering. (2023). *Sattarkhan (Ahar) Clay Core Earth Dam and Related Facilities*. https://www.kayson-ir.com/project/sattarkhan-ahar-clay-core-earth-dam-and-related-facilities/

Khandelwal, S. (2021). *Impact of Land Use Land Cover Change on Sambhar Lake*. 127–151. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8331-9.ch007

Kulkarni, K., K Desai, P., PN, C., & S, R. (2025). Comparison of Pixel-based and Object-based Image Analysis for LULC Classification of Satellite Imagese. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, *73*(2), 177–184. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I2P115

Le Moal, M., Gascuel-Odoux, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., & Pinay, G. (2019). Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment*, *651*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

Li, Y., Cai, Y., Fu, Q., Zhang, X., Wan, H., & Yang, Z. (2024). Dynamics of land use/land cover considering ecosystem services for a dense-population watershed based on a hybrid dual-subject agent and cellular automaton modeling approach. *Engineering*, *37(1)*, 182-195. https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.015

Lucchese, L., & Mitra, S. K. (2001). Colour segmentation based on separate anisotropic diffusion of chromatic

and achromatic channels. *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing*, *148*(3), 141. https://doi.org/10.1049/ip-vis:20010229

Majozi, N. P., Salama, M. S., Bernard, S., Harper, D. M., & Habte, M. G. (2014). Remote sensing of euphotic depth in shallow tropical inland waters of Lake Naivasha using MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, *148*, 178–189. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.025

Marghany, M., & Hashim, M. (2010). MODIS satellite data for modeling chlorophyll-a concentrations in Malaysian coastal waters. *International Journal of Physical Sciences*, *5*(10), 1489–1495.

Marisi, D. P., Suprihatin, Hariyadi, S., & Kaswanto, R. L. (2025). The impacts of land use and cover change on water quality of watershed basin. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *11*(2), 573–592. https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.02.12

McCarthy, M. J., Muller-Karger, F. E., Otis, D. B., & Méndez-Lázaro, P. (2018). Impacts of 40 years of land cover change on water quality in Tampa Bay, Florida. *Cogent Geoscience*, *4*(1), 1422956. https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1422956

McCullough, I. M., Loftin, C. S., & Sader, S. A. (2012). Combining lake and watershed characteristics with Landsat TM data for remote estimation of regional lake clarity. *Remote Sensing of Environment*, *123*, 109–115. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.006

McCullough, I. M., Loftin, C. S., & Sader, S. A. (2013). Lakes without Landsat? An alternative approach to remote lake monitoring with MODIS 250 m imagery. *Lake and Reservoir Management*, *29*(2), 89–98. https://doi.org/10.1080/10402381.2013.778926

Miller, J. D., Schoonover, J. E., Williard, K. W. J., & Hwang, C. R. (2011). Whole Catchment Land Cover Effects on Water Quality in the Lower Kaskaskia River Watershed. *Water, Air, & Soil Pollution*, *221*(1–4), 337–350. https://doi.org/10.1007/s11270-011-0794-9

Padedda, B. M., Sechi, N., Lai, G. G., Mariani, M. A., Pulina, S., Sarria, M., Satta, C. T., Virdis, T., Buscarinu, P., & Lugliè, A. (2017). Consequences of eutrophication in the management of water resources in Mediterranean reservoirs: A case study of Lake Cedrino (Sardinia, Italy). *Global Ecology and Conservation*, *12*, 21–35. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.08.004

Sudheer, K. P., Chaubey, I., & Garg, V. (2006). Lake Water Quality Assessment From Landsat Thematic Mapper Data Using Neural Network: an Approch to Optimal Band Combinatin Selection 1. *Journal of the American Water Resources Association*, *42*(6), 1683–1695. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.-tb06029.x

USGS. (2021). *Landsat Collection 2 Surface Reflectance Product Description*. U.S. Geological Survey. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance

Vahidifar, A., & Atazadeh, E. (2025). Investigation of algal community and water quality of Sattarkhan and Sahand dams in East Azarbaijan province. *Taxonomy and Biosystematics*. https://doi.org/10.22108/tbj.-2025.144776.1303

Valdivieso-Ros, C., Alonso-Sarría, F., & Gomariz-Castillo, F. (2023). Impact of segmentation algorithms on multisensor LULC classification in a semiarid Mediterranean area. *Earth Science Informatics*, *16*(4), 3861–3883. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01124-2

Wienert, S., Heim, D., Kotani, M., Lindequist, B., Stenzinger, A., Ishii, M., Hufnagl, P., Beil, M., Dietel, M., Denkert, C., & Klauschen, F. (2013). CognitionMaster: an object-based image analysis framework. *Diagnostic Pathology*, *8*, 34. https://doi.org/10.1186/1746-1596-8-34

Wienert, S., Heim, D., Kotani, M., Lindequist, B., Stenzinger, A., Ishii, M., Hufnagl, P., Beil, M., Dietel, M., Denkert, C., & Klauschen, F. (2013). CognitionMaster: an object-based image analysis framework. *Diagnostic Pathology*, *8*, 34. https://doi.org/10.1186/1746-1596-8-34

Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, *122*, 2–10. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010

Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Zahiri, J., Cheraghi, M., & Salarijazi, M. (2024). Simulating chlorophyll a in dam reservoirs using remote sensing and data-driven approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*, *31*(3), 85–108. https://doi.org/https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22570.3739

Zareh Reshqueih, M., Hamidian, A. H., Poorbagher, H. and Ashrafi, S. (2014). Investigation of Heavy Metal Concentrations in Sediment, Fish and Common Reed in Sattarkhan Dam, Azarbayjan-Sharghi, Iran. Journal of Natural Environment, 67(1), 79-90. doi: 10.22059/jne.2014.51001 (in Persian)

Zhu, Y., Gao, J., Zhao, H., Deng, S., Lin, M., Wang, N., Liu, M., Hu, S., & Luo, L. (2024). Land Use Impact on Water Quality and Phytoplankton Community Structure in Danjiangkou Reservoir. *Diversity*, *16*(5), 275. https://doi.org/10.3390/d16050275

نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی
rsgi.tabrizu.ac.ir

بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب در سد ستارخان اهر

سیدفرهاد شهدایی[۱]، حسن احمدزاده[۲]✉، نادر حبیب‌زاده[۳]، احسان عطازاده[۴]

۱. دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: mfs2007hermes@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: hassan.ahmadzadeh@iau.ac.ir
۳. دانشیار گروه محیط زیست، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: habibzadeh@iau.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: abcdefhassan.ahmadzadeh@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹

کلیدواژه‌ها:
تغییرات کاربری اراضی،
پرغذایی،
کیفیت آب،
تحلیل تصویر شیءگرا،
سد ستارخان اهر.

چکیده

هدف: پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب در سد ستارخان اهر انجام گرفت. کمیت و کیفیت منابع آبی از اهداف توسعه پایدار ملل متحد می‌باشد. زیرا وجود آب‌های سطحی با کیفیت برای بهداشت انسانی و پایداری تولیدات کشاورزی و بوم‌های طبیعی ضروری می‌باشد. تغییرات کاربری اراضی و پوشش اراضی کمیت و کیفیت منابع آب‌های سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

روش پژوهش: در این پژوهش ابتدا تصاویر ماهواره ای لندست ۵، ۸ و ۹ برای بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ با فاصله زمانی ۱۰ سال تهیه و برای عملیات پیش پردازش، پردازش و پس پردازش از نرم افزارهای ENVI5.3، eCognition Developer و GIS استفاده شد. و تحلیل تصاویر با بهره‌گیری از تکنیک‌های شیءگرا (OBIA) صورت گرفت.

نتایج: با توجه به نتایج بدست آمده، اراضی کشت شده طی دوره‌ی ۳۰ ساله بیشترین تغییر مثبت را داشته است، به‌طوری که با افزایش ۶۶/۱۶۲ کیلومترمربع، حدود ۳۵/۲۸ درصد از کل تغییرات را به خود اختصاص داده است. این افزایش عمدتاً در بازه‌های ۲۰۱۴ – ۲۰۰۴ (با افزایش ۲۱/۴۰۳ کیلومتر مربع و شاخص اهمیت ۴۲/۷۶ درصد) و ۲۰۲۴ – ۱۹۹۴ (با ۴۵/۷۷ درصد اهمیت) رخ داده است. اراضی بایر نیز طی بازه‌ی ۳۰ ساله کاهش چشمگیری را تجربه کرده‌اند (کاهش ۷۰/۱۴۷ کیلومتر مربع با شاخص اهمیت ۴۷/۴۴ درصد). این کاهش عمده در دو دوره‌ی اول و سوم یعنی ۲۰۰۴– ۱۹۹۴ (کاهش ۲۸/۳۲۵ کیلومتر مربع، اهمیت ۱۹/۶ درصد) و ۲۰۲۴– ۲۰۱۴ (کاهش ۲۹/۸ کیلومترمربع، اهمیت ۴۳/۰۲ درصد) رخ داده است.

نتیجه‌گیری: در این تحلیل، به بررسی روند تغییرات کاربری زمین در حوضه‌ی آبریز سد ستارخان اهر طی دوره‌ی زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ پرداخته شده است. سد ستارخان در سال ۲۰۰۰ احداث شده و این موضوع می‌تواند نقش مهمی در تحولات فضایی و کاربری اراضی منطقه داشته باشد. مقایسه تغییرات پیش و پس از ساخت سد نشان داد که به‌طور کلی، پس از احداث سد، سهم کاربری‌های وابسته به منابع آب مانند اراضی کشاورزی آیش و زراعی افزایش یافته، در حالی که سهم اراضی بایر و مراتع در دهه نخست پس از ساخت سد کاهش یافته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که گسترش مناطق ساخته شده به شدت با افزایش پرغذایی در طول سه دهه مرتبط است و نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت آبخیزداری پایدار را برای کاهش جریان مواد مغذی و حفظ خدمات حیاتی اکوسیستم آب شیرین برجسته می‌کند.

استناد: شهدایی، سیدفرهاد؛ احمدزاده، حسن؛ حبیب‌زاده، نادر و عطازاده، احسان (۱۴۰۵). بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب در سد ستارخان اهر. *کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی*، ۶ (۲۰)، ۹۷-۱۲۲.
http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.73343.1165

ناشر: دانشگاه تبریز.
© نویسندگان.

مقدمه

وجود آب‌های سطحی با کیفیت مناسب برای بهداشت انسانی، تولید پایدار کشاورزی و پایداری بوم‌های طبیعی ضروری می‌باشد. کمیت و کیفیت منابع آبی از اهداف توسعه پایدار ملل متحد می‌باشد (چن و همکاران، ۲۰۲۲). تغییرات کاربری اراضی و پوشش اراضی (LULC)[1] بر کیفیت آب در پایین دست از طریق رواناب های سطحی، عناصر غذایی، رسوبات، و آلودگی تاثیر می‌گذارد (باتنی و همکاران، ۲۰۱۳؛ جردن و همکاران، ۲۰۱۲؛ مک کارتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ میلر و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعات زیادی در مورد ارزیابی رابطه بین کیفیت آب های سطحی و الگوهای LULC انجام شده است (کامارا و همکاران، ۲۰۱۹؛ کری و همکاران، ۲۰۱۳). اما علی رغم، مطالعات گسترده، رابطه بین تغییرات LULC و منابع آبی به خوبی شناخته نشده است. این مساله بخاطر پیچیدگی‌های موجود در فرآیند تغییرات LULC و فرآیندهای هیدرولوژیکی مربوطه می‌باشد. مشخص شده که تغییرات LULC در بین مناطق جغرافیایی به شکل‌های متفاوت بوده و عوامل کنترل کننده آن وابسته به عوامل اقتصادی–اجتماعی، بوم شناختی و سیاسی–تاریخی می‌باشد (خندلوال، ۲۰۲۱).

درک اینکه چگونه تغییرات LULC بر کیفیت آب تاثیر می‌گذارد از موضوعات مهم پژوهشی می‌باشد. تغییر کاربری اراضی اثرات شدیدی بر فرآیندهای بوم شناختی، رواناب‌های سطحی، و چرخه هیدرولوژیکی گذاشته و بنابراین کیفیت آب رودخانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد(گیو و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، توجه به فعالیت‌های استفاده از اراضی در بحث کیفیت آب از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. زیرا دریاچه‌ها و ذخیره‌گاه‌های آبی تنوعی از خدمات را برای بشر از جمله آب آشامیدنی، انرژی، شیلات و تفرج ایجاد می‌کنند. اما، این اکوسیستم‌ها به آلودگی‌های آبی مثل پرغذایی، که یکی از بحران‌های مدیریتی منابع آبی در سراسر جهان می‌باشد، آسیب‌پذیر هستند (بهاگواتی و احمد، ۲۰۱۹؛ بوناسهآ و همکاران، ۲۰۲۱؛ پیدادا و همکاران، ۲۰۱۷). اگرچه پرغذایی یک فرآیند طبیعی با سرعت پایین می‌باشد، این موضوع به شدت با فعالیت‌های انسانی تشدید شده و ریسک‌های بهداشتی و توسعه‌ای را افزایش می‌دهد (فرال و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی موال و همکاران، ۲۰۱۹).

در این مطالعه، با کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست هم نقشه‌سازی LULC و هم مدل‌سازی و پیش‌بینی شرایط گذشته غلظت کلروفیل–a بعنوان یکی از شاخص‌های مهم وضعیت پرغذایی محیط‌های آبی برای حوضه آبخیز سد ستارخان، آذربایجان شرقی صورت گرفت. این مطالعه به دنبال یافتن پاسخی در مورد اینکه چطور اطلاعات بدست آمده در مورد تغییرات زمانی کیفیت آب و LULC در محدوده مطالعاتی (حوزه ی آبخیز سد ستارخان)، می‌تواند به شناخت ما از تاثیر فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب سد ستارخان کمک بکند، می‌باشد.

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که عملیات گسترده استفاده از اراضی شامل توسعه شهرها، کشاورزی، معادن، و جنگل زدایی به شدت کارکرد و پویایی منابع آب شیرین را تغییر داده‌اند (دستا و فتنه، ۲۰۲۰؛ گوآن و همکاران، ۲۰۲۰). به منظور کاهش تخریب پیوسته کیفیت آب و رسیدن به استانداردهای کیفیت آب پیشنهادی برای استفاده‌های مختلف، نظارت پیوسته کیفیت آب بسترهای آبی آسیب‌پذیر، ضرروی می‌باشد. اما، برای نیل به این هدف، به داده‌های طولانی مدت پایش زمینی برای ارزیابی تغییرات کیفیت آب‌های سطحی و موفقیت برنامه‌های مدیریتی اجرا شده نیاز می‌باشد. ولی، اغلب چنین داده‌های بویژه در کشورهای در حال توسعه وجود ندارد (دوتچ و الامدین، ۲۰۱۹). بخاطر هزینه‌های بالای مربوط به برنامه‌های پایش زمینی منابع آبی، مطالعات قبلی استفاده از فنون سنجش از دور را بعنوان جایگزین مطلوبی برای روش‌های سنتی قدیمی که مبتنی بر نمونه برداری‌های نقطه‌ای می‌باشند؛ جهت پایش کیفیت آب پیشنهاد می‌نمایند (چاویرا و همکاران، ۲۰۱۳؛ دلامینی و همکاران، ۲۰۱۶؛ دوبی و همکاران، ۲۰۲۴).

کلروفیل آلفا که بعنوان یک رنگدانه ی سبز در اکثر گیاهان، جلبک ها، و سیانوباکتریها وجود دارد، یکی از پارامترهای اساسی کیفیت آب بوده و می‌تواند از طریق سنجش از دور تمایز داده بشود (چاویرا و همکاران، ۲۰۱۳؛ مجوزی و همکاران، ۲۰۱۴؛ دوبی

1. Land-Use Land-Cover (LULC)

و همکاران، ۲۰۱۵). این پارامتر کیفیت آب که در داخل کلروپلاست سلول جلبک ها قرار گرفته با انعکاس اشعه ی سبز و جذب اشعه‌های قرمز و آبی به جلبک رنگ سبز می دهد (بردری و همکاران، ۲۰۱۴). ارزیابی غلظت کلروفیل آلفا برای درک موضوع گستره ی پرغذایی و عوامل موثر بر تولید اولیه در پهنه‌های آبی حیاتی می‌باشد (مرغانی و هاشم، ۲۰۱۰). مطالعات نشان داده که غلظت کلروفیل آلفا، بعنوان یک اندازه گیری از رشد جلبک، تحت تاثیر عناصر غذایی (یعنی فسفر و نیترات) موجود در پهنه‌های آبی می‌باشد. از این رو، فنون سنجش از دور راه حل مناسبی برای ارزیابی هم تغییرپذیری مکانی و هم زمانی غلظت کلروفیل آلفا می‌باشد. داده‌های سنجش از دور مثل مدیس[1] و مریس[2] در کمی سازی غلظت کلروفیل آلفا در پهنه‌های آبی بطور گسترده استفاده شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۲؛ چاویرا و همکاران، ۲۰۱۳). ولی، کاربرد چنین سنجنده‌های برای پهنه‌های آبی کوچک اغلب بخاطر تفکیک مکانی نسبتا پایین آنها (۲۵۰ متر $\geq$ برای مدیس) محدود می شود (مک کلو و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، پژوهشگران علاقمند به پایش کیفیت پهنه‌های آبهای کوچک، از تصاویر ماهواره ای لندست و اخیرا از ماهواره‌های سنتینل ۲ و ۳ بهره می گیرند (دوتچ و الامدین، ۲۰۱۹).

همچنین، کاربرد سنجش از دور در مورد پهنه‌های آبی داخل خشکی ها به خاطر سیگنال‌های نوری نسبتا پیچیده ی آنها که می‌تواند بر اساس عمق دریاچه، وضعیت پرغذایی، زمین شناسی حوزه، غلظت رسوبات، پوشش گیاهی منطقه، و ترکیب جامعه فیتوپلانکتونی تغییر بکند، محدود شده است (برزونیک و همکاران، ۲۰۰۵؛ مک کلو و همکاران، ۲۰۱۳؛ سادهیر و همکاران، ۲۰۰۶). اگرچه سنسورهای لندست بطور اختصاصی برای سطوح خشکی ها طراحی شده اند (کوهن و گووارد، ۲۰۰۴)، کاربردهای آنها برای محیط های آبی برای ارزیابی وضعیت پرغذایی دریاچه‌ها و سدها به کمک ردیابی نوری عناصر فعال در آنها مثل کلروفیل- a (کوهن و گووارد، ۲۰۰۴؛ دوتچ و همکاران، ۲۰۱۸) و شفافیت آب (دوتچ و همکاران، ۲۰۱۸؛ مک کلو و همکاران، ۲۰۱۸) با موفقیت مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برنامه لندست که در ۸ ماهواره اجرا می‌شود، طولانی‌ترین ثبت پیوسته تصاویر از سطح زمین را تا به امروز در اختیار پژوهشگران قرار می دهد (والدر و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، یک مجموعه اطلاعات بسیار ارزشمند در مورد تغییرات سطح زمین را ارائه می‌دهد. چندین مطالعه تا به امروز از چنین اطلاعات مفیدی برای پیش بینی تغییرات گذشته کیفیت آب و مساله پرغذایی پهنه‌های آبی داخل خشکی ها استفاده کرده‌اند (هیکس و همکاران، ۲۰۱۳؛ بوغمان و همکاران، ۲۰۱۵).

دالو و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از تصاویر چندطیفی لندست تغییرات فضایی و زمانی کلرفیل آلفا را در مخزن سد ناندونی، آفریقای جنوبی ارزیابی و روابط موجود بین متغیرهای فیزیکی–شیمیایی و غلظت کلرفیل آلفا را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر Landsat 7 ETM+ و Landsat 8 OLI برای ماه‌های ژوئن (خشک) و دسامبر (مرطوب) در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ به منظور استخراج توزیع غلظت کلرفیل آلفا استفاده شده است. با استفاده از تکنیک‌های رگرسیون، اندازه‌گیری‌های زمینی از کلرفیل آلفا رابطه قوی و کاملاً خطی با مقادیر پیش‌بینی‌شده از لندست در مخزن سد ناندونی نشان داد. همبستگی منفی معنی‌دار بین کاربری و پوشش زمین (LULC) و متغیرهای کیفیت آب مشاهده گردید. با استفاده از تحلیل واریانس چندمتغیره، تفاوت‌های معنی‌دار برای غلظت کلرفیل آلفا در سایت‌ها، فصل‌ها و مناطق شناسایی شده بود. همبستگی مثبت معنی‌دار بین دمای آب و غلظت کلرفیل آلفا مشاهده گردیده است. در مقابل، همبستگی منفی قوی و معنی‌دار بین کلرفیل آلفا با شوری و جامدات محلول کل (TDS) وجود داشت. غلظت استخراج شده از کلرفیل آلفا در مخزن ناندونی با استفاده از تصاویر سنجش از دور نشان داد که داده‌های لندست برای پایش مخازن کوچک در بازه زمانی کوتاه مناسب است (دالو و همکاران، ۲۰۲۵).

مطالعه ماریزی و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش زمین بر کیفیت آب رودخانه موزوزو[3] و سد کلاو[4] در زیرحوضه موزوزو، واقع در بخش مرکزی زیمبابوه، می‌پردازد؛ جایی که بسیاری از حوضه‌های آبریز جنوب آفریقا با

1. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
2. MERIS (Medium Resolution Imaging Spectroradiometer)
3. Muzvezve
4. Claw

تخریب کیفیت آب مواجه هستند. هدف پژوهش ارزیابی اثرات تغییرات کاربری و پوشش زمین بر کیفیت آب این رودخانه و سد بود. پنج دوره نمونه‌برداری در فصل‌های مرطوب و خشک از اواسط دسامبر ۲۰۱۵ تا پایان فوریه ۲۰۱۶ در شش نقطه نمونه‌برداری که سیستماتیک انتخاب شده اند، صورت گرفته است. هشت پارامتر فیزیکی–شیمیایی شامل کدورت، هدایت الکتریکی (EC)، جامدات محلول کل (TDS)، pH، اکسیژن مورد نیاز زیستی (BOD)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، فسفر و نیتروژن با استفاده از روش‌های استاندارد تحلیل گردیده است. پارامترهای زیستی شامل کلی‌فرم‌های مدفوعی و کلی‌فرم کل بودند. فلزات سنگین مورد بررسی شامل مس، روی، کادمیوم و سرب بودند. کیفیت آب رودخانه با دستورالعمل‌های کیفیت آب مقایسه شده اند. پوشش زمین با استفاده از شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) مشخص گردیده و با پارامترهای میدانی منتخب کدورت و TDS همبسته شده است. نتایج نشان داده که بیشتر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در طول رودخانه موزوزو زیر حد استانداردهای بودند و کیفیت آب رودخانه نسبتاً خوب ارزیابی شده است. پارامترهایی که زیر آستانه بودند شامل EC، TDS، کلی‌فرم‌ها، BOD، COD، کدورت، و فسفات بودند. با این حال، بر اساس استانداردهای WHO، آب رودخانه موزوزو بدون تصفیه مناسب و مؤثر برای آشامیدن ایمن نیست. کشاورزی و سکونت تأثیر معنی‌داری بر کیفیت آب نداشتند. فعالیت معدنی تأثیر معنی‌دار داشت که با سطوح بالای روی و سرب، به ویژه در فصل خشک، مشهود بود. همبستگی NDVI با پارامترهای کیفیت آب نشان داد که NDVI رابطه مثبت قوی و معنی‌دار با کدورت و TDS در فصل خشک دارد. از این نتایج نتیجه‌گیری شده که پوشش زمین می‌تواند برای پیش‌بینی کدورت در فصل خشک و TDS در فصل مرطوب استفاده شود. کدورت همبستگی مثبت با باندهای آبی، قرمز و نزدیک مادون قرمز تصاویر لندست ۸ نشان داده است. با این حال، همبستگی‌های عمق Secchi و کلروفیلآلفا ضعیف بودند (ماریزی و همکاران ۲۰۲۵).

در تحقیق زهیری و همکاران (۲۰۲۴) سعی شده است تا با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و مدل‌های داده‌کاوی اقدام به برآورد میزان کلروفیل آلفا در مخزن سد سردشت گردد. اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق به دو قسمت تقسیم می‌شوند. قسمت اول مقادیر اندازه‌گیری شده کلروفیل آلفا در مخزن سد سردشت می‌باشد. این اطلاعات شامل ۷ مرحله اندازه‌گیری در ۱۰ نقطه با مختصات مختلف در مخزن سد بوده و مربوط به اسفندماه ۱۳۹۶ تا خردادماه ۱۳۹۸ می‌باشد. قسمت دوم اطلاعات مورد استفاده، تصاویر ماهواره سنتینل–۲ بوده که از اطلاعات آن در مدل–های داده‌کاوی استفاده شده است. اطلاعات باندهای مختلف از تصاویر سنتینل–۲ استخراج گردیده و بر اساس مقادیر باندی، معیارهای سنجش میزان کلروفیل–a محاسبه شده و در داخل مدل‌های داده‌کاوی جهت آموزش قرار گرفته است. از سه مدل داده‌کاوی XGBoost، M5 و MARS جهت برآورد میزان کلروفیل–a استفاده شده است. در این مطالعه، ۹ معادله برآورد کلروفیل–a به عنوان ورودی مدل‌های داده‌کاوی در نظر گرفته شده و مقدار لگاریتم کلروفیل آلفا اندازه‌گیری شده به عنوان خروجی لحاظ گردیده استبر اساس ساختار ارائه شده توسط الگوریتم‌های M5 و MARS، ترکیب‌های باندی آبی، قرمز و سبز و نیز مادون‌قرمز و قرمز تاثیر بالایی بر روی مدل‌های ارائه شده توسط این دو الگوریتم داشته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم XGBoost نشان‌دهنده اهمیت ترکیب‌های باندی آبی، قرمز و سبز بر روی نتایج ارائه شده می‌باشد. بر این اساس ترکیب باندی آبی، قرمز و سبز در هر سه الگوریتم به‌عنوان مهم‌ترین و یا یکی از مهم‌ترین متغیرهای ورودی جهت محاسبه کلروفیل–a مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مدل‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که دو مدل XGBoost و M5 نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل MARS ارائه نمودند. توزیع کلروفیل–a در محدوده مخزن سد سردشت توسط مدل‌های مورد استفاده نشان می‌دهد که در نواحی محدودی از سد، مقادیر ارائه‌شده با مقادیر اندازه–گیری شده همخوانی ندارد که محدود بودن داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده و عدم انطباق کامل زمانی تصاویر سنتینل–۲ با داده‌های اندازه‌گیری در مخزن سد می‌تواند تأثیر مهمی در این زمینه داشته باشد. استفاده از تعداد داده‌های متعدد در مخازن سدهای مختلف، به‌کارگیری مدل‌های داده‌کاوی متنوع و استفاده از تصاویر سایر سنجنده‌ها می‌تواند ابزار مناسبی را در اختیار مدیران مخازن قرار داده تا بتوانند با دقت بیشتری اقدام به ارزیابی کیفی آب مخازن نمایند (زهیری و همکاران، ۲۰۲۴).

در مطالعه چراغپور احمدمحمودی و همکاران (۲۰۲۴)، رابطه بین بازتاب طیفی تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای کیفیت آب (WQP) برای پایش کیفیت آب رودخانه سفیدرود در شمال غربی ایران پرداخته شده است. از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش تعداد WQPها استفاده شده است. پس از پیش‌پردازش ۱۹ تصویر لندست۸ همزمان با نمونه‌برداری WQPها و ادغام باند پانکروماتیک با باندهای طیفی و افزایش وضوح باند به ۱۵ × ۱۵ متر، یافته‌ها برای تعیین رابطه بین بازتاب طیفی و نسبت‌های باندی به کار گرفته شدند. نتایج PCA نشان داد که مجموع آنیون‌ها، مجموع کاتیون‌ها، TDS و EC در مؤلفه اصلی اول و HCO_3^-در مؤلفه اصلی دوم قرار دارند. رابطه این پنج WQP با هفت باند طیفی تکی و ۲۱ نسبت باندی با استفاده از مدل‌های رگرسیون و تخمین منحنی به صورت آماری بررسی شده و بهترین مدل رگرسیون انتخاب شده است. مجموع آنیون‌ها، TDS و EC با باند ۵، مجموع کاتیون‌ها با نسبت باندی ۳/۴ و HCO_3^- با باند ۶ همبستگی داشتند. نقشه‌برداری تغییرات مکانی در WQPها با استفاده از مدل‌های رگرسیون و داده‌های طیفی، مقادیر بالاتری را در مناطق بالادست قبل از سد منجیل نشان داد، مقادیر ورودی سد کاهش و مقادیر خروجی آن افزایش یافت (چراغپور احمدمحمودی و همکاران، ۲۰۲۴).

ژو و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه ای را در مخزن سد Danjiangkou، چین برای ارزیابی میزان همبستگی بین کاربری زمین، محیط آب و فیتوپلانکتون را در کنار شدت‌های مختلف فعالیت‌های انسانی بررسی کرده اند. این بررسی بر اساس مرور داده‌های کاربری زمین، فیتوپلانکتون و کیفیت آب در سال ۲۰۲۱ انجام شده است. ابتدا، تحلیل بر روی پنج ناحیه بافر دایره‌ای تولیدشده اطراف نقاط نمونه‌برداری با شعاع‌های ۵۰۰ متر، ۱۰۰۰ متر، ۱۵۰۰ متر، ۲۰۰۰ متر و ۲۵۰۰ متر انجام شده، که در آن شدت فعالیت انسانی بر اساس امتیاز سطح شدت فعالیت انسانی (HAILS) به دسته‌های کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی گردیده است. این مطالعه سپس به بررسی همبستگی بین کاربری زمین و محیط آب در مقیاس‌های مختلف پرداخته، تفاوت‌های تراکم فیتوپلانکتون و ساختار جامعه را در سطوح مختلف فعالیت انسانی مقایسه کرده و ارتباط بین جوامع فیتوپلانکتون در مخزن Danjiangkou و متغیرهای محیطی تحت شدت‌های مختلف را تحلیل نموده است. یافته‌ها نشان داده که کاربری زمین در ناحیه بافر دایره‌ای ۵۰۰ متری بیشترین تأثیر را بر کیفیت آب مخزن Danjiangkou دارد، به ویژه با افزایش فعالیت‌های انسانی که منجر به سطوح بالای مواد مغذی در آب می‌شود، خطر شکوفایی جلبکی افزایش می یابد. این پژوهش رابطه بین کاربری زمین، محیط آب و پلانکتون را تحت شدت‌های مختلف فعالیت انسانی بررسی می‌کند و به عنوان پایه‌ای برای بخش‌های مدیریت زیست‌محیطی جهت تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و ترویج توسعه پایدار محیط آب حوضه آبریز عمل می‌کند (ژو و همکاران، ۲۰۲۴).

آسیگاید و همکاران (۲۰۲۳) مدلی را برای پایش کیفیت آب با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل ۲ توسعه داده‌اند تا پویایی فضایی-زمانی شاخص‌های کیفیت آب را در مخزن Koka، اتیوپی بررسی بکنند. تحلیل‌های زمانی برای ماه‌های ژوئن ۲۰۲۱ تا می ۲۰۲۲ و سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ انجام شده است. الگوریتم‌ها با استفاده از تحلیل رگرسیون و توسعه مدل‌های تجربی از طریق همبستگی بین داده‌های بازتاب ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های زمینی از کلروفیل-a، کدورت (TU) و مواد معلق کل (TSS) ساخته شدند. تمام پارامترهای تحلیل‌شده دارای ضرایب تعیین بالاتر از ۰٫۶۷ بودند که نشان‌دهنده امکان تبدیل آن‌ها به مدل‌های پیش‌بینی‌کننده بود. بر این اساس، میانگین ماهانه سطوح Chl-a، TU و TSS به ترتیب در بازه‌های (۵۹٫۶۹ تا ۱۴۴٫۲۵ µg/L)، (۷۹٫۶۷ تا ۱۱۵٫۳۹ NTU) و (۳۸٫۴۶ تا ۳۶۸٫۹۷ mg/L) قرار داشت. میانگین سالانه این پارامترها نیز به ترتیب در بازه‌های (۵۲٫۸۶–۹۶٫۱۹ µg/L)، (۷۱٫۰۴–۸۳ NTU) و (۳۶٫۵۸–۲۶.۱۵۹ mg/L) متغیر بود که نشان‌دهنده آلودگی مداوم مخزن طی هفت سال گذشته بود. تحلیل فضایی نشان داده که توزیع Chl-a، TU و TSS ناهمگن است؛ غلظت Chl-a در جنوب و جنوب غربی مخزن بیشتر بود، در حالی که مقادیر بالاتری از TU و TSS در ساحل غربی مخزن مشاهده شده بود (آسیگاید و همکاران، ۲۰۲۳).

گوبری و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی در مورد تاثیر الگوی کاربری/پوشش زمین بر کیفیت آب در حوزه زهکشی سد Mindu انجام داده اند. نتایج نشان داده که پویایی کاربری و پوشش زمین در دوره مطالعه قابل توجه بوده است. همبستگی قوی بین

تغییرات کاربری/پوشش زمین و پارامترهای کیفیت آب آشکار گردید. علاوه بر این، همبستگی قوی بین زمین‌های کشت‌شده و غلظت اندازه‌گیری‌شده مواد مغذی (نیترات و فسفات) و کلروفیل-a مشاهده شد(گوبری و همکاران، ۲۰۲۳).

کمیت و کیفیت آب سدهای موجود در کشور در سال‌های اخیر به دلیل کاهش بی‌سابقه بارش‌ها، تغییرات کاربری اراضی و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی به شدت افت کرده است. یکی از این سدها، سد ستارخان می‌باشد که بر رودخانه اهرچای در ۱۵ کیلومتری غرب شهر اهر در جاده اهر–ورزقان در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. رودخانه اهر در ادامه مسیر خود با پیوستن به رودخانه قره‌سو، به رودخانه ارس متصل شده و در نهایت به دریای خزر می ریزد. آب این سد با حجم مفید تقریبا ۱۲۲ میلیون مترمکعب علاوه بر تامین آب شرب و کشاورزی، تامین کننده بخشی از آب تازه مورد نیاز صنعت مهم معدنی مس سونگون (حدودا ۵ میلیون مترمکعب) می‌باشد از آب این سد همچنین برای اهداف صید تفریحی استفاده می‌شود (رشکوئیه و همکاران، ۱۳۹۳). ورودی آبی این سد هم متاسفانه در سال‌های اخیر به شدت افت داشته است. برای مثال، این سد در سال ۱۳۹۷ تنها ۲۷ میلیون مترمکعب آب دریافت کرده بود (خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا)، ۱۳۹۷). علاوه بر این مطالعه‌ای در مورد تجمع فلزات سنگین در رسوبات، پوشش گیاهی و ماهی‌های این سد، نشان دهنده ریسک بهداشتی و بوم شناختی ورود آلایندها به این سد می‌باشد (رشکوئیه و همکاران، ۱۳۹۳). منطقه مورد مطالعه به دلیل قرارگیری در اقلیم نیمه‌خشک، حساسیت بالای اکولوژیکی و سابقه تخریب مراتع انتخاب شده است. این منطقه با چالش‌هایی همچون خشکسالی‌های مکرر، فشار چرای دام و تغییر کاربری مواجه است که مطالعه آن را ضروری می‌سازد. همچنین با مرور مطالعات پیشین مشخص شد که علی‌رغم تحقیقات گسترده در سایر مناطق، مطالعه جامعی در این منطقه در زمینه اثرات تغییرات کاربری اراضی بر کیفی آب صورت نگرفته است. بیشتر مطالعات موجود یا در مناطق مجاور انجام شده‌اند یا از روش‌های متفاوتی استفاده کرده‌اند. بنابراین، خلأ پژوهشی مشخصی در این موضوع در این منطقه وجود دارد که مقاله حاضر به دنبال پرداختن به آن است.

روش پژوهش

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات کاربری اراضی، اثرات این تغییرات بر کیفیت آب، و تحلیل رابطه بین LULC و پرغذایی در سد ستارخان اهر انجام می‌شود. به همین منظور ابتدا تصاویر ماهواره ای لندست ۵، ۸ و ۹ برای بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ با فاصله زمانی ۱۰ سال تهیه و عملیات پیش پردازش از جمله تلفیق باندهای تصاویر و برش محدوده مورد مطالعه، در محیط نرم‌افزار ENVI5.3 اعمال گردید و در مرحله بعد تصاویر جهت انجام پردازش و استخراج کاربری‌های مختلف به محیط نرم افزار اکوگنیشن[1] وارد شدند. در اینجا ابتدا واحدهای پردازش تصویر (اشیای تصویر) ایجاد شدند. برخلاف روش‌های مرسوم که در آنها کوچک‌ترین واحدهای پردازش پیکسل هست، در روش پردازش شیءگرای تصاویر ماهواره‌ای، کوچکترین واحد پردازش، اشیای تصویر هستند. اشیای تصویر مجموع پیکسل‌های همگن هستند که کنار هم شیء معنی داری را می سازند و باعث بهبود دقت طبقه‌بندی می‌شوند. در اینجا از روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی که بر پایه فازی هست، استفاده شد. پس از سگمنت‌سازی و ایجاد اشیای تصویر، نمونه‌های زمینی به نرم‌افزار آموزش داده شدند و بعد از آن الگوریتم جنگل تصادفی جهت طبقه‌بندی تصاویر اعمال شد و طبقات کاربری اراضی بدست آمدند. پس از انجام طبقه بندی و استخراج کلاس‌های کاربری مختلف، نتایج جهت انجام کارتوگرافی مناسب در محیط GIS خروجی گرفته می‌شوند.

تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌سازی LULC

تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۸ و ۹ برای بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ با فاصله زمانی ۱۰ سال تهیه (جدول ۱) و عملیات پیش پردازش از جمله تلفیق باندهای تصاویر و برش محدوده مورد مطالعه، در محیط نرم افزار ENVI5.3 اعمال شد و در مرحله بعد تصاویر جهت انجام پردازش و استخراج کاربری‌های مختلف به محیط نرم‌افزار eCognition Developer وارد شدند.

1. eCognition Developer

برای اطمینان از یکپارچگی داده‌ها و سازگاری بین حسگرها، فقط از تصاویر بازتاب سطحی از محصولات سطح ۲ مجموعه ۲ سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) استفاده شد. این محصولات، تصحیح جوی دقیق با استفاده از الگوریتم LEDAPS برای TM و الگوریتم LaSRC برای OLI 8/9 و همچنین کالیبراسیون رادیومتری و هندسی را دارند تا داده‌های آماده تجزیه و تحلیل با ویژگی‌های طیفی استاندارد شده در حسگرهای مختلف (USGS, 2021) ارائه دهند. این استانداردسازی از مقایسه مستقیم در بازه‌های زمانی چند دهه‌ای پشتیبانی می‌کند و خطای ایجاد شده توسط تغییرات ابزاری و جوی را محدود می‌کند. پوشش ابر و شناسایی سایه‌های ابر با استفاده از لایه ارزیابی کیفیت پیکسل بیت ماسک ارائه شده با هر صحنه بازتاب سطحی مجموعه ۲ انجام شد و اطمینان حاصل شد که فقط پیکسل‌های غیرابرناکی در تجزیه و تحلیل نقش داشته باشند (USGS, 2021). عملیات پیش پردازش از جمله تلفیق باندهای تصاویر و برش محدوده مورد مطالعه، در محیط نرم افزار ENVI5.3 بر روی آنها اعمال شد. متعاقباً، تصاویر توسط OBIA در نرم‌افزار eCognition Developer 9.1 قطعه‌بندی شدند. برخلاف روش‌های مبتنی بر پیکسل، OBIA تصاویر را به اشیاء فضایی مجاور و طیفی همگن تقسیم می‌کند و با گنجاندن اطلاعات طیفی و زمینه‌ای، دقت طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد (بلاشکه، ۲۰۱۰؛ والدیویزو و همکاران، ۲۰۲۳) . قطعه‌بندی با الگوریتم قطعه‌بندی چندوضوحی (MRS) در eCognition انجام شد تا اشیاء منسجم چشم‌انداز بر اساس همگنی طیفی و مکانی مشخص شوند. در حوزه MRS، از آنجا که تعیین کارآمدترین پارامترهای قطعه‌بندی مانند مقیاس، شکل و فشردگی همچنان چالش‌برانگیز است (فیضی‌زاده و همکاران،۲۰۲۱)، مقیاس‌های segGaraj تعریف‌شده توسط کاربر در OBIA چندین بار انجام شد تا پارامترهای قطعه‌بندی کارآمدتری به دست آید و از آنجایی که حساسیت قطعه‌بندی با ویژگی‌های تصویر و ناهمگونی پوشش زمین تغییر می‌کند (فیضی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۵)؛ این پارامترها تنظیم شدند تا مرزهای معناداری از اشیاء تضمین شود که به طور دقیق توزیع مکانی ویژگی‌های پوشش زمین را در منطقه مورد مطالعه منعکس کنند. یک طبقه‌بندی‌کننده جنگل تصادفی فازی (چن و همکاران، ۲۰۲۴) به دلیل توانایی قوی آن در مدیریت عدم قطعیت طیفی و اثرات پیکسل مختلط رایج در محیط‌های ناهمگن، به کار گرفته شد. داده‌های واقعیت زمینی برای آموزش و اعتبارسنجی بر اساس چارچوب نمونه‌برداری Congalton و Green برداشت شدند. برای شش کلاس کاربری اراضی شامل کشاورزی، آیش، پهنه‌های آبی، مراتع و مناطق ساخته شده در مجموع ۶۰۰ نمونه مرجع (با ۲۴۰ نمونه برای آموزش و ۳۶۰ نمونه برای اعتبارسنجی) انتخاب و به طور متناسب در بین کلاس‌ها توزیع شدند. دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس‌های Confusion و معیارهای دقت کاربر و تولیدکننده مختص هر کلاس ارزیابی شد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده در پژوهش

نوع تصویر	تاریخ	سنجنده	ردیف و گذر
لندست ۵	۱۹۹۴	TM	۱۶۸-۳۳
لندست ۵	۲۰۰۴	TM	۱۶۸-۳۳
لندست ۸	۲۰۱۴	OLI/TIRS	۱۶۸-۳۳
لندست ۹	۲۰۲۴	OLI/TIRS	۱۶۸-۳۳

روش‌ها و تکنیک‌های شیءگرا

تحلیل تصویر مبتنی بر شیء (OBIA) به عنوان یک رویکرد نوین در پردازش تصاویر سنجش از دور، در دهه گذشته مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (آرور و همکاران، ۲۰۱۳). این روش، با تغییر تمرکز از پیکسل‌های منفرد به اشیاء تصویر، امکان استخراج اطلاعات معنایی غنی‌تری را از تصاویر فراهم می‌آورد. در حالی که روش‌های سنتی مبتنی بر پیکسل، هر پیکسل را به عنوان واحد پردازش در نظر می‌گیرند، OBIA با گروه‌بندی پیکسل‌های همگن در قطعات مجزا، اشیاء تصویر را شکل می‌دهد و ویژگی‌های آن‌ها را تحلیل می‌کند (وینرت و همکاران، ۲۰۱۳). هدف OBIA، پرداختن به روابط پیچیده‌ی فضایی و سلسله‌مراتبی بین پیکسل‌های تصویر و کاهش نرخ خطای طبقه‌بندی در تصاویر سنجش از دور با قدرت تفکیک بالا (HR)

است. با توجه به خروجی‌های OBIA، طبقه‌بندی تصاویر به عنصری حیاتی در فرآیند تحلیل کلی تبدیل می‌شود؛ نتایج این طبقه‌بندی بر تصمیمات تحلیلگران سنجش از دور تأثیر گذاشته و چگونگی استفاده نهایی از داده‌های سنجش از دور را تعیین می‌کند (گان و چن، ۲۰۲۳). یکی از مزایای اساسی OBIA، توانایی آن در بهره‌گیری همزمان از اطلاعات مکانی، طیفی و بافتی تصاویر است. این رویکرد امکان در نظر گرفتن روابط پیچیده بین اشیاء تصویر را فراهم می‌آورد، که برای تفسیر و تحلیل الگوهای موجود در تصاویر سنجش از دور با وضوح بالا ضروری است (آرور و همکاران، ۲۰۱۳). برای مثال، در تحلیل پوشش زمین، OBIA می‌تواند به تشخیص و تمایز دقیق‌تر بین انواع مختلف پوشش مانند مناطق شهری، جنگل‌ها و زمین‌های کشاورزی کمک کند (کولکارنی ر و همکاران، ۲۰۲۵). فرآیند OBIA معمولاً شامل سه مرحله کلیدی است: قطعه‌بندی تصویر، تعیین ویژگی‌های اشیاء و طبقه‌بندی (هینجوسا اسپینوزا و همکاران، ۲۰۲۱). در مرحله قطعه‌بندی، پیکسل‌ها بر اساس ویژگی‌های طیفی و مکانی خود در اشیاء همگن گروه‌بندی می‌شوند(دراگوت و بلاشکه، ۲۰۰۶). این قطعات، واحدهای اساسی تحلیل در OBIA را تشکیل می‌دهند. سپس، ویژگی‌های متنوعی مانند شکل، اندازه، رنگ، بافت و روابط فضایی بین اشیاء محاسبه می‌شوند (وینرت و همکاران، ۲۰۱۳). در نهایت، اشیاء بر اساس این ویژگی‌ها و با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی، به دسته‌های مختلف تخصیص داده می‌شوند(دراگوت و بلاشکه، ۲۰۰۶). OBIA به ویژه برای تحلیل تصاویر سنجش از دور با قدرت تفکیک مکانی بالا بسیار مناسب است (هینجوسا اسپینوزا و همکاران، ۲۰۲۱). در این تصاویر، تنوع طیفی درون یک شیء می‌تواند قابل توجه باشد، که روش‌های مبتنی بر پیکسل را با چالش مواجه می‌کند (کولکارنی ر و همکاران، ۲۰۲۵). با این حال، OBIA با تحلیل اشیاء به عنوان واحدهای مجزا، می‌تواند این تنوع را به طور موثرتری مدیریت کرده و نتایج طبقه‌بندی دقیق‌تری را ارائه دهد (دراگوت و بلاشکه، ۲۰۰۶).

قطعه‌بندی تصویر یکی از مراحل حیاتی در OBIA است. روش‌های مختلفی برای قطعه‌بندی تصاویر وجود دارد، از جمله روش‌های مبتنی بر لبه، مبتنی بر منطقه و روش‌های هیبرید. با این حال، یافتن پارامترهای مناسب برای روش‌های مبتنی بر منطقه یک چالش مهم است(حسین و چن، ۲۰۱۹). یکی از چالش‌های مهم در OBIA، انتخاب پارامترهای بهینه برای قطعه‌بندی تصویر است. پارامترهای مختلف می‌توانند نتایج قطعه‌بندی متفاوتی را ایجاد کنند، که به طور مستقیم بر دقت طبقه‌بندی نهایی تأثیر می‌گذارد (حسین و چن، ۲۰۱۹). علاوه بر این، OBIA می‌تواند از نظر محاسباتی پیچیده باشد، به ویژه هنگام کار با تصاویر بزرگ و پیچیده (آرور و همکاران، ۲۰۱۳). OBIA امکان یکپارچه‌سازی بهتر با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) را فراهم می‌کند، زیرا اشیاء تصویر می‌توانند به عنوان واحدهای برداری در GIS مورد استفاده قرار گیرند. این ویژگی OBIA را به یک ابزار قدرتمند برای کاربردهای مختلفی مانند مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی شهری و پایش محیطی تبدیل می‌کند (دراگوت و بلاشکه، ۲۰۰۶).

در سال‌های اخیر، OBIA با تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری عمیق ترکیب شده است تا عملکرد آن بهبود یابد (آژند و همکاران، ۲۰۲۴). این ترکیب امکان خودکارسازی بیشتر فرآیند تحلیل تصویر و استخراج اطلاعات پیچیده‌تر را فراهم می‌کند. با وجود چالش‌ها، OBIA به‌عنوان یک رویکرد امیدوارکننده در پردازش تصاویر سنجش از دور به رشد خود ادامه می‌دهد. توسعه الگوریتم‌های کارآمد، روش‌های خودکار برای انتخاب پارامترها و یکپارچه‌سازی با سایر فناوری‌ها از زمینه‌های تحقیقاتی فعال در OBIA است (حسین و چن، ۲۰۱۹). به طور خلاصه، OBIA یک رویکرد قدرتمند و نوآورانه برای تحلیل تصاویر سنجش از دور است که امکان استخراج اطلاعات غنی‌تر و دقیق‌تر را در مقایسه با روش‌های مبتنی بر پیکسل فراهم می‌آورد (وینرت و همکاران، ۲۰۱۳). با پیشرفت مداوم در این زمینه، انتظار می‌رود که OBIA نقش مهم‌تری در حل چالش‌های مختلف مربوط به سنجش از دور و تحلیل داده‌های فضایی ایفا کند (آرور و همکاران، ۲۰۱۳).

قطعه‌بندی تصاویر

هدف از قطعه‌بندی، تقسیم یک تصویر به مجموعه‌ای از نواحی جدا از هم است که بر اساس ویژگی‌های خاص مانند بافت، رنگ، شکل، اندازه و سطح خاکستری متفاوت هستند (لاکچس و میترا، ۲۰۰۱). سگمنت‌سازی تصویر، به عنوان یک مرحله

اساسی در تحلیل OBIA، فرآیند تقسیم یک تصویر به نواحی همگن یا اشیاء متمایز است. این نواحی باید به گونه‌ای باشند که تا حد امکان، ویژگی‌های مشابهی درون خود داشته باشند و از نواحی مجاور، با ویژگی‌های متفاوت، جدا شوند (حسین و چن، ۲۰۱۹). هدف اصلی سگمنت‌سازی، ساده‌سازی نمایش تصویر و استخراج اطلاعات مفیدتر و قابل تحلیل‌تر است. به عبارت دیگر، سگمنت‌سازی تلاش می‌کند تا پیکسل‌ها را بر اساس ویژگی‌هایی مانند رنگ، شدت، بافت و موقعیت مکانی، در گروه‌هایی دسته‌بندی کند که بازتاب‌دهنده اشیاء یا بخش‌های واقعی در صحنه باشند (وینرت و همکاران، ۲۰۱۳).

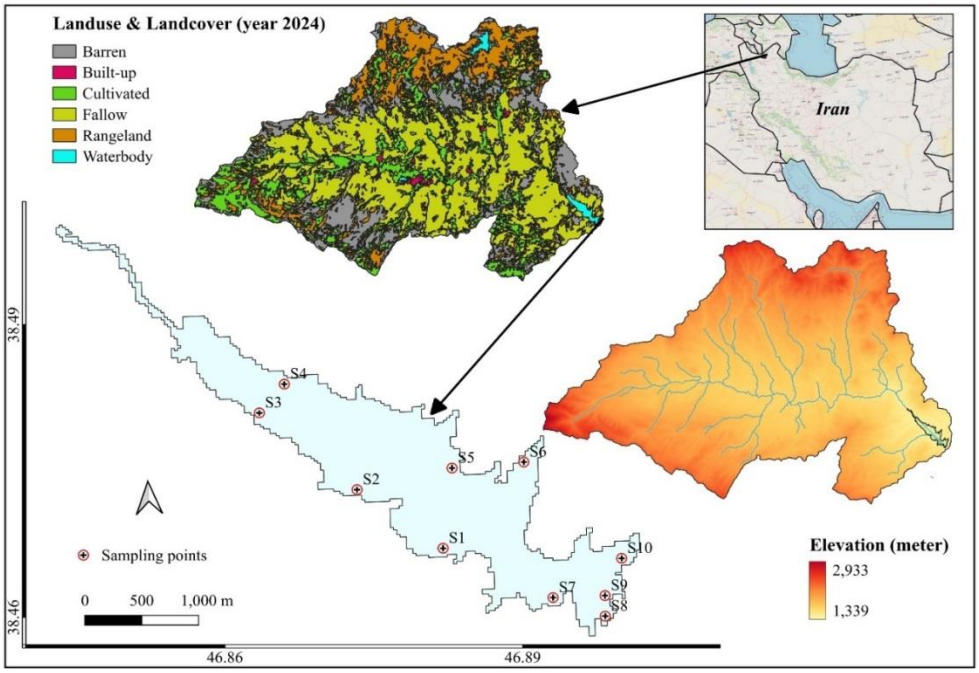
روش‌های متنوعی برای سگمنت‌سازی تصویر وجود دارد که هر کدام نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند . این روش‌ها را می‌توان به طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم کرد: روش‌های مبتنی بر لبه، روش‌های مبتنی بر منطقه و روش‌های هیبرید. روش‌های مبتنی بر لبه، به دنبال شناسایی مرزها یا لبه‌های بین اشیاء هستند. روش‌های مبتنی بر منطقه، پیکسل‌ها را بر اساس شباهت ویژگی‌ها گروه‌بندی می‌کنند. روش‌های هیبرید، از ترکیب این دو رویکرد استفاده می‌کنند تا از مزایای هر دو بهره ببرند. انتخاب روش مناسب سگمنت‌سازی، به عوامل مختلفی از جمله نوع تصویر، پیچیدگی صحنه و هدف تحلیل بستگی دارد (حسین و چن، ۲۰۱۹). سگمنت‌سازی تصویر، نقش حیاتی در موفقیت تحلیل‌های OBIA ایفا می‌کند (هینجوسا اسپینوزا و همکاران، ۲۰۲۱). کیفیت سگمنت‌سازی به طور مستقیم بر دقت و قابلیت اطمینان نتایج طبقه‌بندی و استخراج اطلاعات تأثیر می‌گذارد. سگمنت‌سازی نامناسب می‌تواند منجر به اشیائی شود که به خوبی تعریف نشده‌اند و با واقعیت مطابقت ندارند، که این مسئله تحلیل‌های بعدی را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، انتخاب و تنظیم دقیق پارامترهای سگمنت‌سازی، یک گام ضروری در هر پروژه OBIA است (حسین و چن، ۲۰۱۹). در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های سگمنت‌سازی متعددی توسعه یافته‌اند، از جمله الگوریتم‌های خوشه‌بندی، مبتنی بر گراف، و یادگیری عمیق (حسین و چن، ۲۰۱۹؛ آژند و همکاران، ۲۰۲۴). الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنا (CNNs)، به دلیل توانایی خود در یادگیری ویژگی‌های پیچیده از تصاویر، نتایج امیدوارکننده‌ای در سگمنت‌سازی ارائه داده‌اند. با این حال، انتخاب الگوریتم سگمنت‌سازی مناسب و بهینه‌سازی پارامترهای آن، همچنان یک چالش مهم در OBIA است. ارزیابی کیفیت سگمنت‌سازی، یک جنبه مهم دیگر در پردازش تصاویر OBIA است. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی سگمنت‌سازی پیشنهاد شده‌اند، که دقت و کارایی الگوریتم‌های سگمنت‌سازی را کمی‌سازی می‌کنند. این شاخص‌ها به محققان و کاربران کمک می‌کنند تا بهترین روش سگمنت‌سازی را برای کاربرد خاص خود انتخاب کنند و نتایج را به طور عینی مقایسه کنند (آژند و همکاران، ۲۰۲۴).

در این تحقیق ابتدا واحدهای پردازش تصویر (اشیای تصویر) ایجاد شدند. برخلاف روشهای مرسوم که در آنها کوچک‌ترین واحدهای پردازش پیکسل هست، در روش پردازش شیءگرای تصاویر ماهواره‌ای، کوچکترین واحد پردازش، اشیای تصویر هستند. اشیای تصویر مجموع پیکسل‌های همگن هستند که کنار هم شیء معنی داری را می سازند و باعث بهبود دقت طبقه بندی می‌شوند. در اینجا از روش طبقه بندی جنگل تصادفی که بر پایه فازی هست، استفاده شد. پس از سگمنت سازی و ایجاد اشیای تصویر، نمونه‌های زمینی به نرم افزار آموزش داده شدند و بعد از آن الگوریتم جنگل تصادفی جهت طبقه بندی تصاویر اعمال شد و طبقات کاربری اراضی بدست آمدند. پس از انجام طبقه بندی و استخراج کلاس‌های کاربری مختلف، نتایج جهت انجام کارتوگرافی مناسب در محیط GIS خروجی گرفته می‌شوند.

منطقهٔ مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، چشم‌انداز حوضه آبریز سد ستارخان را با مساحت تقریبی ۹۲۶ کیلومتر مربع پوشش می‌دهد (شکل ۱). مخزن سد ستارخان برای مدیریت منابع آب در منطقه طراحی شده است. این سد، یک سد خاکی با هسته رسی است که تقریباً ۷۵ متر ارتفاع و ۳۵۰ متر طول تاجش است. دارای ظرفیت ذخیره‌سازی آب حدود ۱۳۱ میلیون متر مکعب می‌باشد. مخزن سد نقش حیاتی در کنترل سیل، آبیاری و تأمین آب شهری دارد و از حدود ۱۲۰۰۰ هکتار زمین کشاورزی پشتیبانی می‌کند و آب حیاتی را برای جوامع محلی فراهم می‌کند (مهندسین مشاور کیسون، ۲۰۲۳). ساخت مخزن سد ستارخان باعث تغییرات قابل

توجهی در LULC شده است، از جمله تبدیل مستقیم باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی به مناطق ساخته شده که منجر به از دست رفتن زمین‌های حاصلخیز و همچنین اثرات غیرمستقیم تبدیل زمین‌های دیم و بایر به باغ‌ها و گسترش مناطق ساخته شده می‌شود (فرج زاده و رستم زاده، ۲۰۰۷). این تغییرات تأثیر دوگانه سد بر توسعه و تغییرات زیست‌محیطی را برجسته می‌کند که برای ارزیابی کیفیت آب و سلامت اکولوژیکی بسیار مهم است. تحقیقات اکولوژیکی انجام شده در مخازن سد ستارخان و سهند در طول سال‌های ۲۰۲۲–۲۰۲۳، ۵۵ جنس و ۱۱۵ گونه جلبک، از جمله دیاتوم‌ها، جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها را شناسایی کرد. نوسانات فصلی مشاهده شده، به طوری که دیاتوم‌ها و جلبک‌های سبز در پاییز، زمستان و بهار متنوع‌تر بودند، در حالی که سیانوباکتری‌ها در تابستان رونق داشتند (وحیدی‌فر و عطازاده، ۲۰۲۵).



شکل ۱۰. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Study Area

نتایج و بحث

تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز سد ستارخان اهر طی چهار مقطع زمانی شامل سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴، نشان‌دهنده روندهای معنادار و اثرگذار در ساختار فضایی و بهره‌برداری از منابع زمین در این منطقه است. با توجه به اینکه احداث سد در سال ۲۰۰۰ انجام گرفته است، مقایسه تغییرات پیش و پس از ساخت سد می‌تواند تصویری روشن از نقش پروژه‌های عمرانی بزرگ‌مقیاس در تحول کاربری اراضی ارائه دهد. به‌طور کلی، پس از احداث سد، سهم کاربری‌های وابسته به منابع آب مانند اراضی کشاورزی آیش و زراعی افزایش یافته، در حالی که سهم اراضی بایر و مراتع در دهه نخست پس از ساخت سد کاهش یافته است.

اراضی زراعی در سال ۱۹۹۴ برابر با ۱۲۴/۹۵ کیلومترمربع (۱۳/۴۹ درصد) بوده که در بازه زمانی منتهی به سال ۲۰۰۴ به‌طور چشمگیری به ۱۹۱/۱۱ کیلومترمربع (۲۰/۶۳ درصد) افزایش یافته است. این رشد ناگهانی را می‌توان به اثرات مستقیم احداث سد و بهبود دسترسی به منابع آبی نسبت داد که انگیزه کشاورزی در منطقه را افزایش داده است. با این حال، در سال‌های بعد این میزان اندکی کاهش یافته و در سال ۲۰۲۴ به ۱۷۷/۱۱ کیلومترمربع (۱۹/۱۲ درصد) رسیده است. این روند کاهشی را می‌توان با عواملی چون کاهش بهره‌وری خاک، تغییرات اقلیم، کمبود منابع آب یا مهاجرت جمعیت از بخش کشاورزی به بخش خدمات و صنعت تبیین کرد.

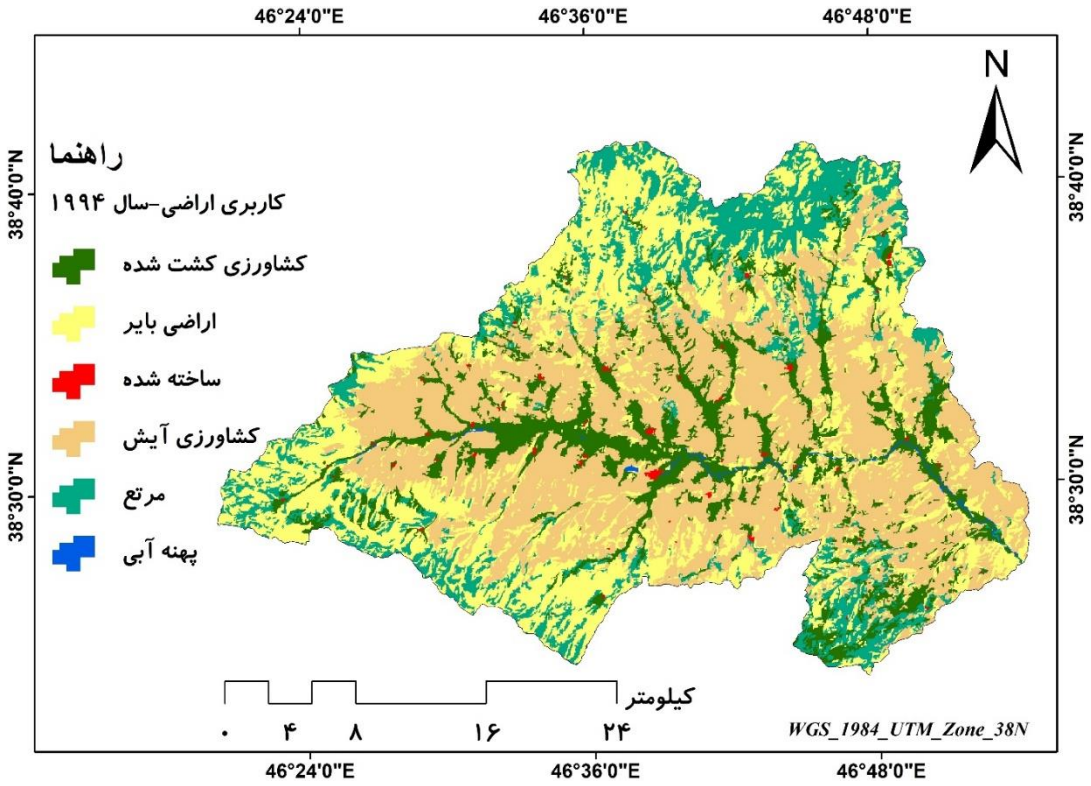
اراضی بایر در سال ۱۹۹۴ با سطحی معادل ۲۸۲/۹ کیلومترمربع (۳۰/۵۴ درصد) سهم عمده‌ای از کاربری‌ها را به خود اختصاص داده بودند. پس از احداث سد، این مقدار به‌طور مستمر کاهش یافته و در سال ۲۰۲۴ به ۲۱۲/۷۵ کیلومترمربع (۲۲/۹۷ درصد) رسیده است. این روند کاهشی نشان می‌دهد که بخشی از اراضی بایر در اثر توسعه زیرساخت‌ها، افزایش بهره‌برداری از زمین و سیاست‌های توسعه‌ای به دیگر کاربری‌ها از جمله کشاورزی، ساخت‌وساز و مراتع تبدیل شده‌اند. هرچند چنین تغییری در ظاهر نشانگر بهبود بهره‌وری اراضی است، اما در صورت نبود ارزیابی‌های محیط‌زیستی مناسب، می‌تواند منجر به تخریب پوشش گیاهی، افزایش فرسایش خاک و کاهش ظرفیت تاب‌آوری بوم‌سازگان شود.

رشد پیوسته اراضی ساخته‌شده نیز از دیگر روندهای قابل‌توجه است. این اراضی از ۳/۱۷ کیلومترمربع (۰/۳۴ درصد) در سال ۱۹۹۴ به ۱۰/۷۳ کیلومترمربع (۱/۱۵ درصد) در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته‌اند. این گسترش را می‌توان نتیجه توسعه شهری، احداث زیرساخت‌های خدماتی، گسترش روستاها و افزایش جمعیت منطقه پس از ساخت سد دانست. افزایش اراضی ساخته‌شده با وجود مزایای اقتصادی و اجتماعی، در بلندمدت ممکن است منجر به فشار بر منابع طبیعی، تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی شود، لذا مدیریت و برنامه‌ریزی کاربری زمین در این بخش از اهمیت بالایی برخوردار است.

سهم تغییرات در زمینه کاربری کشاورزی آیش که در سال ۱۹۹۴ معادل ۳۷۵/۲۲ کیلومترمربع (۴۰/۵۱ درصد) بوده، پس از کاهش در سال ۲۰۰۴ به ۳۴۲/۴۸ کیلومتر مربع (۳۶/۹۸ درصد)، در ادامه با اندکی نوسان به ۳۷۱/۴۴ کیلومترمربع (۴۰/۱ درصد) در سال ۲۰۲۴ رسیده است. کاهش اولیه ممکن است به دلیل تبدیل بخشی از این اراضی به کشت دائم یا توسعه فیزیکی بوده باشد. اما بازیابی آن در سال‌های اخیر می‌تواند نشان‌دهنده بازگشت به الگوهای سنتی کشت، کاهش بهره‌برداری بیش از حد از زمین و یا توجه به نظام‌های زراعی پایدار باشد. اراضی آیش نقش مهمی در بازیابی مواد آلی خاک، کنترل فرسایش، و تعادل اکولوژیکی سامانه‌های کشاورزی دارند و حضور پایدار آن‌ها نشانه‌ای مثبت برای حفظ ظرفیت تولیدی بلندمدت زمین است. باید توجه داشت که کاربری آیش و زمین‌های کشت‌شده، برخلاف دیگر انواع کاربری‌ها، رابطه‌ای دینامیک و متقابل دارند؛ به‌گونه‌ای که تحت تأثیر سیاست‌های کشاورزی، شرایط اقتصادی، تغییرات قیمت محصولات کشاورزی، دسترسی به نهاده‌ها، و وضعیت عرضه و تقاضای بازار، هر ساله بخشی از زمین‌های کشاورزی فعال ممکن است وارد دوره استراحت (آیش) شده و در سال‌های بعد دوباره به چرخه کشت بازگردند. بنابراین، نوسانات بین این دو کاربری نه‌تنها اجتناب‌ناپذیر بلکه جزئی از نظام تصمیم‌گیری رایج در مدیریت مزارع به‌شمار می‌رود. اراضی آیش نقش مهمی در بازیابی مواد آلی خاک، کنترل فرسایش، و تعادل اکولوژیکی سامانه‌های کشاورزی دارند و حضور پایدار آن‌ها نشانه‌ای مثبت برای حفظ ظرفیت تولیدی بلندمدت زمین است.

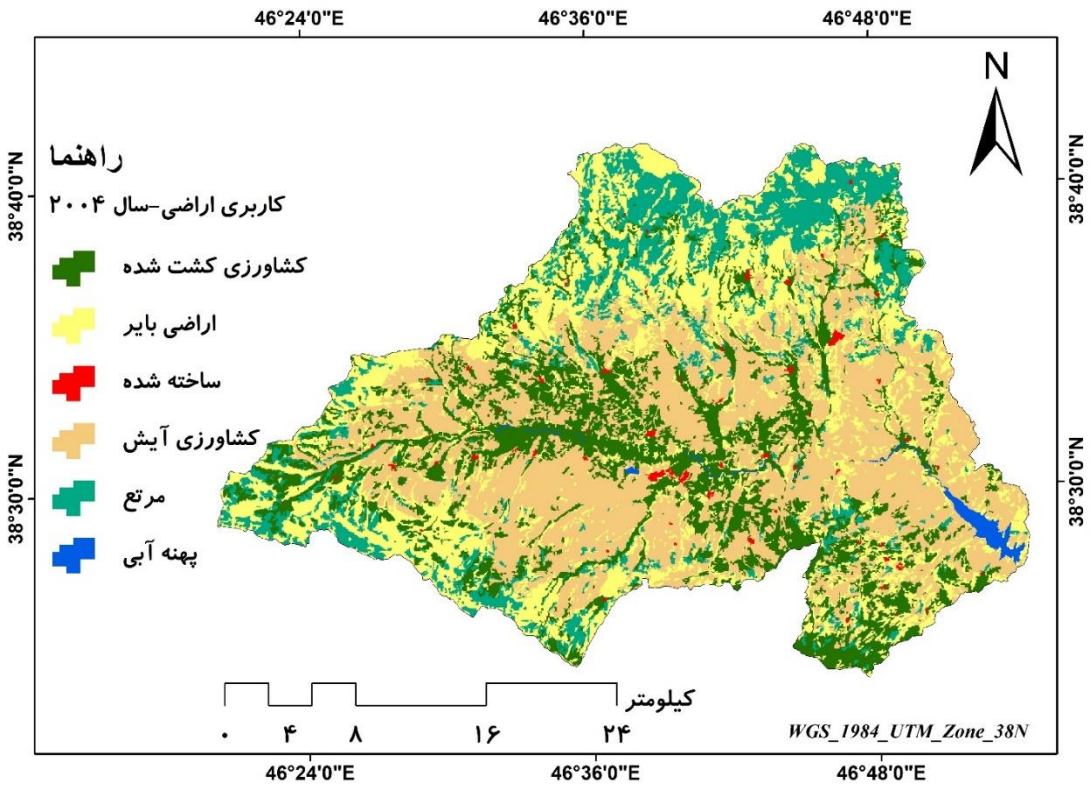
اراضی مرتعی هم که در سال ۱۹۹۴ مساحتی معادل ۱۳۷/۰۵ کیلومترمربع (۱۴/۷۹ درصد) داشتند، پس از کاهش تا سال ۲۰۱۴، در سال ۲۰۲۴ به ۱۴۵/۸۲ کیلومترمربع (۱۵/۷۴ درصد) افزایش یافته‌اند. این تغییر مثبت در سال‌های اخیر را می‌توان نشانه‌ای از اعمال سیاست‌های احیای مراتع، کاهش فشار دامداری بی‌رویه، و یا توسعه اکوتوریسم و رویکردهای حفاظتی دانست. احیای این کاربری از منظر محیط‌زیستی بسیار مهم تلقی می‌شود چراکه مراتع نقش اساسی در حفظ خاک، ذخیره کربن، و پایداری اکولوژیکی دارند.

در نهایت، پهنه‌های آبی از ۲/۷۷ کیلومتر مربع (۰/۳ درصد) در سال ۱۹۹۴ به ۸/۲ کیلومترمربع (۰/۸۸ درصد) در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته‌اند که بیانگر تشکیل مخزن سد و گسترش احتمالی تالاب‌های وابسته به آن است. این تغییر اگرچه از جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی و اقتصادی می‌تواند مثبت ارزیابی شود، اما در صورت افزایش تبخیر و نشت، می‌تواند بر منابع آبی زیرزمینی نیز تأثیر منفی بگذارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که احداث سد ستارخان با ایجاد تغییرات عمده در الگوی کاربری زمین، زمینه توسعه کشاورزی، ساخت‌وساز و احیای برخی منابع طبیعی را فراهم کرده است. با این حال، استمرار این روندها بدون رویکرد مدیریت یکپارچه و پایدار منابع طبیعی می‌تواند پیامدهای ناگواری برای محیط‌زیست و معیشت جوامع محلی در پی داشته باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که در آینده، سیاست‌گذاری‌ها بر اساس پایداری و ظرفیت‌برد زیست‌محیطی منطقه تدوین شود.



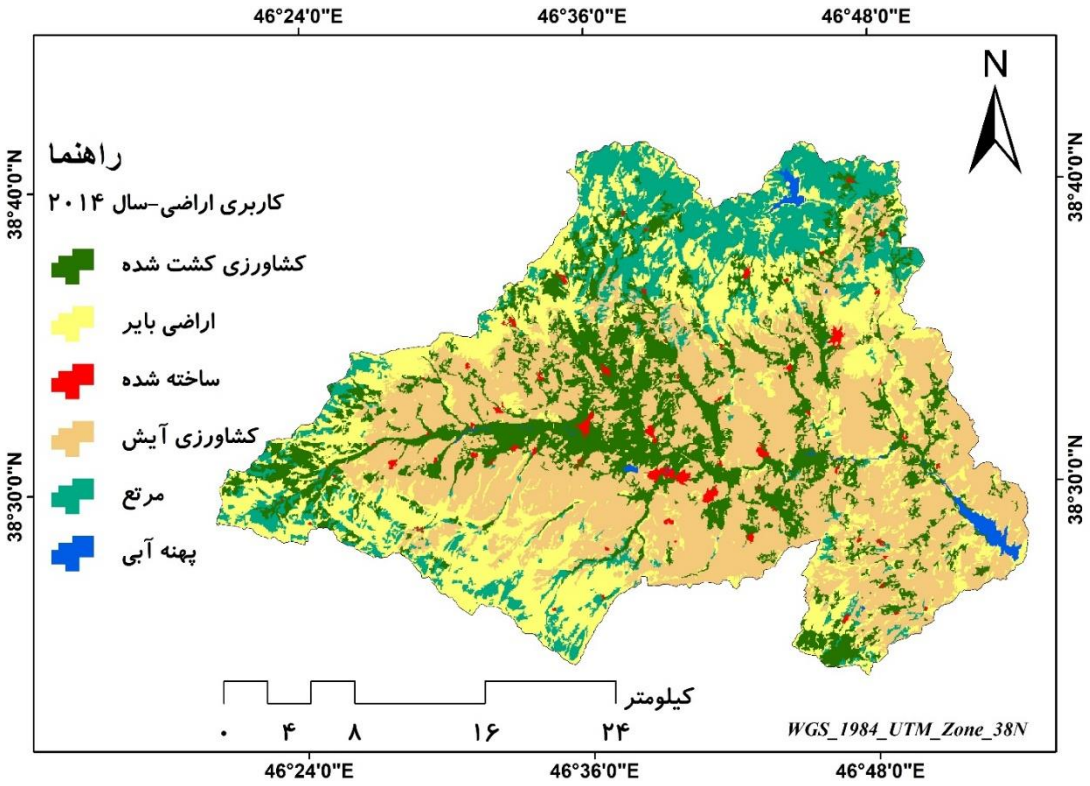
شکل ۲. تغییرات کاربری اراضی سال ۱۹۹٤

Fig. 2. Land Use Change 1994



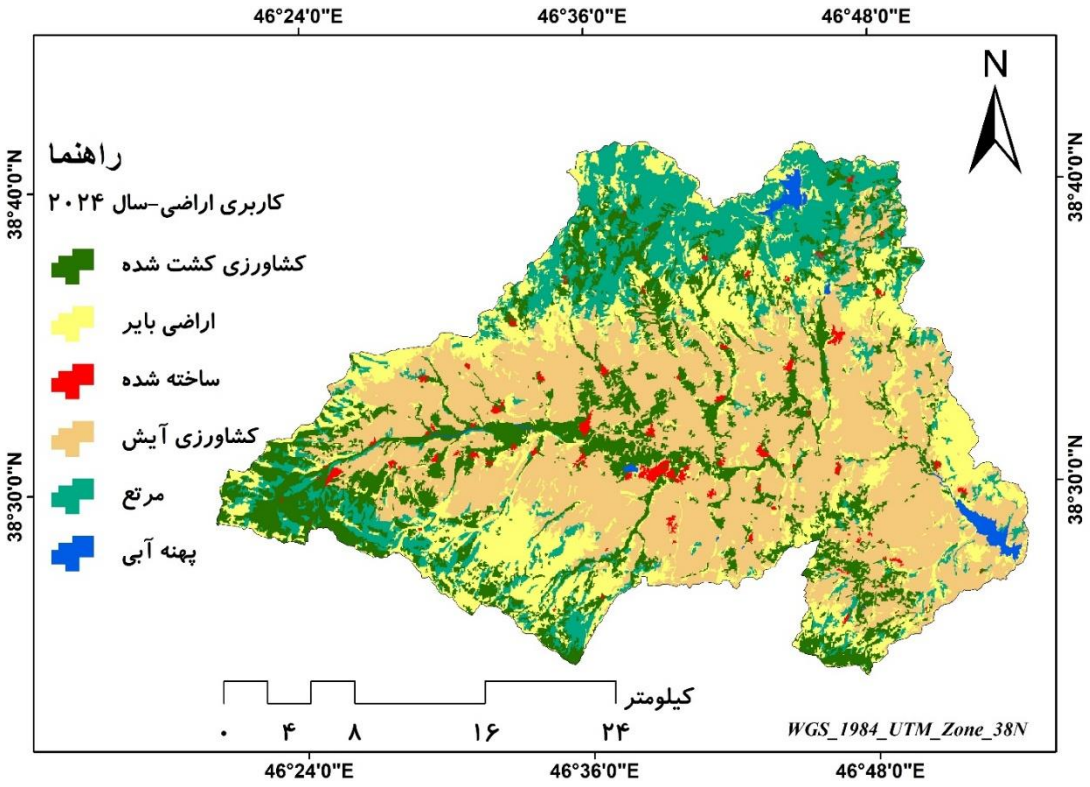
شکل ۳. تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۰٤

Fig. 3. Land Use Change 2004



شکل ٤. تغییرات کاربری اراضی سال ۲۰۱٤

Fig. 4. Land Use Change 2014

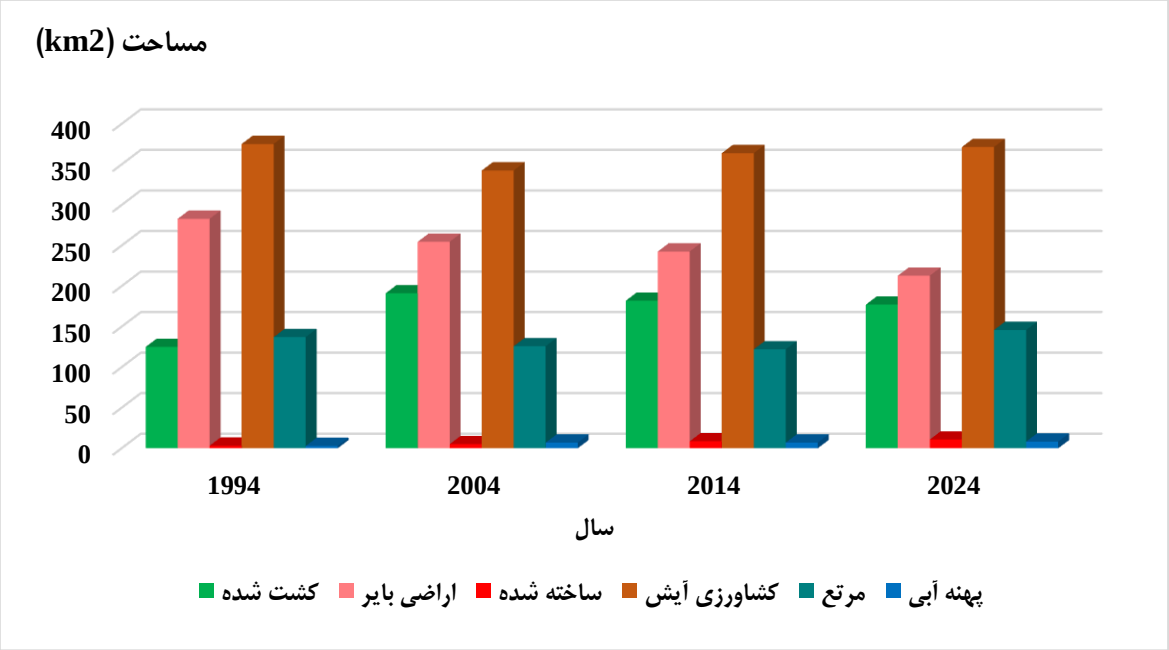


شکل ٥. تغییرات کاربری اراضی ۲۰۲٤

Fig. 5. Land Use Change 2024

جدول۲. مساحت تغییرات کاربری اراضی در ادوار مختلف

کلاس کاربری	۱۹۹٤		۲۰۰٤		۲۰۱٤		۲۰۲٤	
	مساحت (Km^2)	درصد مساحت	مساحت (Km^2)	درصد مساحت	مساحت (Km^2)	درصد مساحت	مساحت (Km^2)	درصد مساحت
کشت شده	۱۲۴/۹۵۳	۱۳/۴۹۲	۱۹۱/۱۱۵	۲۰/۶۳۸	۱۸۱/۹۱۴	۱۹/۶۴۵	۱۷۷/۱۱۵	۱۹/۱۲۵
اراضی بایر	۲۸۲/۹۰۶	۳۰/۵۴۸	۲۵۴/۵۸۰	۲۷/۴۹۱	۲۴۲/۵۵۵	۲۶/۱۹۴	۲۱۲/۷۵۹	۲۲/۹۷۴
ساخته شده	۳/۱۶۹	۰/۳۴۲	۵/۰۶۵	۰/۵۴۷	۸/۶۱۳	۰/۹۳۰	۱۰/۷۳۷	۱/۱۵۹
آیش	۳۷۵/۲۳۸	۴۰/۵۱۸	۳۴۲/۴۸۴	۳۶/۹۸۴	۳۶۳/۸۸۷	۳۹/۲۹۶	۳۷۱/۴۴۴	۴۰/۱۰۹
مرتع	۱۳۷/۰۵۳	۱۴/۷۹۹	۱۲۵/۸۳۴	۱۳/۵۸۸	۱۲۲/۰۲۱	۱۳/۱۷۷	۱۴۵/۸۲۸	۱۵/۷۴۷
پهنه آبی	۲/۷۷۶	۰/۳۰۰	۶/۹۶۰	۰/۷۵۲	۷/۰۱۹	۰/۷۵۸	۸/۱۹۸	۰/۸۸۵
مجموع	۹۲۶/۰۹۳	۱۰۰/۰۰۰	۹۲۶/۰۳۹	۱۰۰/۰۰۰	۹۲۶/۰۰۸	۱۰۰/۰۰۰	۹۲۶/۰۸۲	۱۰۰/۰۰۰



شکل ٦. نمودار تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی مورد مطالعه
Fig. 6. Land Use Change Chart 1994-2024

ارزیابی دقت طبقه بندی

برای ارزیابی طبقه‌بندی‌ها از شاخص‌های دقت کاربر، دقت تولیدکننده، دقت کلی و آماره کاپا استفاده شد. صحت طبقه‌بندی با مقایسه نمونه اشیاء طبقه‌بندی‌شده با اطلاعات زمینی حاصل می‌گردد و مشخص‌کننده کیفیت اطلاعات استخراج‌شده از داده‌های سنجش از دور می‌باشد در این تحقیق برای ارزیابی دقت پارامترهای آماری ضریب کاپا، دقت کلی و ماتریس خطای طبقه‌بندی برای هریک از نقشه‌ها با استفاده از ۶۰ نمونه زمینی تصادفی استخراج و محاسبه گردید، دقت کلی ۰/۹۰۷ و ضریب کاپا ۰/۸۸ بدست آمد.

محاسبه الگوی تغییر کاربری اراضی

معیار پویایی LULC که اغلب نرخ تغییر کاربری زمین یا درجه پویایی نامیده می‌شود و شدت و الگوهای تغییرات پوشش زمین را در طول یک دوره کمّی می‌کند (گیو و همکاران، ۲۰۲۵)؛ محاسبه شد. این یک شاخص حیاتی برای تجزیه و تحلیل تحولات نوع کاربری زمین و پیش‌بینی روندهای آینده است. این معیار به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{(U_b - U_a)}{U_a \times T} \times 100$$ رابطه ۱)

که در آن K به وضعیت یک نوع زمین در یک دوره زمانی اشاره دارد. U_a و U_b به ترتیب مساحت یک دسته کاربری زمین خاص را در ابتدا و انتهای دوره زمانی نشان می‌دهند و T نشان دهنده دوره زمانی است (لی وهمکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۳. درجه پویایی تغییر کاربری اراضی

کاربری	K (1994–2004)	K (2004–2014)	K (2014–2024)	K(1994-2024)
کشاورزی کشت شده	5.29%	-0.48%	-0.26%	1.39%
اراضی بایر	-1.00%	-0.47%	-1.23%	-0.83%
ساخته شده	5.98%	7.00%	2.47%	7.96%
کشاورزی آیش	-0.87%	0.62%	0.21%	-0.03%
مرتع	-0.82%	-0.30%	1.95%	0.21%
پهنه آبی	15.18%	0.04%	1.68%	6.51%

در بازه‌ی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ که همزمان با احداث سد بوده است، بیشترین نرخ تغییر مربوط به کلاس پهنه آبی با مقدار چشمگیر ۱۵/۱۸ درصد در سال است. این افزایش را می‌توان به تغییرات ناشی از توسعه زیرساخت‌های آبی، احداث شبکه‌های آبیاری و مخازن مرتبط با سد نسبت داد. همچنین، اراضی ساخته شده با نرخ ۵/۹۸ درصد وکشت شده با ۵/۲۹ درصد افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده‌ی رشد ساخت‌وسازهای جدید و گسترش اراضی کشت شده پس از احداث سد است. در مقابل، کاربری‌هایی چون مرتع و اراضی بایر کاهش داشته‌اند (به ترتیب با نرخ ۰/۸۲− درصد و ۱− درصد)، که می‌تواند ناشی از تغییرات در اولویت‌های بهره‌برداری از زمین و توسعه فضاهای آبی و شهری باشد.

در بازه‌ی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴، روند تغییرات نسبت به دوره‌ی قبل کمتر بوده است. بیشترین نرخ تغییر مثبت مربوط به اراضی ساخته شده با ۷ درصد در سال است، که نشان‌دهنده‌ی تداوم توسعه شهری و گسترش زیرساخت‌هاست. سایر کلاس‌ها تغییرات بسیار اندک و نزدیک به صفر را تجربه کرده‌اند، که می‌تواند به نوعی پایداری نسبی کاربری‌ها پس از تثبیت وضعیت سد را بیان نماید.

در دوره‌ی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴، باز هم رشد اراضی ساخته شده ادامه داشته اما با سرعتی کمتر (۲/۴۷ درصد در سال). افزایش ملایم در کلاس‌های مرتع ۱/۹۵ درصد و پهنه آبی ۱/۶۸ درصد نیز مشاهده می‌شود که احتمالاً به بهبود الگوهای بهره‌برداری از منابع طبیعی و منابع آبی برمی‌گردد. در مقابل، اراضی بایر کاهش قابل‌توجهی با نرخ ۱/۲۳− درصد را تجربه کرده‌اند که می‌تواند ناشی از تغییر این اراضی به کاربری‌های فعال‌تر مانند مرتع یا کشاورزی باشد.

در مجموع، طی بازه‌ی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴، بیشترین نرخ تغییر مثبت مربوط به اراضی ساخته شده (۷/۹۶ درصد) و پهنه آبی (۶/۵۱ درصد) بوده که بیانگر توسعه انسانی و بهره‌برداری از منابع آبی است. در مقابل، اراضی بایر با نرخ ۰/۸۳− درصد در سال بیشترین کاهش را داشته‌اند که نشان‌دهنده‌ی کاهش مناطق فاقد بهره‌برداری و احتمالاً تبدیل آن‌ها به کاربری‌های مفیدتر است. اراضی کشاورزی کشت شده نیز با نرخ ۱/۳۹ درصد افزایش یافته که شاید ناشی از تغییرات پوشش زمین و یا افزایش مناطق فاقد دسته‌بندی مشخص در داده‌های تصویری باشد.

تحلیل روند تغییرات کاربری زمین در کلاس کشاورزی کشت شده در حوضه‌ی سد ستارخان اهر در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده تأثیرات معنادار احداث این سد بر الگوی فضایی اراضی زراعی منطقه است. سد ستارخان که در سال ۲۰۰۰ احداث شده، یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی و آشامیدنی در شمال‌غرب ایران به‌شمار می‌رود. بررسی نرخ پویایی تغییرات در اراضی کشاورزی آیش نشان می‌دهد که در دوره‌ی پیش از تثبیت عملکرد سد (۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴)، این اراضی با کاهش

سالانه‌ای در حدود ۰/۸۷ درصد مواجه بوده‌اند. این افت می‌تواند ناشی از محدودیت‌های آبی پیش از بهره‌برداری از سد، عملیات عمرانی، تخریب یا جابجایی اراضی در جریان ساخت‌وساز و ناپایداری در شبکه‌های آبیاری باشد. با این حال، در دهه‌ی پس از احداث سد (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴) روند تغییرات معکوس شده و اراضی کشاورزی آیش با نرخ سالانه‌ی ۰/۶۲ درصد افزایش یافته‌اند؛ این رشد را می‌توان نتیجه‌ی بهبود وضعیت تأمین آب، توسعه شبکه‌های آبیاری و بازگشت زمین‌های رهاشده به چرخه تولید دانست. در دهه‌ی اخیر (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴)، این روند افزایشی با نرخی کندتر (حدود ۰/۲۱ درصد در سال) ادامه یافته است، که به نظر می‌رسد نشان‌دهنده رسیدن منطقه به نوعی پایداری و تعادل در بهره‌برداری از اراضی کشاورزی باشد. در مجموع طی سه دهه‌ی اخیر، اگرچه در مقاطع مختلف نوساناتی در سطح اراضی کشاورزی آیش رخ داده، اما نرخ تجمعی تغییرات در این کلاس کاربری تقریباً صفر (۰/۰۳- درصد در سال) بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که احداث سد ستارخان نقش مؤثری در متوقف‌سازی روند کاهشی اولیه و بازگرداندن پایداری به سیستم کشاورزی منطقه داشته است. بنابراین، سد را می‌توان نه‌تنها به‌عنوان یک پروژه زیربنایی آبی، بلکه به‌مثابه ابزاری برای تعدیل فشارهای انسانی بر منابع طبیعی و ساماندهی بهره‌برداری پایدار از اراضی زراعی در نظر گرفت.

شاخص اهمیت تغییر کاربری اراضی

$$I_i = \frac{|\Delta U_i|}{\sum_{j=1}^{n} |\Delta U_j|} \times 100$$

رابطه ۲)

که در آن:

Ii: شاخص اهمیت تغییر برای کلاس کاربری i

ΔUi=Ubi−Uai: تغییر خالص در مساحت کاربری i

∑|ΔUj|: مجموع قدر مطلق تغییرات خالص برای همه کلاس‌ها

n: تعداد کل کلاس‌های کاربری

جدول ٤. شاخص اهمیت تغییر کاربری اراضی

کلاس کاربری	Δ 1994–2004	اهمیت (٪)	Δ 2004–2014	اهمیت (٪)	Δ 2014–2024	اهمیت (٪)	Δ 1994–2024	اهمیت (٪)
کشت شده	66.162	45.774%	-9.201	18.384%	-4.798	6.928%	52.163	35.276%
اراضی بایر	-28.325	19.597%	-12.025	24.027%	-29.796	43.019%	-70.147	47.438%
ساخته شده	1.896	1.312%	3.548	7.089%	2.124	3.067%	7.569	5.119%
کشاورزی آیش	-32.754	22.661%	21.403	42.764%	7.557	10.911%	-3.793	2.565%
مرتع	-11.219	7.761%	-3.813	7.619%	23.807	34.373%	8.775	5.935%
پهنه آبی	4.185	2.895%	0.058	0.116%	1.179	1.702%	5.422	3.667%

کالیبراسیون و ارزیابی مدل

تصاویر چندزمانه Landsat (۱۹۹۴–۲۰۲۴) برای طبقه‌بندی تغییرات کاربری/پوشش زمین و تخمین غلظت کلروفیل–a به کار گرفته شد. نمونه‌های آب به صورت فصلی از ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری که به طور تصادفی انتخاب‌شده بودند، در تاریخ‌های ۱۰ دسامبر ۲۰۲۳، ۸ ژانویه ۲۰۲۴، ۵ آوریل ۲۰۲۴ و ۲۳ ژوئن ۲۰۲۴ ، در مخزن سد ستارخان جمع‌آوری شدند. نمونه‌برداری در عمق کمتر از ۲۰ سانتی‌متر انجام شد تا زیست‌توده فیتوپلانکتون سطحی که نماینده منطقه نوری است، ثبت شود. اندازه‌گیری‌های کلروفیل–a در محل از نمونه‌برداری فصلی از (۲۰۲۳–۲۰۲۴) برای کالیبراسیون مدل‌های تجربی استفاده شد، که مدل توانی با

نسبت باند آبی/سبز بهترین عملکرد را داشت. (4.44±0.30 $\mu g/L$ $(RMSE)$, 3.22±0.21 $\mu g/L$ (MAE), 36.95%±2.80 $(sMPAE)$, and 0.70±0.04 (R^2)) (جدول ۵).

جدول ۵. معیارهای عملکرد مدل‌ها بر اساس ترکیبات باند طیفی. بهترین مدل انتخاب شده برای تخمین غلظت کلروفیل-a در مخزن سد ستارخان با حروف پررنگ نشان داده شده است.

نوع مدل	ترکیب باندی	***RMSE*** **(SE)**	***MAE*** **(SE)**	***sMAPE*** **(SE)**	R^2 **(SE)**
خطی	*Blue/Green*	6.21 (0.29)	5.25 (0.24)	48.62 (2.19)	0.45 (0.02)
	Red/Green	8.53 (0.33)	6.61 (0.28)	47.27 (1.98)	-0.03 (0.01)
	Nir/Blue	8.14 (0.34)	6.35 (0.30)	46.33 (2.76)	0.06 (0.02)
	Red/Nir	6.00 (0.42)	4.81 (0.31)	43.51 (3.06)	0.49 (0.04)
	Blue + Green	8.50 (0.32)	6.62 (0.31)	47.48 (2.18)	-0.03 (0.01)
	Green	8.37 (0.31)	6.53 (0.30)	46.40 (2.08)	0.00 (0.01)
	Blue + Green + Nir	8.55 (0.33)	6.64 (0.27)	47.76 (1.93)	-0.04 (0.01)
توانی	***Blue/Green***	**4.44 (0.30)**	**3.22 (0.21)**	**36.95 (2.80)**	**0.70 (0.04)**
	Red/Green	8.54 (0.33)	6.63 (0.28)	47.59 (2.02)	-0.04 (0.01)
	Nir/Blue	9.38 (0.96)	6.73 (0.46)	48.46 (3.30)	-0.38 (0.36)
	Red/Nir	6.33 (0.74)	4.32 (0.44)	33.59 (2.36)	0.40 (0.11)
	Blue+Green	8.49 (0.32)	6.61 (0.30)	47.53 (2.16)	-0.03 (0.01)
	Green	8.39 (0.32)	6.55 (0.30)	46.93 (2.17)	0.00 (0.01)
	Blue+Green+Nir	8.55 (0.33)	6.64 (0.28)	47.83 (2.00)	-0.04 (0.01)
چندجمله‌ای	*Blue/Green*	4.89 (0.24)	3.90 (0.20)	37.48 (2.52)	0.65 (0.04)
	Red/Green	7.78 (0.29)	6.17 (0.25)	47.94 (2.48)	0.14 (0.02)
	Nir/Blue	8.28 (0.40)	6.24 (0.30)	43.42 (2.33)	0.03 (0.04)
	Red/Nir	6.12 (0.69)	4.11 (0.39)	32.80 (2.69)	0.45 (0.09)
	Blue+Green	8.19 (0.30)	6.56 (0.23)	50.37 (1.71)	0.04 (0.01)
	Green	8.16 (0.30)	6.54 (0.22)	51.04 (1.58)	0.05 (0.01)
	Blue+Green+Nir	8.32 (0.31)	6.58 (0.27)	47.62 (2.46)	0.01 (0.02)
لگاریتمی	*Blue/Green*	6.12 (0.29)	5.20 (0.24)	48.53 (2.12)	0.47 (0.02)
	Red/Green	8.54 (0.33)	6.63 (0.28)	47.41 (1.99)	-0.04 (0.01)
	Nir/Blue	8.12 (0.35)	6.30 (0.30)	45.64 (2.65)	0.06 (0.02)
	Red/Nir	6.13 (0.40)	4.97 (0.31)	44.09 (3.04)	0.47 (0.04)
	Blue+Green	8.48 (0.32)	6.61 (0.30)	47.35 (2.14)	-0.02 (0.01)
	Green	8.33 (0.31)	6.51 (0.30)	46.24 (2.10)	0.01 (0.01)
	Blue+Green+Nir	8.56 (0.33)	6.66 (0.27)	47.90 (1.97)	-0.04 (0.01)
نمایی	*Blue/Green*	5.89 (0.26)	4.86 (0.23)	38.06 (1.46)	0.51 (0.01)
	Red/Green	8.53 (0.33)	6.62 (0.28)	47.51 (2.01)	-0.04 (0.01)
	Nir/Blue	8.31 (0.43)	6.20 (0.30)	43.82 (2.27)	0.02 (0.05)
	Red/Nir	6.42 (0.77)	4.38 (0.47)	33.16 (2.30)	0.38 (0.12)
	Blue+Green	8.51 (0.32)	6.62 (0.30)	47.66 (2.15)	-0.03 (0.01)
	Green	8.42 (0.32)	6.57 (0.31)	47.07 (2.21)	-0.01 (0.01)
	Blue+Green+Nir	489.43 (478.15)	160.38 (152.79)	98.39 (1.27)	-29932.62 (29931.78)

روند تغییرات زمانی و مکانی TSI

نقشه‌های غلظت فصلی کلروفیل-a برای محاسبه TSI فصلی برای سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ استفاده شدند. TSI، معیاری که به طور گسترده برای ارزیابی و طبقه‌بندی وضعیت تغذیه‌گرایی دریاچه‌های آب شیرین و مخازن سد استفاده می‌شود (Carlson, 1977)، پارامترهای کیفیت آب مانند کلروفیل-a، فسفر کل و شفافیت دیسک سچی را با استفاده از معادلات لگاریتمی که تغییرات بهره‌وری بیولوژیکی را منعکس می‌کنند، کمّی می‌کند. TSI بر اساس غلظت کلروفیل-a به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TSI_{Chl_\alpha} = 9.81 \times \ln(Chl_\alpha) + 30.6$$ رابطه ۳)

که در آن کلروفیل-a بر حسب $\mu g/L$ اندازه‌گیری می‌شود و ln نشان دهنده لگاریتم طبیعی است. مقادیر TSI با استفاده از طبقه‌بندی‌های پرغذایی ذکر شده در جدول ۳-۳ تفسیر می‌شوند.

جدول ٦. محدوده‌های شاخص وضعیت پرغذایی (TSI) و طبقات آن به همراه ویژگی‌ها

ویژگی‌ها	طبقه پرغذایی	محدوده TSI
آبهای تمیز با میزان تولید پایین	Oligotrophic	< 30
تولید نسبتا بالا	Oligotrophic	$30 - 40$
تولید متوسط	Mesotrophic	$40 - 50$
تولید بالا، پتانسیل شکوفایی جلبکی	Eutrophic	$50 - 70$
تولید بسیار بالا، وضعیت پرغذایی	Hypereutrophic	> 70

تجزیه و تحلیل تصاویر Landsat در دهه‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ تغییرات زمانی قابل توجهی را در وضعیت پرغذایی مخزن سد نشان داد (جدول ۷ و شکل ۷). میانگین TSI محاسبه شده در فصول مختلف در سال ۲۰۰۴ به طور متوسط ۳/۰۱ بود که نشان‌دهنده شرایط الیگوتروفیک با میزان تولید پایین و آب‌های زلال است. در سال ۲۰۰۴، مخزن سد در مرحله تخلیه پس از ساخت خود بود. کلروفیل-a در ۷۲ درصد از سطح مخزن سد در سطح پایین (۰/۰۵ گرم بر لیتر) بود. میانگین پایین TSI در سال ۲۰۰۴ (۳/۰) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد (جدول ۷). سال ۲۰۱۴، میانگین TSI به شدت به ۵۰/۵ افزایش یافته که نشان‌دهنده شرایط مزوتروفیک به یوتروفیک با شکوفایی بالقوه جلبکی است. در سال ۲۰۲۴، میانگین TSI اندکی به ۳۸/۷ کاهش یافته اما همچنان بالاتر از سال ۲۰۰۴ باقی مانده است که نشان دهنده تغییر به سمت وضعیت مزوتروف است. از نظر فصلی، بهار بالاترین مقادیر TSI را نشان داد که با اوج زیست توده فیتوپلانکتون سازگار است (جدول ۷). در حالی که آمار جدول ۶ زمینه‌ای برای مقادیر TSI فراهم می‌کند، تفاسیر همچنان نسبت به عدم قطعیت‌های بازتاب زمانی حسگر (تغییرات بین لندست ۵ در سال ۲۰۰۴ و لندست ۸ و ۹ در سال‌های بعد) حساس هستند. در نتیجه، بزرگی تغییرات تغذیه‌ای از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ ممکن است تا حدی به حساسیت مدل، مانند اختلالات جوی یا تفاوت‌های کالیبراسیون حسگر مربوط باشد نه صرفاً تغییرات اکولوژیکی.

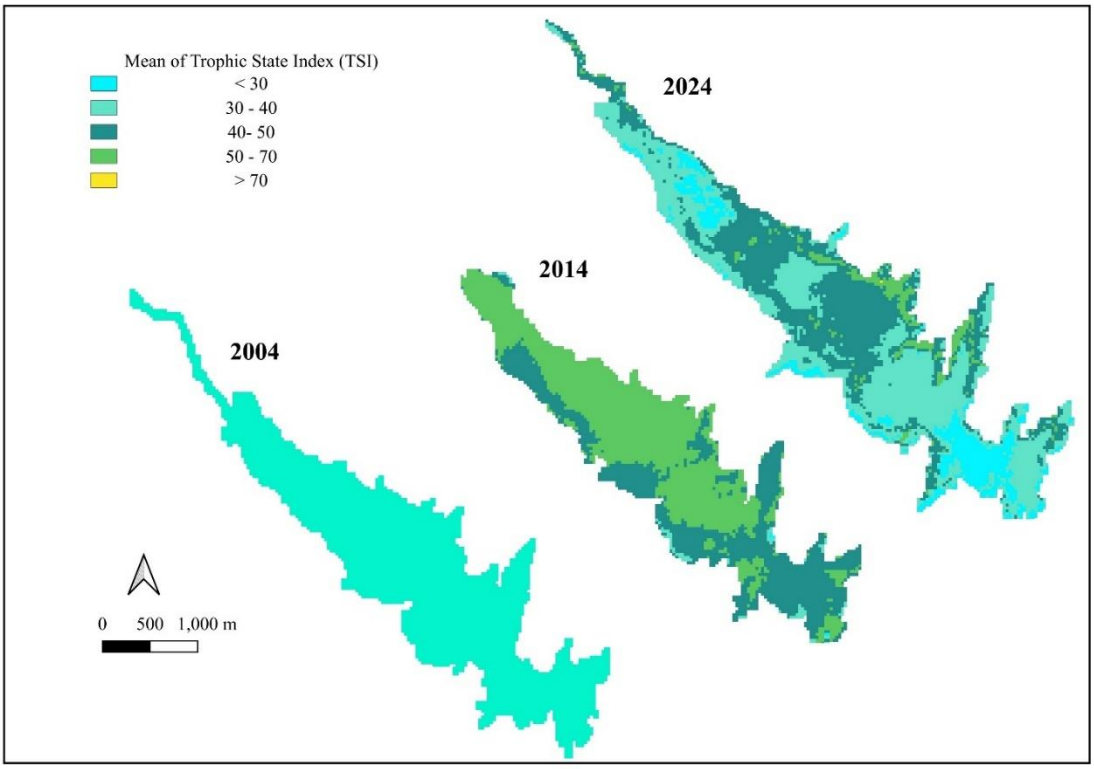
تحلیل GRA

GRA به صورت توصیفی برای بررسی ارتباط بین شاخص پویایی نرمال‌شده LULC و مقادیر TSI نرمال‌شده در طول سه سال مشاهده (۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴) اعمال شد. با توجه به تعداد محدود نقاط زمانی، این تحلیل امکان کمی‌سازی قوی روابط یا رتبه‌بندی قابل اعتماد در مورد اهمیت عوامل را فراهم نمی‌کند. بالاترین GRA برای زمین‌های Built-Up (۱/۰۰) و پس از آن زمین‌های Cultivated (۰/۵۲)، Rangeland (۰/۴۹)، زمین‌های Fallow (۰/۳۹) و زمین‌های Barren (۰/۳۳) به دست آمد.

این مقادیر باید با احتیاط و صرفاً به عنوان نشانه‌های اولیه قدرت ارتباط نسبی در این مجموعه داده محدود تفسیر شوند. آن‌ها شواهدی از پیوندهای علّی یا سلسله مراتب عوامل قطعی ارائه نمی‌دهند.

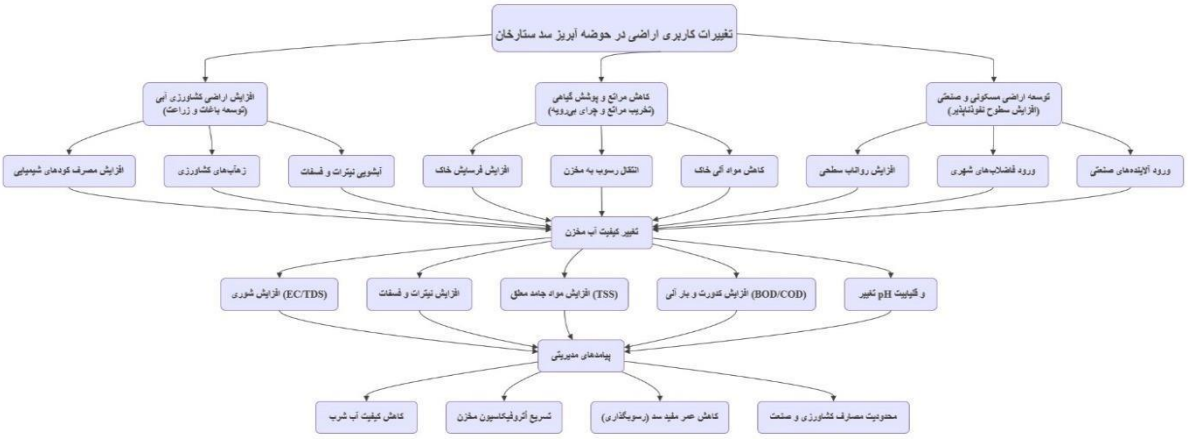
جدول ۷. آمار شاخص وضعیت پرغذایی (TSI) مخزن سد ستارخان، آذربایجان شرقی، ایران

سال	فصل	میانگین	حداقل	حداکثر	میانه	درصدی از پیکسل‌های تصویر که مقدار TSI آن کمتر از ۱/۲ بود
۲۰۰٤	بهار	۵/۵	۱/۲	۳۱/۸	۱/۲	٪۶۰
	تابستان	۱/۵	۱/۲	۳۶/۵	۱/۲	٪۶۶
	پاییز	۳/۸	۱/۲	۴۵/۳	۱/۲	٪۹۰
	زمستان	۱/۳	۱/۲	۵۱/۸	۱/۲	٪۷۳
	متوسط سالانه	۳/۰	۱/۲	۴۱/۴	۱/۲	٪۷۲
۲۰۱٤	بهار	۵۴/۵	۱۸/۲	۷۱/۸	۵۴/۷	٪۰
	تابستان	۴۹/۹	۱۱/۴	۹۷/۹	۴۹/۱	٪۰
	زمستان	۴۶/۷	۱۳/۸	۷۲/۴	۴۶/۲	٪۰
	متوسط سالانه	۵۰/۴	۱۱/۴	۸۰/۷	۵۰/۰	٪۰
۲۰۲٤	بهار	۵۳/۰	۱/۲	۹۰/۰	۵۷/۱	<٪۱
	تابستان	۴۴/۶	۶/۸	۱۳۹/۰	۴۳/۳	<٪۱
	پاییز	۲۹/۳	۱/۲	۹۱/۳	۲۸/۵	<٪۱
	زمستان	۲۸/۰	۱/۲	۷۰/۳	۲۹/۶	<٪۱
	متوسط سالانه	۳۸/۷	۱/۲	۹۷/۷	۳۹/۶	<٪۱



شکل ۷. تغییرات مکانی- زمانی در وضعیت پرغذایی مخزن سد ستارخان، اهر

Fig. 7. Spatial–temporal changes in the trophic status of the Sattarkhan dam reservoir, Ahar



شکل ۸. چارچوب مفهومی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب در مخزن سد ستارخان، اهر

Fig. 8- Conceptual Framework: Impact of LULC on Water Quality in the Satarkhan Dam Reservoir, Ahar

نتیجه‌گیری

در این تحلیل، به بررسی روند تغییرات کاربری زمین در حوضه‌ی آبریز سد ستارخان اهر طی دوره‌ی زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ پرداخته شده است. سد ستارخان در سال ۲۰۰۰ احداث گردیده و این موضوع می‌تواند نقش مهمی در تحولات فضایی و کاربری اراضی منطقه داشته باشد. برای این منظور، نرخ پویایی تغییر کاربری زمین برای هر کلاس کاربری در بازه‌های زمانی ده‌ساله و نیز در کل دوره‌ی ۳۰ ساله محاسبه شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، اراضی کشت شده طی کل دوره‌ی ۳۰ ساله بیشترین تغییر مثبت را داشته است، به‌طوری که با افزایش ۶۶/۱۶۲ کیلومتر مربع، حدود ۳۵/۲۸ درصد از کل تغییرات را به خود اختصاص داده است. این افزایش عمدتاً در بازه‌های ۲۰۱۴ – ۲۰۰۴ (با افزایش ۲۱/۴۰۳ کیلومتر مربع و شاخص اهمیت ۴۲/۷۶ درصد) و ۲۰۲۴ – ۱۹۹۴ (با ۴۵/۷۷ درصد اهمیت) رخ داده است. اراضی بایر نیز طی بازه‌ی ۳۰ ساله کاهش چشمگیری را تجربه کرده‌اند (کاهش ۷۰/۱۴۷ کیلومتر مربع با شاخص اهمیت ۴۷/۴۴ درصد). این کاهش عمده در دو دوره‌ی اول و سوم یعنی ۲۰۰۴– ۱۹۹۴ (کاهش ۲۸/۳۲۵ کیلومتر مربع، اهمیت ۱۹/۶ درصد) و ۲۰۲۴– ۲۰۱۴ (کاهش ۲۹/۸ کیلومترمربع، اهمیت ۴۳/۰۲ درصد) رخ داده است. کاهش گسترده این کلاس احتمالاً به دلیل تبدیل اراضی بایر به زمین‌های زراعی، مرتعی یا حتی مناطق ساخته‌شده است که ناشی از فشار توسعه یا بهبود شرایط زیرساختی از جمله تأمین آب بعد از احداث سد بوده است. کشاورزی آیش نیز در بازه‌ی ۲۰۰۴– ۱۹۹۴ کاهش زیادی داشته است (کاهش ۳۲/۷۵۴ کیلومترمربع، اهمیت ۲۲/۶۶ درصد)، که می‌تواند نشانه‌ای از جایگزینی اراضی آیش با کشاورزی زیرکشت یا تبدیل آن به دیگر کاربری‌ها در دوره‌ی قبل از بهره‌برداری کامل سد باشد. اما از ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ شاهد افزایش دوباره آن هستیم؛ به‌ویژه در بازه‌ی ۲۰۲۴– ۲۰۱۴ که با افزایش ۷/۵۵۷ کیلومترمربع، ۱۰/۹۱ درصد از تغییرات را به خود اختصاص داده است. این روند بهبود بهره‌برداری از منابع آبی در دهه‌های اخیر را منعکس می‌کند. کلاس مرتع نیز در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۴– ۱۹۹۴ با افزایش خالص ۸/۷۷۵ کیلومترمربع و شاخص اهمیت ۵/۹۴ درصد روندی افزایشی دارند. بیشترین افزایش مربوط به بازه‌ی ۲۰۲۴– ۲۰۱۴ (۲۳/۸۰۷ کیلومتر مربع، ۳۴/۳۷ درصد) است. این افزایش ممکن است نتیجه‌ی برنامه‌های احیای مراتع یا بازگشت برخی اراضی به کاربری طبیعی‌تر در سال‌های اخیر باشد. نکته‌ی جالب اینکه این کلاس در بازه‌ی ۲۰۱۴– ۲۰۰۴ کاهش یافته است (کاهش ۳/۸۱۳ کیلومترمربع) که نشان‌دهنده‌ی نوسانات در الگوهای استفاده از منابع طبیعی است. و نهایتاً پهنه‌های آبی با افزایش ۵/۴۲۲ کیلومترمربع در کل دوره و شاخص اهمیت ۳/۶۷ درصد، پهنه‌های آبی تغییراتی نسبتاً محدود ولی پیوسته داشته‌اند. این افزایش عمدتاً در سال‌های اخیر اتفاق افتاده است که ناشی از افزایش ذخیره سد، توسعه شبکه‌های آبیاری و

گسترش مخازن آب سطحی باشد. به طور کلی اراضی بایر و کشاورزی کشت‌شده، بازیگران اصلی تغییرات کاربری زمین بوده‌اند. روندها نشان می‌دهند که سد ستارخان نقش مهمی در تغییر الگوهای بهره‌برداری از زمین به‌ویژه در افزایش زمین‌های کشاورزی و کاهش اراضی بایر داشته است. در دهه‌ی اخیر، نشانه‌هایی از کاهش مجدد کشاورزی کشت‌شده و افزایش مرتع و کشاورزی آیش دیده می‌شود که می‌تواند نشانه‌ای از بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری یا اثرات اقلیمی جدید باشد. کلاس‌های ساخته‌شده و پهنه آبی با وجود سهم کمتر، روندی پیوسته و معنادار داشته‌اند و نمی‌توان آن‌ها را نادیده گرفت.

این مطالعه یک چارچوب جامع و یکپارچه را ارائه می‌دهد که طبقه‌بندی چندزمانه LULC مبتنی بر OBIA، تخمین کلروفیل-a مشتق‌شده از تصاویر لندست، محاسبه TSI و GRA برای روشن کردن تعامل پیچیده بین دینامیک زمین حوضه آبریز و کیفیت آب در مخزن سد ستارخان بعنوان یک منبع آب شیرین حیاتی در آذربایجان شرقی نیمه‌خشک، را ترکیب می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که گسترش مناطق ساخته شده به شدت با افزایش پرغذایی در طول سه دهه مرتبط است و نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت آبخیزداری پایدار را برای کاهش جریان مواد مغذی و حفظ خدمات حیاتی اکوسیستم آب شیرین برجسته می‌کند. GRA، زمین‌های ساخته شده را به عنوان عامل تأثیرگذار بالقوه غالب بر کیفیت آب شناسایی کرد و مداخلات اولویت‌دار مانند زیرساخت‌های سبز و مدیریت بهبود یافته آب‌های سطحی را برای کاهش آلودگی با منشأ شهری پیشنهاد می دهد.

رویکرد سنجش از دور چندزمانه، بینش‌های اکولوژیکی ارزشمندی در مورد چرخه‌های رشد فیتوپلانکتون ارائه داد و از استراتژی‌های مدیریت تطبیقی همسو با فنولوژی شکوفایی فصلی پشتیبانی کرد. دقت بالای طبقه‌بندی LULC مبتنی بر OBIA، همراه با کمی‌سازی کارآمد داده‌های GRA از تعاملات زمین-آب، یک مزیت روش‌شناختی برای ارزیابی‌های دقیق، مکانی و زمانی گسترده کیفیت آب ارائه می‌دهد. با این حال، اذعان می‌شود که نسبت دادن پرغذایی صرفاً به تغییرات LULC، پویایی پیچیده مواد مغذی در مخازن سد را بیش از حد ساده می‌کند. تنوع اقلیمی، فرآیندهای هیدرولوژیکی از جمله بارش و حجم جریان ورودی، شیوه‌های مدیریت مخزن سد و آلودگی منبع نقطه‌ای به طور قابل توجهی بر بارگیری مواد مغذی و کیفیت آب تأثیر می‌گذارند. در نتیجه، عدم وجود این داده‌ها، استنتاج علیت را محدود می‌کند و همبستگی‌های مشاهده شده باید با احتیاط تفسیر شوند. با اذعان صریح به این محدودیت‌ها، این مطالعه دقت علمی خود را حفظ کرده و نتایج را به عنوان پایه‌ای برای تحلیل جامع بیشتر، به جای انتساب قطعی علل، ارائه می‌دهد. این رویکرد محتاطانه، کاربرد یافته‌ها را برای اطلاع‌رسانی در مورد مدیریت تطبیقی مخزن سد و مداخلات حوزه آبخیز در مواجهه با فشارهای محیطی چند عاملی تقویت می‌کند.

این پژوهش باوجود تلاش برای پوشش جامع منطقه، با محدودیت‌هایی همراه بوده است. نخست، داده‌های هواشناسی مورد استفاده از ایستگاه‌های محدودی استخراج شده که ممکن است تغییرات مکانی بارش و دما را به طور کامل منعکس نکنند. دوم، نمونه‌برداری میدانی به دلیل محدودیت دسترسی و زمان، در تعداد محدودی از پلات‌ها انجام شده است که می‌تواند بر دقت برآوردها تأثیر بگذارد. سوم، پدیده پراکنش (پراکنش/فراوانی) گونه‌ها ذاتاً از عامل تصادفی بالایی برخوردار است که کنترل کامل آن در شرایط میدانی امکان‌پذیر نیست. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج این مطالعه می‌تواند تصویر نسبتاً قابل قبولی از وضعیت منطقه ارائه دهد.

چارچوب مفهومی تأثیر تغییرات کاربری اراضی (LULC) بر کیفیت آب مخزن سد ستارخان اهر نشان می‌دهد؛ أولاً تغییرات کاربری اراضی در محدوده حوضه آبریز سد ستارخان به صورت توسعه اراضی مسکونی و صنعتی، افزایش اراضی کشاورزی آبی (توسعه باغات و زراعت) و کاهش مراتع و پوشش گیاهی (تخریب مراتع و چرای بی‌رویه) بوده است. که هرکدام از این تغییرات به نوبه خود سبب افزایش سطوح نفوذ ناپذیر، ورود آلاینده‌های صنعتی و فاضلاب شهری، افزایش رواناب سطحی و سیلاب، کاهش مواد آلی خاک، انتقال رسوب به مخزن سد، افزایش فرسایش خاک، آبشویی نیترات و فسفات، زه‌آب‌های کشاورزی، افزایش مصرف کود و سموم شیمیایی می‌شوند. هرکدام از این عوامل باعث تغییر PH و قلیاییت، افزایش کدورت و بار آلی (BOD/COD)، افزایش مواد جامد معلق (TSS)، افزایش غلظت فلزات سنگین مثل نیترات و فسفات، افزایش شوری

(EC/TDS) و در نهایت تنزل و تغییر کیفیت آب مخزن سد می‌شود. بروز هر کدام از این مسائل زیست محیطی در منطقه می‌تواند چالش‌ها و پیامدهای مدیریتی دشواری را بوجود بیاورد که از بین آنها می‌توان به کاهش کیفیت آب شرب، تسریع پدیده اُتروفیکاسیون، محدودیت در مصارف کشاورزی و صنعت و کاهش عمر مفید مخزن به واسطه رسوبگذاری اشاره نمود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از رساله تقریباً به شکل یکسان می‌باشد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

پژوهش حاضر حمایت مالی نداشته است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به خاطر حمایت معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا) (۱۳۹۷). *کاهش بی‌سابقه‌ی آب سد ستارخان اهر.*

زارع رشکوئیه، مریم؛ حمیدیان، امیرحسین؛ هادی‌پور، باقر و اشرفی، سهراب (۱۳۹۳). بررسی تجمع فلزات سنگین در رسوب، ماهی و گیاه نی در سد ستارخان. *محیط زیست طبیعی (منابع طبیعی ایران)*، ۶۷(۰۱)، ۷۹–۹۰. https://doi.org/10.22059/jne.2014.51001

Arvor, D., Durieux, L., Andrés, S., & Laporte, M.-A. (2013). Advances in Geographic Object-Based Image Analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 125–137. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.003

Assegide, E., Shiferaw, H., Tibebe, D., Peppa, M. V., Walsh, C. L., Alamirew, T., & Zeleke, G. (2023). Spatiotemporal Dynamics of Water Quality Indicators in Koka Reservoir, Ethiopia. *Remote Sensing*, 15(4), 1155. https://doi.org/10.3390/rs15041155

Azhand, D., Pirasteh, S., Varshosaz, M., Shahabi, H., Abdollahabadi, S., Teimouri, H., Pirnazar, M., Wang, X., & Li, W. (2024). Sentinel 1a-2a Incorporating an Object-Based Image Analysis Method for Flood Mapping and Extent Assessment. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *X-1–2024*, 7–17. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-2024-7-2024

Bateni, F., Fakheran, S., & Soffianian, A. (2013). Assessment of land cover changes & water quality changes in the Zayandehroud River Basin between 1997–2008. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(12), 10511–10519. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3348-3

Baughman, C., Jones, B., Bartz, K., Young, D., & Zimmerman, C. (2015). Reconstructing Turbidity in a Glacially Influenced Lake Using the Landsat TM and ETM+ Surface Reflectance Climate Data Record Archive, Lake Clark, Alaska. *Remote Sensing*, 7(10), 13692–13710.

https://doi.org/10.3390/rs71013692

Bhagowati, B., & Ahamad, K. U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(1), 155–166. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004

Bonansea, M., Bazán, R., Germán, A., Ferral, A., Beltramone, G., Cossavella, A., & Pinotti, L. (2021). Assessing land use and land cover change in Los Molinos reservoir watershed and the effect on the reservoir water quality. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103243. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103243

Borderie, F., Alaoui-Sehmer, L., Bousta, F., Alaoui-Sossé, B., & Aleya, L. (2014). Cellular and molecular damage caused by high UV-C irradiation of the cave-harvested green alga Chlorella minutissima: Implications for cave management. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 93, 118–130. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.05.014

Brezonik, P., Menken, K. D., & Bauer, M. (2005). Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM). *Lake and Reservoir Management*, 21(4), 373–382. https://doi.org/10.1080/07438140509354442

Camara, M., Jamil, N. R., & Abdullah, A. F. Bin. (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. *Ecological Processes*, 8(1), 10. https://doi.org/10.1186/s13717-019-0164-x

Carey, R. O., Hochmuth, G. J., Martinez, C. J., Boyer, T. H., Dukes, M. D., Toor, G. S., & Cisar, J. L. (2013). Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: Challenges and research opportunities. *Environmental Pollution*, 173, 138–149. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.004

Chang, N.-B., Yang, Y. J., Daranpob, A., Jin, K.-R., & James, T. (2012). Spatiotemporal pattern validation of chlorophyll- a concentrations in Lake Okeechobee, Florida, using a comparative MODIS image mining approach. *International Journal of Remote Sensing*, 33(7), 2233–2260. https://doi.org/10.1080/01431161.2011.608089

Chawira, M., Dube, T., & Gumindoga, W. (2013). Remote sensing based water quality monitoring in Chivero and Manyame lakes of Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 66, 38–44. https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.003

Chen, C., Yuan, X., Gan, S., Kang, X., Luo, W., Li, R., Bi, R., & Gao, S. (2024). A new strategy based on multi-source remote sensing data for improving the accuracy of land use/cover change classification. *Scientific Reports*, 14(1), 26855. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75329-w

Cheng, C., Zhang, F., Shi, J., & Kung, H. Te. (2022). What is the relationship between land use and surface water quality? A review and prospects from remote sensing perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(38), 56887–56907. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21348-x

Cheraghpour-Ahmadmahmoodi, N., Saadat, M., Zamani-Ahmadmahmoodi, R., & Avokh, A. (2024). A four-season exploration of surface water quality and trophic status in the highly dynamic waters of Karun-4 Dam Lake, SW Iran. *Applied Water Science*, 14(7), 158. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02222-2

Cohen, W. B., & Goward, S. N. (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54(6), 535–545. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2

Dalu, T., Muthivhi, F. F., Dondofema, F., Munyai, L. F., Mpopetsi, P., Dube, T., & Wu, N. (2025). Understanding the Spatiotemporal Variation of Water Quality and Phytoplankton Biomass in Subtropical Reservoir Using the Blue–Sky Multispectral Data. *Ecohydrology*, 18(5). https://doi.org/10.1002/eco.70070

Desta, H., & Fetene, A. (2020). Land-use and land-cover change in Lake Ziway watershed of the Ethiopian Central Rift Valley Region and its environmental impacts. *Land Use Policy*, 96, 104682.

https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104682

Deutsch, E. S., & Alameddine, I. (2019). Hindcasting eutrophication and changes in temperature and storage volume in a semi-arid reservoir: a multi-decadal Landsat-based assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1), 41. https://doi.org/10.1007/s10661-018-7180-7

Deutsch, E. S., Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2018). Monitoring water quality in a hypereutrophic reservoir using Landsat ETM+ and OLI sensors: how transferable are the water quality algorithms? *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3), 141. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6506-9

Dlamini, S., Nhapi, I., Gumindoga, W., Nhiwatiwa, T., & Dube, T. (2016). Assessing the feasibility of integrating remote sensing and in-situ measurements in monitoring water quality status of Lake Chivero, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93, 2–11. https://doi.org/10.1016/j.pce.-2016.04.004

Drăguț, L., & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3–4), 330–344. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.-013

Dube, T., Gumindoga, W., & Chawira, M. (2014). Detection of land cover changes around Lake Mutirikwi, Zimbabwe, based on traditional remote sensing image classification techniques. *African Journal of Aquatic Science*, 39(1), 89–95. https://doi.org/10.2989/16085914.2013.870068

Dube, T., Mutanga, O., Seutloali, K., Adelabu, S., & Shoko, C. (2015). Water quality monitoring in sub-Saharan African lakes: a review of remote sensing applications. *African Journal of Aquatic Science*, 40(1), 1–7. https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1014994

Farajzadeh, A. M., & Rostamzadeh, H. (2007). Evaluating large dam effects on the land use change using RS & GIS (Case study: Sattarkhan Dam). *MJSP*, 11(1), 47–66.

Feizizadeh, B., Kazemi Garajeh, M., Blaschke, T., & Lakes, T. (2021). An object based image analysis applied for volcanic and glacial landforms mapping in Sahand Mountain, Iran. *CATENA*, 198, 105073. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105073

Feizizadeh, B., Kazemi Garajeh, M., Makki, M., Lakes, T., Yakar, M., Naboureh, A., & Thestorf, K. (2025). An integrated object-based-deep learning approach applied for mapping armed conflict impacts and land scars. *Science of Remote Sensing*, 12, 100257. https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.-100257

Ferral, A., Luccini, E., Solis, V., Frery, A., Aleksinko, A., Bernasconi, I., & Scavuzzo, C. marcelo. (2018). IN-SITU AND SATELLITE MONITORING OF THE WATER QUALITY OF A EUTROPHIC LAKE INTERVENED WITH A SYSTEM OF ARTIFICIAL AIREATION. *IEEE Latin America Transactions*, *16*(2), 627–633. https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8327422

Gobry, J. J., Twisa, S. S., Ngassapa, F., & Kilulya, K. F. (2023). Impact of land-use/cover change on water quality in the Mindu Dam drainage, Tanzania. *Water Practice & Technology*, 18(5), 1086–1098. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.067

Guan, Q., Feng, L., Hou, X., Schurgers, G., Zheng, Y., & Tang, J. (2020). Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111890. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111890

Gun, Z., & Chen, J. (2023). Novel Knowledge Graph- and Knowledge Reasoning-Based Classification Prototype for OBIA Using High Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 15(2), 321. https://doi.org/10.3390/rs15020321

Guo, Y, Li, S., Liu, R., & Zhang, J. (2021). Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin. *Hupo Kexue*, 33, 737–748.

Guo, Y., Liu, Y., Li, W., Cai, X., Liu, X., & Liao, H. (2025). Multi-Scale Impacts of Land Use Change on River Water Quality in the Xinxian River, Yangtze River Basin. *Water*, 17(10), 1541. https://doi.org/10.3390/w17101541

Hicks, B. J., Stichbury, G. A., Brabyn, L. K., Allan, M. G., & Ashraf, S. (2013). Hindcasting water clarity from Landsat satellite images of unmonitored shallow lakes in the Waikato region, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9), 7245–7261. https://doi.org/10.1007/-s10661-013-3098-2

Hinojosa-Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C., & Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluación de parámetros de segmentación en OBIA para la clasificación de coberturas del suelo a partir de imágenes VANT. *Revista de Teledetección*, 58, 89. https://doi.org/10.4995/raet.-2021.14782

Hossain, M. D., & Chen, D. (2019). Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150, 115–134. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009

Jordan, Y. C., Ghulam, A., & Herrmann, R. B. (2012). Floodplain ecosystem response to climate variability and land-cover and land-use change in Lower Missouri River basin. *Landscape Ecology*, 27(6), 843–857. https://doi.org/10.1007/s10980-012-9748-x

Kayson Engineering. (2023). *Sattarkhan (Ahar) Clay Core Earth Dam and Related Facilities*. https://www.kayson-ir.com/project/sattarkhan-ahar-clay-core-earth-dam-and-related-facilities/

Khandelwal, S. (2021). *Impact of Land Use Land Cover Change on Sambhar Lake*. 127–151. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8331-9.ch007

Kulkarni, K., K Desai, P., PN, C., & S, R. (2025). Comparison of Pixel-based and Object-based Image Analysis for LULC Classification of Satellite Imagese. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 73(2), 177–184. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I2P115

Le Moal, M., Gascuel-Odoux, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., & Pinay, G. (2019). Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment*, 651, 1–11. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

Li, Y., Cai, Y., Fu, Q., Zhang, X., Wan, H., & Yang, Z. (2024). Dynamics of land use/land cover considering ecosystem services for a dense-population watershed based on a hybrid dual-subject agent and cellular automaton modeling approach. *Engineering*, 37(1), 182-195. https://doi.org/10.-1016/j.eng.2023.10.015

Lucchese, L., & Mitra, S. K. (2001). Colour segmentation based on separate anisotropic diffusion of chromatic and achromatic channels. *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing*, 148(3), 141. https://doi.org/10.1049/ip-vis:20010229

Majozi, N. P., Salama, M. S., Bernard, S., Harper, D. M., & Habte, M. G. (2014). Remote sensing of euphotic depth in shallow tropical inland waters of Lake Naivasha using MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, 148, 178–189. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.025

Marghany, M., & Hashim, M. (2010). MODIS satellite data for modeling chlorophyll-a concentrations in Malaysian coastal waters. *International Journal of Physical Sciences*, 5(10), 1489–1495.

Marisi, D. P., Suprihatin, Hariyadi, S., & Kaswanto, R. L. (2025). The impacts of land use and cover change on water quality of watershed basin. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(2), 573–592. https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.02.12

McCarthy, M. J., Muller-Karger, F. E., Otis, D. B., & Méndez-Lázaro, P. (2018). Impacts of 40 years of land cover change on water quality in Tampa Bay, Florida. *Cogent Geoscience*, 4(1), 1422956. https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1422956

McCullough, I. M., Loftin, C. S., & Sader, S. A. (2012). Combining lake and watershed characteristics with Landsat TM data for remote estimation of regional lake clarity. *Remote Sensing of Environment*, 123, 109–115. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.006

McCullough, I. M., Loftin, C. S., & Sader, S. A. (2013). Lakes without Landsat? An alternative approach to remote lake monitoring with MODIS 250 m imagery. *Lake and Reservoir Management*, 29(2), 89–98. https://doi.org/10.1080/10402381.2013.778926

Miller, J. D., Schoonover, J. E., Williard, K. W. J., & Hwang, C. R. (2011). Whole Catchment Land Cover Effects on Water Quality in the Lower Kaskaskia River Watershed. *Water, Air, & Soil Pollution*, 221(1–4), 337–350. https://doi.org/10.1007/s11270-011-0794-9

Padedda, B. M., Sechi, N., Lai, G. G., Mariani, M. A., Pulina, S., Sarria, M., Satta, C. T., Virdis, T., Buscarinu, P., & Lugliè, A. (2017). Consequences of eutrophication in the management of water resources in Mediterranean reservoirs: A case study of Lake Cedrino (Sardinia, Italy). *Global Ecology and Conservation*, 12, 21–35. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.08.004

Sudheer, K. P., Chaubey, I., & Garg, V. (2006). Lake Water Quality Assessment From Landsat Thematic Mapper Data Using Neural Network: an Approch to Optimal Band Combinatin Selection 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(6), 1683–1695. https://doi.org/10.-1111/j.1752-1688.2006.tb06029.x

USGS. (2021). *Landsat Collection 2 Surface Reflectance Product Description*. U.S. Geological Survey. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance

Vahidifar, A., & Atazadeh, E. (2025). Investigation of algal community and water quality of Sattarkhan and Sahand dams in East Azarbaijan province. *Taxonomy and Biosystematics*. https://doi.org/10.22108/tbj.2025.144776.1303

Valdivieso-Ros, C., Alonso-Sarría, F., & Gomariz-Castillo, F. (2023). Impact of segmentation algorithms on multisensor LULC classification in a semiarid Mediterranean area. *Earth Science Informatics*, 16(4), 3861–3883. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01124-2

Wienert, S., Heim, D., Kotani, M., Lindequist, B., Stenzinger, A., Ishii, M., Hufnagl, P., Beil, M., Dietel, M., Denkert, C., & Klauschen, F. (2013). CognitionMaster: an object-based image analysis framework. *Diagnostic Pathology*, 8, 34. https://doi.org/10.1186/1746-1596-8-34

Wienert, S., Heim, D., Kotani, M., Lindequist, B., Stenzinger, A., Ishii, M., Hufnagl, P., Beil, M., Dietel, M., Denkert, C., & Klauschen, F. (2013). CognitionMaster: an object-based image analysis framework. *Diagnostic Pathology*, 8, 34. https://doi.org/10.1186/1746-1596-8-34

Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010

Zahiri, J., Cheraghi, M., & Salarijazi, M. (2024). Simulating chlorophyll a in dam reservoirs using remote sensing and data-driven approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(3), 85–108. https://doi.org/https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22570.3739

Zareh Reshqueih, M., Hamidian, A. H., Poorbagher, H. and Ashrafi, S. (2014). Investigation of Heavy Metal Concentrations in Sediment, Fish and Common Reed in Sattarkhan Dam, Azarbayjan-Sharghi, Iran. Journal of Natural Environment, 67(1), 79-90. doi: 10.22059/jne.2014.51001

Zhu, Y., Gao, J., Zhao, H., Deng, S., Lin, M., Wang, N., Liu, M., Hu, S., & Luo, L. (2024). Land Use Impact on Water Quality and Phytoplankton Community Structure in Danjiangkou Reservoir. *Diversity*, 16(5), 275. https://doi.org/10.3390/d16050275