University of Sistan and Baluchestan

Geography and Development

Print ISSN: 1735 - 0735 Online ISSN: 2676-7791

Homepage: https://gdij.usb.ac.ir

Assessment of Soil Erosion and its Relationship with Geomorphic and Vegetation Indices in the Kozeh topraghi Watershed, Ardabil Province

Mousa Abedini[1]✉, Amirhesam Pasban[2], Nasrin Hasanzadeh Babolan[3]

1. Professor of Physical Geography (Geomorphology), University Of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
✉ E-mail: Abedini@uma.ac.ir
2. Ph. D Student of Physical Geography (Geomorphology), University Of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
E-mail: A.hesam773@ gmail.com
3. M. Sc of Physical Geography (Geomorphology), University Of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
E-mail: nhasanzadeh54@gmail.com

How to Cite: Abedini, M; Pasban, A.H; & Hasanzadeh Babolan, N. (2024). Assessment of Soil Erosion and its Relationship with Geomorphic and Vegetation Indices in the Kozeh topraghi Watershed, Ardabil Province. *Geography and Development*, 22 (77), 55-80.

http://dx.doi.org/10.22111/gdij.2024.47961.3619

Received:
13 March 2024
Received in revised form:
8 April 2024
Accepted:
23 April 2024
Published online:
1 January 2025

ABSTRACT

Soil erosion is one of the environmental problems that is a threat to natural resources, agriculture and environment, and in this regard, time and place information of soil erosion plays an effective role in management measures, erosion control and watershed management. Therefore, the aim of this research is to investigate the amount of soil erosion in Kozehh Topraghi watershed with the model (RUSLE) and its relationship with vegetation indicators. To achieve the goal of the research, the RUSLE experimental model, which includes R, K, LS, C and P factors, has been used. For this purpose, using the rain gauge data obtained from the Meteorological Organization, the soil texture layer 1:250000 of Iran, the digital model of 30 meters height of Aster and also the satellite image of Landsat 8 OLI have been prepared in the environment of the geographic information system (GIS) and after overlapping layers, the amount of annual soil erosion at the basin level was estimated. In the next step, the geomorphic and vegetation indices that are effective in the occurrence of soil erosion include topographic moisture index (TWI), waterway power index (SPI), domain curvature index (Curvatore), section curvature index (Profil Curvatore), surface curvature index (Plan) Curvatore) and Normal Vegetation Index (NDVI) were created in ArcMap environment and zoning maps were prepared. In line with this, GIS 10.8, ENVI 5.6, Excel, Word software were used to prepare maps as well as analysis. The results of this study showed that the amount of soil erosion for the whole basin was estimated between 0 and 26.63 tons per hectare per year. In another study, the relationship between geomorphic indices and vegetation cover with annual soil erosion rate was conducted, and the results showed that surface curvature indices and normal vegetation cover are the most influential with correlation coefficients of 0.39 and 0.26, respectively, compared to other indices. Also, Curvatore has the least effect with a value of 0.021. Therefore, it is concluded that based on the results obtained from the analysis of parameters related to erosion in the RUSLE model, as well as the indicators used in relation to soil erosion, finally, the surface curvature index and the vegetation index as an influencing factor compared to other parameters have the highest performance in the estimation of watershed soil erosion. The results of this research confirm the possibility of combining effective geomorphic and vegetation indicators on erosion, as well as the possibility of using other effective indicators and RS and GIS capabilities to quantitatively estimate soil erosion values.

Keywords:
Geomorphic,
Soil erosion,
Vegetation cover index,
RUSLE,
Kozehh topraghi.

© the Author(s). **Publisher:** University of Sistan and Baluchestan

1. Introduction

Soil erosion and sediment production in watersheds have become an environmental issue. Thus, preventing soil erosion plays a vital role in protecting natural resources. The increase in soil loss in watersheds is a persistent challenge exacerbated by population growth, pressure on natural resources, and unsustainable agricultural practices on sloped lands. This phenomenon leads to reduced productivity in these areas. Over the past 40 years, the Universal Soil Loss Equation (USLE) has been the most widely used method for estimating soil erosion potential and assessing the impacts of various management practices due to its straightforward calculations and unique characteristics. The USLE was developed by the U.S. Department of Agriculture in 1978 to predict the amount of soil eroded over time. Researchers have introduced a newer version of the USLE called the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), which provides more accurate estimates of the R, K, C, and P factors of soil erosion. Although this model

is empirical, it allows for the integration of Remote Sensing (RS), Geographic Information Systems (GIS), and RUSLE to produce cost-effective and more precise estimates of soil erosion and its geographical distribution over larger areas.

2. Methods and Material

In this study, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was used to estimate soil erosion in the study area. To achieve this goal, Landsat 8 OLI satellite images from 2022 were obtained from the U.S. Geological Survey website (www.usgs.gov). After performing radiometric corrections, including atmospheric correction using Flaash, the images were utilized to create a vegetation cover map. Additionally, digital layers at a scale of 1:25,000 from the National Cartographic Center, a digital elevation model with 30-meter resolution (Aster), and monthly and annual rainfall data from the National Meteorological Organization (for the years 2013-2022) were employed, along with the soil texture map of Iran at a scale of 1:250,000. The software used for mapping and producing the maps included ENVI 5.3 and ArcGIS 10.8, while SPSS and Excel were utilized for statistical calculations and regression analysis.

3. Results and Discussion

To assess the soil erosion potential in the studied watershed, factors affecting erosion such as rainfall, soil type, slope, vegetation cover, and soil conservation practices were analyzed. Using multi-year rainfall data and the Fournier index, the erosivity due to rainfall in different areas of the watershed was calculated. Additionally, based on soil type and topographic characteristics, soil erodibility and topographic factor maps were created. The NDVI vegetation index was also utilized to determine the impact of vegetation on erosion. Ultimately, the final soil erosion map for the watershed was generated by overlapping the RUSLE model layers in ArcMap and using the Raster Calculator tool. The annual soil erosion varied between 0 and 63.26 tons per hectare, with the highest amounts observed in the northeastern parts and scattered throughout the southern areas of the watershed. Next, geomorphic indices including SPI, TWI, NDVI, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, and Slope were calculated for the watershed. The correlation of these indices with soil erosion was statistically tested using Pearson correlation coefficients and regression analysis. The results indicated that among the extracted indices, Slope, Plan Curvature, Profile Curvature, Surface Curvature, and Topographic Wetness Index had the highest impact on soil erosion in the Kozeh-Touparaq watershed, with determination coefficients of 0.78, 0.40, 0.20, 0.06, and 0.03, respectively. In contrast, the normalized difference vegetation index and the stream power index showed an inverse relationship with annual soil erosion. The results of the correlation between erosion and the studied indices are presented in figures 13 to 19. In other words, the relationship between soil erosion and the studied indices was statistically tested using Pearson's method (Table 4), revealing a significant inverse relationship between annual soil erosion and the normalized difference vegetation index, while significant direct relationships were found with the Slope, Plan Curvature, and Profile Curvature indices.

4. Conclusion

This study investigated soil erosion in the Kozeh-Touparaq watershed in Ardabil using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The results indicate that the average annual soil erosion is 6.93 tons per hectare, influenced by geomorphic factors and vegetation cover. Erosion levels in this watershed vary from 0 to 63.26 tons per hectare per year. The indices used, including NDVI, Topographic Wetness Index, and Stream Power Index, suggest that increased slope and length can exacerbate erosion. Moreover, the Slope and Plan Curvature indices have the most significant impact on erosion. It is recommended that farmers adopt conservation measures in agricultural areas to prevent soil loss and take action on runoff management and the protection of arable land.

Keywords: Geomorphic, Soil erosion, Vegetation cover index, RUSLE, Kozehh topraghi.

5. References

Abedini, M., Abolfathi, D., Raisi, M (2022). The Ranking of Razan Basin Erosion by Using the Fuzzy Logic, EPM and BLM Model in GIS Environment. Geography and Development, 20(68), 62-86.
Doi:10.22111/GDIJ10.22111.2022.7002 [In Persian].

Abedini, M., Bahramnia Gojabeiglo, F., Mostafazadeh, R., Pasban, A (2023). Investigating the Effect of Land Use Change on Soil Erosion and Sediment Yield in Razeychay Watershed During Past 20 Years. Journal of Geography, Urban and Regional Studies, 12(45), 114-133.
Doi: 20.1001.1.20087845.1402.12.45.7.9 [In Persian].

Abedini, M., Javadi, S., Mostafazadeh, R., & Pasban, A (2022). Relationship of Vegetation and Geomorphic Indices with Erosion and Sediment Rates in Koozeh Topraghi Watershed. Hydrogeomorphology, 9(32), 128-105.
https://doi.org/10.22034/hyd.2022.51464.1636 [In Persian].

Ahmadi, H. 1388 Applied geomorphology (water erosion), 6th edition, Tehran University Press. 507. [In Persian].

Ammar, A.K., Alaa, m., Fadhil, K., Alzahrani, H., Hamad, S (2023). Predicting Soil Erosion Rate at Transboundary Sub-Watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model, Sustainability, Vol 15, 1776.
https://doi.org/10.3390/su15031776

Arnoldus, H.M.J (1980). approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation M, De Boodt, D. Gabriels (Eds.), Assessment of Erosion, Wiley, Chichester, 127-132.
DOI: 10.4236/jgis.2012.46061

Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W., Musarat, M. A., Jabbar, T., Zafar, A (2010). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan, Ain Shams Engineering Journal, Vol 12, No 2, 1637-1649.
https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.015

Babolimoakher, H., Taghian, A., Shirani, K (2019). Assessment of Landslide Susceptibility Zoning Map Using Confidence Factor-Logistic Regression Hybrid Method By Means of Geomorphometric Indices, Quantitative Geomorphological Research, 7(3): 91-116.
Doi:20.1001.1.22519424.1397.7.3.6.4 [In Persian].

Brini, I., Dimitrios, D., Kalaitzidis, Ch (2021). Linking Soil Erosion Modeling to Landscape Patterns and Geomorphometry: An Application in Crete, Greece, Appl. Sci, Vol 11, No 5684, 1-38.
https://doi.org/10.3390/app11125684

Chi, W., Wang, Y., Lou, Y., Na, Y., Luo, Q (2022). Effect of Land Use/Cover Change on Soil Wind Erosion in the Yellow River Basin since the 1990s, Sustainability, Vol 14, No 19, 1-16.
https://doi.org/10.3390/su141912930

Choudhury, M.K., Nayak, T (2003). Estimation of soil erosion in Sagar Lake catchment of Central India Proc, International Conference on Water and Environment, 387-392.
https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-015-0034-1

Dabral, p.p., Baithuri, N., Pandey, A (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing, Water Resources Management, Vol 22, No 12, 1783-1798.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-008-9253-9

Elsayed, A., Mostafa, A., Farag, O., Ahmad, B., Dmitry, E., Mohamad, S (2023). Integration of RUSLE Model, Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Soil Erosion Hazards in Arid Zones, Agriculture, Vol 13, No 35, 1-19.
DOI:10.3390/agriculture13010035

Esfandiari Darabad, F., Mostafazadeh, R., Pasban, A. H., Nezafat Takleh, B (2022). Integrating terrain and vegetation indices to estimate and identify the soil erosion risk Amoughin watershed, Ardabil, Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 9(1): 77-96.
Doi:20.1001.1.22519424.1397.7.3.6.4 [In Persian].

Ghorbani, A., Hezbavi, Z., Mostafazadeh, R., & Alaei, N (2021). Analysis the Relationship between Landscape Metrics and Soil Erosion of Koozeh Topraghi Watershed, Ardabil Province. Journal of Geography and Environmental Hazards, 9(4), 65-91.
Doi: 10.22067/geoeh.2021.67020.0 [In Persian].

Imajjane, L., Belfoul, M., Elkadiri, R., Stokes, M (2020). Soil erosion assessment in a semi arid environment: a case study from the Argana Corridor, Morocco, Environmental Earth's sciences, Vol 79, 409.
https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-020-09127-8

Kelarestaghi, A.A, Ahmadi, H., Jafari, M., & Ghodsi, J (2009). Probabilistic Probabilistic Prediction of land use change from frost to dry farming using Bayesian Theorem Modeling in Farm Rimdrainge Basin. Pajohesh-Va-Sazandegi, 21(IN NATURAL RESOURCES (SPECIAL ISSUE)), 52-62.
Doi: 20.1001.1.20087845.1402.12.45.7.9 [In Persian].

Maleki, S., Khormali, F., & Karimi, A. R (2014). Mapping Soil Organic Matter Using Topographic Attributes and Geostatistic Approaches in Toshan Area, Golestan Province, Iran. Iranian Journal of Soil Research, 28(2), 459-468.
https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1042417.html [In Persian].

Moore, I.D ., Grayson, R.B (1991). Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application, Hydrol. Vol 5, 3-30.
https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103

Motamedirad, M., Zangane Asadi, M. A., Ajam, H (2023). Investigating the rate of soil erosion and sediment production using the RUSLE model and the modified method PSIAC (case study: kal basin of Ismail , Shahrood city, Semnan province). Quantitative Geomorphological Research, 11(4), 147-165.
Doi:10.22034/GMPJ.2022.360813.1374 [In Persian].

Noraei Sefat E, Bakhtyari Kia M, Akbarian M. Investigation of Soil Loss Changes with an Emphasis on Runoff Erosion in the Kol River Catchment. E.E.R. 2023; 13 (1) :70-95.
Doi:20.1001.1.22517812.1402.13.1.3.5 [In Persian].

Olorunfemi, I.E., Komolafe, A.A., Fasinmirin, J.T., Olufayo, A.A. Akande, S.O (2020). A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models CATENA, Land, Vol 194, 104725.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725

Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C (2007). Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing, Water Resources Management, Vol 21, No 4, 729-746.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-006-9061-z

Qin, Ch. Z., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B. L., Scholten, T., Behrens, T., Zhou, CH. H (2009). An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient, Precision Agriculture, Vol 12, No 1, 32-43.
DOI:10.1007/s11119-009-9152-y

Rejith, R.G., Anirudhan, s (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in hard rock Terrain Using Integrated Remote Sensing GIS and MCDM Techniques A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India, Gis and Geostatistical Techniques for Groundwater science, 349-364.
DOI:10.1016/B978-0-12-815413-7.00025-0

Renard, K.G. Freidmund, J.R (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factorin the RUSLE, Journal of Hydrology, Vol 157, 287-306.
https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4

Sharma, A (2010). Integrating Terrain and Vegetation Indices for Identifying Potential soil Erosion Risk Area, Geo-Spatial Information Science, Vol 13, No 13, 201-209.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11806-010-0342-6

Shin, G.J (1999). The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Gang-won National University, 47.
DOI: 10.4236/ojapps.2012.24B038

Ugese, A., Ajiboye, J., Ibrahim, E., Gajere, E., Shaba, A (2022). Soil Loss Estimation Using Remote Sensing and RUSLE Model in Koromi-Federe Catchment Area of Jos-East LGA, Plateau State, Nigeria, Geomatics, Vol 2, 499-517.
https://doi.org/10.3390/geomatics2040027

Vijith, H., Seling, L.W., Dodge-Wan, D (2018). Estimation of soil loss and identification of erosion risk zones in a forested region in Sarawak, Malaysia, Northern Borneo, Environment, Development and Sustainability, Vol 20, No 3, 1365-1384.
https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-017-9946-4

Wang, S., Wente, G.Z., Gertner, A (2020). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images Int. J.Remote Sens,Vol 23, No 18,3649-3667.
https://doi.org/10.1080/01431160110114538

Waseem, M., Iqbal, F., Humayun, M., Latif, M., Javed, T., Leta, M (2023). Spatial Assessment of Soil Erosion Risk Using RUSLE Embedded in GIS Environment: A Case Study of Jhelum River Watershed, Applied sciences, No 13: 1-16.
https://doi.org/10.3390/app13063775

Whittington, D (2022). Improving the Performance of Contingent Valuation Studies in Developing Countries, Environ. Resour. Econ, No 22, 323-367.
https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015575517927

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D (1978). Predicting rainfall erosion, losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Handbook, Washington DC, Vol 537, 13-27.
DOI: 10.4236/jep.2016.710114

Zakeri, R., & Falah, S (2023). Evaluation of Water Erosion Hazard Map Using the Combination of the RUSLE Model and Gully Erosion Density Map in Alamarvdasht Watershed of Fars Province, Iran. Quantitative Geomorphological Research, 11(4), 189-209.
Doi:10.22034/GMPJ.2022.360905.1375 [In Persian].

Zandi, J., Habibnejad Roshan, M., & Solaimani, K (2013). Soil erosion risk assessment and its relationship with some environmental parameters (Case study: Vazroud watershed, Mazandaran). Journal of Range and Watershed Managment, 66(3), 401-415.
https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.36516 [In Persian].

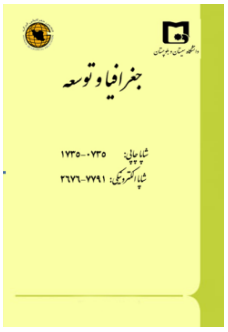
جغرافیا و توسعه
شاپا چاپی: ۰۷۳۵-۱۷۳۵ شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۱-۲۶۷۶
https://gdij.usb.ac.ir
دانشگاه سیستان و بلوچستان

بررسی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی، استان اردبیل

دکتر موسی عابدینی*[1]، امیرحسام پاسبان[2]، نسرین حسن‌زاده بابلان[3]

مقاله پژوهشی

جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۷۷، زمستان ۱۴۰۳
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴
صفحات: ۸۰-۵۵



واژه‌های کلیدی:
ژئومورفیک، فرسایش خاک، شاخص پوشش گیاهی، «RUSLE»، کوزه‌توپراقی.

چکیده

فرسایش خاک، یکی از مشکلات محیطی است که تهدیدی برای منابع طبیعی، کشاورزی و محیط‌زیست به شمار می‌رود. در این راستا، اطلاعات زمانی و مکانی از فرسایش خاک در اقدامات مدیریتی، کنترل فرسایش و مدیریت حوضه‌های آبخیز نقش مؤثری دارند؛ بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی میزان فرسایش خاک درحوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی با مدل«RUSLE» و ارتباط آن با شاخص‌های پوشش گیاهی می‌باشد. برای دست یافتن به هدف تحقیق، از مدل تجربی «RUSLE» که شامل عامل‌های، R، K، LS، C و P است، استفاده شده است. بدین‌منظور به‌ترتیب با استفاده از داده‌های باران‌سنجی أخذ شده از سازمان هواشناسی، لایهٔ بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران، مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر «Aster» و همچنین تصویر ماهواره‌ای «لندست ۸ OLI» در محیط سامانهٔ اطلاعات مکانی«GIS» تهیه شده‌اند و پس از روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، مقدار فرسایش سالانهٔ خاک در سطح حوضه برآورد شد. در گام بعد، شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی که در رخداد فرسایش خاک مؤثر هستند شامل: شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، شاخص انحناء دامنه (Curvatore)، شاخص انحناء مقطع (Profil Curvatore)، شاخص انحناء سطح (Plan Curvatore) و شاخص پوشش گیاهی عادی (NDVI) در محیط « ArcMap» ایجاد شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند. در راستای این امر از نرم‌افزارهای «GIS 10.8، ENVI 5.6، Excel و SPSS» جهت تهیهٔ نقشه‌ها و همچنین تجزیه‌وتحلیل استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان‌داد که مقدار فرسایش سالانهٔ خاک برای کل حوضه در دامنهٔ بین ۰ تا ۲۶/۶۳ تن در هکتار در سال برآورد شد. در بررسی دیگر، ارتباط بین شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی با میزان فرسایش سالانهٔ خاک انجام پذیرفت که نتایج آن نشان‌داد شاخص‌های: شیب، انحناء سطح، انحناء مقطع، انحناء دامنه و رطوبت توپوگرافی به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۸، ۰/۴۰، ۰/۲۰، ۰/۰۶ و ۰/۰۳ بیش‌ترین تاثیرگذاری را در فرسایش خاک حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی داشته‌اند، در حالی‌که شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده و توان آبراهه به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۳ و ۰/۱۱ رابطه‌ای معکوس با فرسایش سالانهٔ خاک داشته‌اند. نتایج این پژوهش امکان تلفیق شاخص‌های مؤثر ژئومورفیک و پوشش گیاهی بر فرسایش و نیز امکان استفاده از سایر شاخص‌های مؤثر و قابلیت‌های «RS» و «GIS» را جهت تخمین کمّی مقادیر فرسایش خاک تأیید می‌نماید.

مقدمه

فرسایش خاک و تولید بار رسوب در حوضه‌های آبریز، به معضلی زیست‌محیطی تبدیل شده است؛ بنابراین جلوگیری از فرسایش خاک، نقش حیاتی در حفاظت از منابع طبیعی ایفا می‌کند. افزایش هدر رفت خاک در حوضه‌های آبریز، چالشی مداوم است که با افزایش جمعیت، فشار بر منابع طبیعی و کشت‌وکارهای ناپایدار در خاک‌ها و اراضی شیب‌دار، تشدید می‌شود. این پدیده کاهش تولید در اراضی را به‌دنبال دارد *(معتمدی‌راد و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۴۸)*. در طی ۴۰ سال اخیر مدل «USLE» به‌سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد اثرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بوده است که دارای ویژگی‌ها و دامنه کاربردی منحصربه‌فرد خود

۱. استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (نویسنده مسئول) Abedini@uma.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری گروه جغرافیا طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران A.hesam773@gmail.com
۳.کارشناس ارشد گروه جغرافیا طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران nhasanzadeh54@gmail.com

است *(Waseem et al, 2023: 2)*. معادلهٔ جهانی هدر رفت خاک (USLE) توسط بخش کشاورزی ایالات متحده در سال ۱۹۷۸ برای پیش‌بینی میزان خاک فرسایش‌یافته در طول زمان ایجاد شد *(Whittington, 2022: 330)*. محققان نسخهٔ جدیدتری از مدل «USLE» با نام معادله تجدیدنظرشدهٔ جهانی هدر رفت خاک (RUSLE) ارائه داده‌اند که برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای R، K، C و P فرسایش خاک را ارائه می‌دهد. این مدل علی‌رغم این‌که یک روش تجربی است، امکان ترکیب «RS، GIS و RUSLE» را جهت برآوردهای فرسایش خاک و توزیع جغرافیایی آن با هزینه‌های قابل قبول و با دقت بیش‌تر در مناطق بزرگ‌تر تولید می‌کند *(Ammar et al, 2023: 2)*. تاکنون مطالعات زیادی درخصوص فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل ژئومورفیک در داخل و خارج کشور انجام گرفته است برای مثال اسلم[1] و همکاران (۲۰۱۰)، جهت برآورد فرسایش خاک در ناحیهٔ «چیترال پاکستان» از مدل «RUSLE» بهره‌گرفتند. نتایج حاکی از این بود که میزان هدر رفت سالانهٔ خاک برابر با ۴۵۰ تن در هکتار در سال بود. همچنین در بین عامل‌های اثرگذار در مدل «RUSLE» فاکتور توپوگرافی بیش‌ترین تاثیرگذاری را داشت. ایماجین[2] و همکاران (۲۰۲۰)، میزان فرسایش خاک در منطقهٔ «آرگانا مراکش» را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده «RUSLE» انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که متوسط هدر رفت سالانهٔ خاک برابر با ۴۷/۵۲ تن در هکتار در سال به‌دست آمد.

بیرنی[3] و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی به ارتباط فرسایش خاک با عوامل محیطی و ژئومورفومتری منطقهٔ «کرت»، یونان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که عوامل محیطی بسیاری از جمله پوشش گیاهی و توپوگرافی تأثیر زیادی بر میزان فرسایش خاک دارند. همچنین رابطه‌ای قوی بین مدل‌سازی فرسایش خاک با عوامل محیطی و مورفومتری وجود دارد. چی[4] و همکاران (۲۰۲۲)، اثرات تغییر پوشش گیاهی بر فرسایش خاک در حوضهٔ آسیای مرکزی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهندهٔ این بود که شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) همبستگی بالاتری را با بارش (۸۰/۵) دارد. یوگس[5] و همکاران (۲۰۲۲)، جهت برآورد تلفات خاک حوضهٔ آبریز فلات در نیجریه را با استفاده از سنجش از دور و مدل جهانی فرسایش خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که میزان هدر رفت خاک در حوضه با تأثیر شیب زیاد و میزان بارندگی تشدید می‌شود و این عامل باعث نگرانی بزرگ در مورد میزان بارش سالانهٔ پیش‌بینی‌شده تا ۱۲ درصد در غرب آفریقا ایجاد می‌کند.

الصیاد[6] و همکاران (۲۰۲۳)، مدل‌سازی فرسایش خاک در تونس را با استفاده از مدل «RUSLE» و «GIS» مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که تونس در معرض خطر جدی فرسایش خاک است و ۶/۴۳ درصد از مساحت کل کشور تحت تأثیر نرخ بسیار بالای هدر رفت خاک است (بیش از ۳۰ تن در هکتار در سال). در ایران نیز اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۱)، با ادغام شاخص‌های محیطی و پوشش گیاهی خطر فرسایش خاک در حوضهٔ آبخیز «عموقین» در استان اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که مقدار متوسط فرسایش سالانهٔ خاک برای کل حوضه در دامنهٔ بین ۱/۱۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال متغیر است. همچنین بررسی روابط رگرسیونی بین فاکتورهای «RUSLE» و مقدار فرسایش سالانهٔ خاک نشان‌داد که فاکتور توپوگرافی دارای

1. Aslam
2. Imajjane
3. Birini
4. Chi
5. Ugese
6. Elsayyad

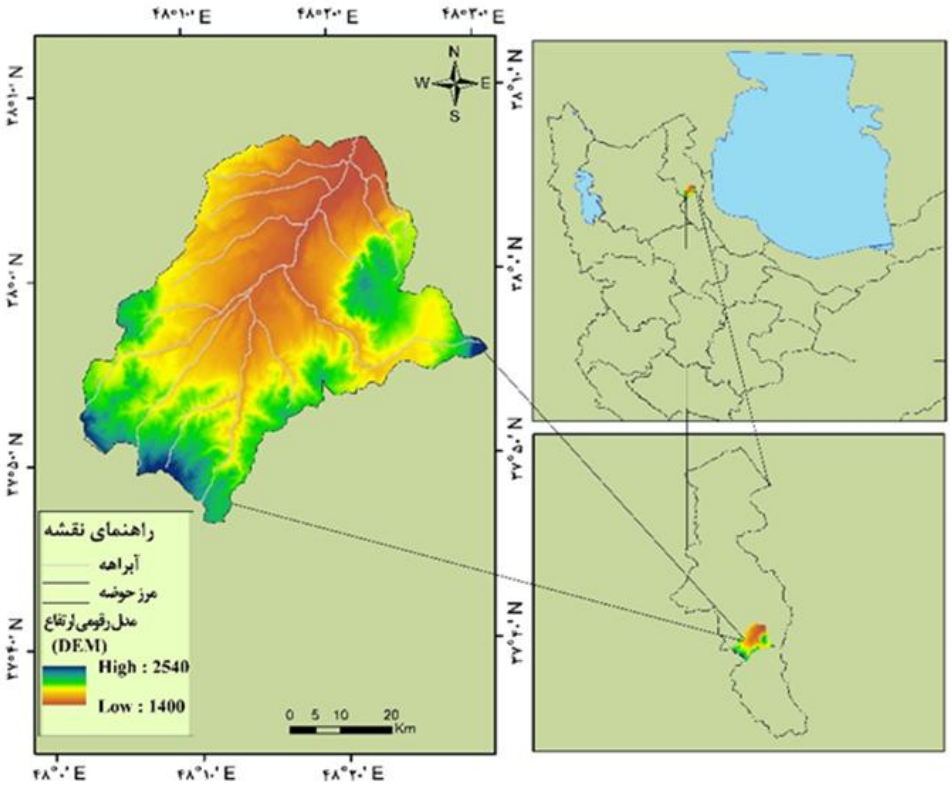
ارتباط کم‌تری با میزان فرسایش سالانهٔ خاک دارد. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، پهنه‌بندی فرسایش خاک در حوضهٔ آبریز «رزن» را با استفاده از مدل‌های منطق فازی، «EPM» و «BLM» انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که نتایج مدل «EPM» با داده‌های برداشت‌شده در مطالعهٔ میدانی مطابقت بیش‌تری دارد که نشان‌دهندهٔ دقت مدل مورد استفاده در بررسی فرسایش در منطقهٔ مورد مطالعه است. در پژوهشی دیگر عابدینی و همکاران (۱۴۰۲)، تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان فرسایش و رسوب حوضهٔ «رضی‌چای» در یک دورهٔ بیست ساله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که در طول بیست سال اخیر علی‌رغم افزایش سطح اراضی زراعی دیم در منطقه به‌دلیل کاهش سطح اراضی بایر و تقویت پوشش گیاهی در این منطقه، میزان فرسایش به میزان اندکی کاهش یافته است که این امر نشان‌دهندهٔ تقویت پوشش‌گیاهی در کنترل میزان فرسایش در منطقهٔ مورد مطالعه است. معتمدی و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی جهت برآورد میزان فرسایش خاک و تولید رسوب از مدل «RUSLE» و روش پسیاک اصلاح‌شده در حوضهٔ آبریز «کال اسماعیل دره» در شهرستان شاهرود پرداختند. نتایج حاصل از مدل «RUSLE» نشان‌داد که میزان فرسایش و رسوب در منطقهٔ مورد مطالعه ۱۷/۱۹ تن در هکتار برآورد شده و براساس مدل پسیاک نیز میزان برداشت رسوب ۳/۵۴ تن در هکتار محاسبه شد. ذاکری‌نژاد و فلاح (۱۴۰۱)، خطر فرسایش آبی در حوضهٔ آبخیز «علامرودشت» استان فارس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که ۵۴/۴۴ درصد حوضهٔ مورد مطالعه در طبقهٔ فرسایش خیلی‌زیاد (بیش از ۷۵ تن در هکتار در سال) و ۳۲/۲۲ درصد در کلاس فرسایش کم (۲۰ تن در هکتار در سال) قرار دارند. نورائی‌صفت و همکاران (۱۴۰۲)، به‌منظور بررسی روند تغییرات هدر رفت خاک در حوضهٔ آبریز «رودخانه کل» در استان هرمزگان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌داد که متوسط هدر رفت سالانهٔ خاک بین ۵/۵ تا ۲۹/۰۴ تن در هکتار در سال متغیر بود. جمع‌بندی سابقه پژوهش نشان می‌دهد که به‌سبب بالا بودن مقدار فرسایش خاک در بیش‌تر حوضه‌های آبخیز ایران، توجه بیش‌تر به مطالعهٔ عامل پیچیده فرسایش خاک ضروری و مهم است. با وجود این بدون کسب دانش در زمینهٔ تحلیل ارتباط فرسایش خاک با سایر عوامل تاثیرگذار امکان تعیین راهبردهای مدیریتی مناسب و در عین حال مقرون به‌صرفه دشوار خواهد بود. با توجه به این‌که حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» یک حوضهٔ کوهستانی شیب‌دار است و در اثر دخالت انسان‌ها به روش‌های مختلف نظیر: چرای بی‌رویه مراتع، تبدیل اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی و توسعهٔ مناطق شهری، میزان فرسایش خاک در این حوضه تشدید می‌شود، به همین دلیل این امر ضرورت کسب اطلاعات در این زمینه در شرایط مختلف اقلیمی، خاکی و پوشش گیاهی را توجیه نموده و مورد تاکید قرار می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در استان اردبیل انجام شده است.

روش پژوهش

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» با مساحت ۸۰۳ کیلومتر مربع در قسمت جنوبی استان اردبیل در شمال غربی کشور ایران جای گرفته است. مختصات جغرافیایی حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در طول جغرافیایی ۴۸درجه ۱۰ دقیقه و ۱ثانیهٔ شرقی و در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه و ۲۸ ثانیهٔ شمالی واقع شده است. بلندترین قسمت حوضه با ارتفاع ۲۵۴۰ متر و پایین‌ترین قسمت با ارتفاع ۱۴۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. حداکثر و حداقل بارش در منطقهٔ مورد

مطالعه نیز به‌ترتیب برابر با ۱۳۷۸ و ۳۱۸ میلی‌متر، حداکثر و حداقل دمای هوا بین ۹/۴ و ۴/۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین سیمای سرزمین حوضهٔ مورد مطالعه را مراتع، زراعت، برونزد سنگی و مسکونی به‌ترتیب با مقدار ۲۹/۱۳، ۶۴/۷۷، ۳/۵۰ و ۰/۸۰ درصد تشکیل داده است *(قربانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۰)*. موقعیت جغرافیایی این حوضه در سطح کشور و استان اردبیل در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

در این پژوهش از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) جهت برآورد فرسایش خاک منطقهٔ مورد مطالعه استفاده شد. در این راستا جهت دستیابی به هدف پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای« لندست ۸ OLI» مربوط به سال ۲۰۲۲ که از سایت زمین‌شناسی آمریکا (www.usgs.gov) دریافت و پس از انجام تصحیحات رادیومتریکی شامل تصحیح اتمسفری «Flaash» برای تولید نقشهٔ پوشش گیاهی استفاده شد. همچنین از لایه‌های رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متری (Aster)، آمار بارندگی ماهانه و سالانه اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور (مربوط به سال‌های ۱۳۹۲-۱۴۰۱)، نقشهٔ بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شد. همچنین در این پژوهش از نرم‌افزارهای «ENVI 5.3، ArcGIS 10.8» جهت ترسیم و تولید نقشه‌ها و از نرم‌افزارهای «SPSS» و «Excel» جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است.

مدل «RUSLE»

به‌منظور برآورد میزان فرسایش در دورهٔ زمانی مورد مطالعه، از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده استفاده خواهد شد. مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده به‌عنوان مدل توسعه‌یافتهٔ مدل جهانی فرسایش خاک برای پیش‌بینی فرسایش سالانهٔ خاک از یک سطح معین به‌کار می‌رود *(زند و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۰۴؛ Renard and Freidmund et al, 1994: 29)*. مدل «RUSLE» از ۶ عامل شامل عامل: فرسایندگی باران (R)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (L.S)، عامل پوشش‌گیاهی (C) و عامل عملیات حفاظتی (P) تبعیت می‌کند که به‌صورت رابطهٔ (۱) است *(Wischmeier and Smith, 1978: 18)*.

$$A= R * K * C * LS * P \qquad (۱)$$

فرسایش باران (R) تأثیر شدت بارندگی را بر فرسایش شیاری و ورقه‌ای تعیین می‌کند. فرسایش‌پذیری خاک (K) به حساسیت خاک نسبت به فرسایش اشاره دارد و توسط آب‌وهوا، خواص خاک، کاربری زمین و پوشش‌گیاهی کنترل می‌شود. این یک جزء ضروری در برآورد فرسایش خاک است. LS به طول شیب و فاکتور شیب اشاره دارد. P به عامل حفاظتی و C عامل مدیریت پوشش است. P و C اثرات بدون بعد بر مدیریت و سیستم کشت دارند در حالی‌که عامل LS تأثیر بدون بعد بر شیب و طول شیب دارد. همهٔ این پارامترهای بدون بعد در یک واحد نسبی نرمال شدند *(Dabral et al, 2008: 1788)*.

عامل فرسایندگی باران (R)

فرسایش بارندگی (R) از نظر کمی تأثیر بارندگی بر سطح خاک را منعکس می‌کند *(Wischmeier and Smith, 1978: 18)*. رابط فرسایشی خاک با برخورد قطرات باران با خاک سطحی و تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تعیین می‌شود؛ بنابراین فرسایش بارندگی با افزایش شدت بارندگی افزایش می‌یابد *(Arnoldus, 1980: 131)*. فرسایش ناشی از بارندگی را می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۲) بیان کرد *(Choudhury and Nayak, 2003: 388)*.

$$R = 79 + 0.363 * P_a \qquad (۲)$$

که در آن، P_a میانگین بارندگی سالانه است.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

عامل فرسایش‌پذیری خاک، بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آن‌ها به‌وسیلهٔ نیروی رواناب را نشان می‌دهد *(کلارستاقی و همکاران، ۱۳۸۷: ۵۷)*. مورگان برای ضریب فرسایش‌پذیری خاک‌های مختلف، اعدادی را پیشنهاد نموده است که در جدول (۱) نشان داده شده است *(احمدی، ۱۳۸۸: ۵۰۷)*. به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از نقشهٔ بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران و اطلاعات جدول (۱) استفاده گردید.

جدول ۱: ضریب فرسایش‌پذیری خاک (*K*)

وضعیت خاک	K	وضعیت خاک	K
خاک سطحی با پوشش سنگریزه‌ای	۰/۵	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۱
خاک‌های ماسه‌ای	۰/۱۶	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/۴۲
خاک‌های لومی شنی	۰/۱۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰/۴۲
خاک‌های سیلتی لومی	۰/۴۸	خاک‌های لومی	۰/۳۷
خاک‌های سیلتی رسی	۰/۲۵	خاک‌های لومی رسی	۰/۳۷

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸: ۵۰۷

طول شیب و فاکتورهای شیب (LS)

فاکتورهای طول شیب (L) و شیب (S) با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM[1]) محاسبه خواهد شد. طول شیب، فاصله‌ای را که در آن رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد یا جریان زمینی به یک کانال مجزا برخورد می‌کند توصیف می‌کند و تأثیر طول و شیب بر فرسایش توسط عوامل (L) و (S) بیان می‌شود. شیب تند مهم‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ هدر رفت خاک نسبت به طول شیب است. طول شیب به‌عنوان فاصله بین منبع نقطهٔ جریان زمینی و نقطه روان‌آب در یک کانال مجزا با شیب ملایم اندازه‌گیری می‌شود *(Olorunfemi et al, 2020: 108)*. هدر رفت خاک در واحد سطح با افزایش طول شیب افزایش می‌یابد علاوه بر این، ویژگی‌های سه‌بعدی زمین به‌طور متناسب بر افت خاک تأثیر می‌گذارد *(Wang et al, 2020: 3653)*. این نشان می‌دهد که شیب‌ها افت خاک را در تسکین پیچیده کنترل می‌کنند؛ بنابراین یک پارامتر ضروری برای محاسبهٔ ضریب (LS) در نظر گرفته می‌شود. عامل (L) و (S) را می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۳) بیان کرد *(Vijith et al, 2018: 1369)*.

(۳)

$$LS= [(\text{Flow accumulation grid}) \times (\text{cell size}/22.13)]^{0.4} \times [\text{Sin}(\text{slope grid} \times 0.01745)/0.0896]^{1.3}$$

در این معادله، از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در محیط «GIS» استفاده می‌گردد.

ضریب مدیریت پوشش گیاهی (C)

مدیریت پوشش‌گیاهی (C) با اندازه‌گیری نسبت هدر رفت خاک از زمین زراعی ارزیابی می‌شود *(Wischmeier and Smith, 1978: 19)*. بسیاری از محققان فاکتور (C) را بر اساس طبقات کاربری زمین/پوشش زمین ارزیابی کرده‌اند *(Pandey et al, 2007: 733)*. نقشهٔ کاربری/پوشش زمین با استفاده از تصویر «لندست ۸ OLI» و با استفاده از جدول (۲) تهیه خواهد شد.

جدول ۲: ارزش‌های اجرایی مدیریت پوشش برای کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش زمین

طبقات کاربری زمین/پوشش زمین	مسکونی	کشاورزی	پوشش‌گیاهی	زمین بایر	پهنه آبی
فاکتور C	۰/۰۰۲	۰/۲۸	۰/۰۰۰۸	۰/۱۳	۰

مأخذ: Pandey et al, 2007: 733

1. Digital Elevation Model

عامل عملیات حفاظت خاک (P)

عملکرد تولید رسوب و رواناب توسط شیوه‌های مختلف حفاظت از خاک کنترل می‌شود و C عوامل مهمی برای کاهش فرسایش خاک و رواناب سطحی هستند. میزان فرسایش خاک با روش‌های حمایتی انجام‌شده در زمین‌های زیر کشت تعیین می‌شود. کشاورزی خطی، کشت نواری و روش‌های کشت تراس برای کنترل فرسایش خاک مؤثر است. جدول ۳ مقادیر عملیات حفاظتی شیب را نشان می‌دهد. هر چه ارزش عملیات حفاظتی بالاتر باشد، اقدامات انجام‌شده برای محدودکردن فرسایش خاک کم‌تر است *(Shin, 1999: 47)*.

جدول ۳: مقادیر عملیات حفاظتی در شیب‌های مختلف

شیب (درصد)	۰-۷	۷-۱۱/۳	۱۱/۳-۶/۱۷	۱۷/۶-۲۶/۸	۲۸/۶ <
فاکتور P	۰/۲۷	۰/۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵

مأخذ: شین، ۱۹۹۹

تلفیق لایه‌ها و تهیهٔ نقشهٔ فرسایش خاک

پس از تهیهٔ لایه‌ها و طبقه‌بندی هرکدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنهٔ اعداد به‌دست‌آمده، نقشهٔ نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی شد. آماده‌سازی و تهیهٔ لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به‌صورت رستری، مقدار هدر رفت سالیانهٔ خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل «RUSLE» با توجه به رابطهٔ ۱ و با استفاده از ابزار «Spatial Analyst» و گزینهٔ «Raster Calculator» در محیط «ArcGIS» بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه خواهد شد.

شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی

شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI[1])

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی است که با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور به‌دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به‌صورت رابطهٔ ۴ می‌باشد *(عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ۱۱۴)*.

$$NDVI= (IR-R)/(IR+R) \qquad (۴)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر «NDVI» بین ۱ - و ۱ + در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری‌شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر «NDVI» به صفر نزدیک می‌شود. برای محاسبهٔ شاخص«NDVI» از باندهای ۴ و ۵ تصویر «لندست ۸ OLI» سال ۲۰۲۲ استفاده شد (رابطهٔ ۴) و نقشهٔ شاخص مذکور برای منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از «نرم‌افزارEnvi 5.6» به‌دست آمد.

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI[1])

شاخص رطوبت توپوگرافی اولین‌بار به‌وسیلهٔ بون و کرکبی (۱۹۷۹) در مدل بارش-رواناب TOPMODEL معرفی شد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به‌صورت کمی بیان کند و به‌عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند *(ملکی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۴۶)*. TWI در مقایسه با ویژگی‌های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص قدرت جریان در بسیاری موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی دقیق استفاده می‌شود که نمونه‌هایی از این کاربردها شامل استفاده از نقشه TWI به‌عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به‌خصوص در اراضی تپه ماهوری، ترکیب TWI و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب) با یکدیگر به‌عنوان ورودی برای تهیهٔ نقشهٔ رقومی خاک برای پیش‌بینی توزیع مکانی نوع و ویژگی‌های خاک، در مقیاسی بهتر می‌باشد *(Qin et al, 2009: 35)*. شاخص رطوبت توپوگرافی به‌صورت رابطهٔ ۵ ارائه‌شده است *(Moore and Grayson, 1991: 8)*.

$$\mathrm{TWI} = \mathrm{A_s}/\tan\beta \qquad (۵)$$

در رابطهٔ ذکرشده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع‌شدن در هر نقطه از درجهٔ شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع‌شدن در هر نقطه از حوضه (برحسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین‌دست (برحسب β t به‌عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند.

شاخص توان آبراهه (SPI[2])

توان آبراهه میزان زمان مصرف انرژی است و به‌طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به‌عنوان اندازه‌گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می‌شود. همچنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع‌شده را محاسبه می‌کند و ممکن است برای ارزیابی چشم‌انداز فرسایش بیش از سایر رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و انحراف جریان می‌شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می‌کند شاخص توان آبراهه (SPI) به‌صورت رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود *(Sharma, 2010: 205)*.

$$\mathrm{SPI} = \mathrm{A_s} \tan \mathrm{B} \qquad (۶)$$

در رابطهٔ ذکرشده $\tan B$ و A_s هستند به‌ترتیب منطقهٔ خالص حوضه و شیب محلی هستند.

شاخص انحناء دامنه (Curvator)

انحنای دامنه یا انحنای شیب حوضه زهکشی را درجایی نشان می‌دهد که به نمایش فرآیندهای فرسایش و رواناب کمک می‌کند. مقادیر انحنای نمایه، مورفولوژی توپوگرافی را نشان می‌دهد که دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است انحنای مثبت به‌صورت یک مقعر رو به بالا و انحنای منفی نشانگر محدب رو به پایین

1. Topographic Wetness Index (TWI)
2. Stream Power Index (SPI)

است هم‌چنین مقدار صفر نشان‌دهنده سطوح صاف است (رژ[1] و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۵۴)؛ از این‌رو شاخص انحناء دامنه با استفاده از DEM با ابعاد ۲۰*۲۰ در محیط Arc Map تهیه گردید و درنهایت سه لایه شامل Curvature, profile Curvatur, Plan curvature ایجاد گردید.

شاخص انحناء سطح (Profile Curvator)

انحناء سطح معرف اندازهٔ تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است؛ بنابراین انحناء سطح نشان‌دهندهٔ شدت جریان آب و فرآیندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. به‌طوری‌که مقدار منفی این انحنا سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد *(بابلی‌موخر، ۱۳۹۷: ۹۷)*. شاخص انحناء سطح به‌صورت رابطهٔ ۷ ارائه‌شده است.

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2e^2)^{1.5} \quad (۷)$$

شاخص انحناء مقطع (Plan Curvator)

انحناء مقطع، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد؛ بنابراین نشان‌دهندهٔ واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء مقطع واگرایی جریان را نشان‌داده که دربرگیرندهٔ خطالراس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد *(بابلی‌موخر، ۱۳۹۷: ۹۷)*. شاخص انحناء مقطع به‌صورت رابطهٔ ۸ ارائه شده است.

$$n \times g\,(b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad (۸)$$

ارتباط شاخص‌های ژئومورفیک با نقشهٔ فرسایش خاک حوضهٔ مورد مطالعه

به‌منظور بررسی ارتباط شاخص‌های ژئومورفیک با نقشهٔ فرسایش خاک حوضهٔ مورد مطالعه از نرم‌افزار اکسل و رابطهٔ رگرسیونی R^2 استفاده شد تا میزان اثرگذاری هریک از این شاخص‌ها در ارتباط با فرسایش خاک حوضهٔ مورد مطالعه بیان شود. برای دست‌یافتن به این هدف متوسط، مقدار هر یک از این شاخص‌ها به تفکیک ۳۶ حوضه به‌دست آمد. همچنین مشخص شد که کدام زیر حوضه دارای مقادیر بیش‌تر و کم‌تر می‌باشد.

بحث و نتایج

عامل فرسایندگی باران (R): جهت محاسبهٔ عامل فرسایندگی باران (R)، آمار بارش ماهانه و سالانهٔ ۲۰ ساله ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه (MIF) با استفاده از رابطهٔ (۲) مقادیر فرسایندگی باران (R) مورد محاسبه قرار گرفت. با انتقال این اعداد به محیط برنامه Arc GIS و اعمال درون‌یابی به روش IDW نقشه رستری ۳۰ متری تغییرات مکانی (R) تهیه گردید که در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده

1. Rejith

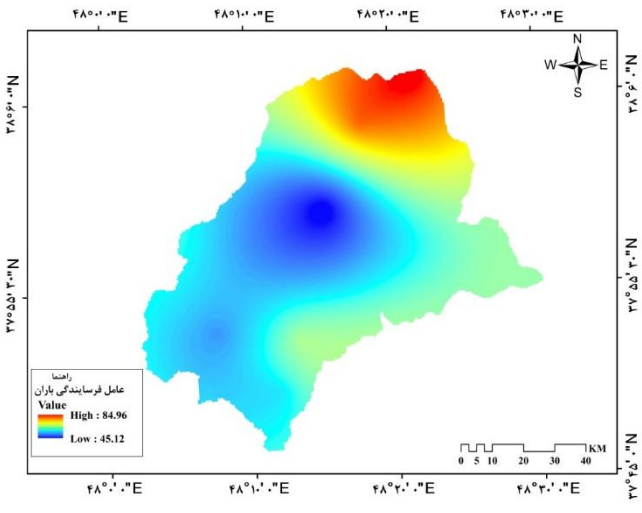
می‌شود مقدار R از ۴۵/۱۲ تا ۸۴/۹۶ (مگاژول بر میلی متر بر هکتار در سال) متغیر است. بیش‌ترین مقدار آن مربوط به قسمت‌های شمالی و کم‌ترین آن مربوط به قسمت‌های مرکزی و جنوب حوضه است.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K): جهت تهیهٔ نقشهٔ فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از جدول (۱) و نقشهٔ بافت ۱:۲۵۰۰۰۰ خاک ایران نقشهٔ رستری ۳۰ متری عامل فرسایش‌پذیری خاک تهیه گردید که در شکل (۳) نشان‌داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقدار K بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۲ متغیر است. قسمت‌های شمال غربی به‌طور پراکنده و بخش‌های مرکزی حوضه بیشترین مقدار K و قسمت‌های جنوب، و جنوب شرقی کم‌ترین مقدار K را به خود اختصاص داده است.

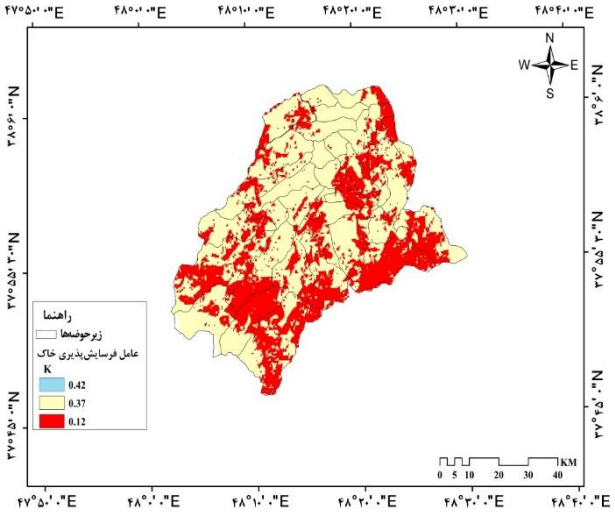
عامل توپوگرافی (LS): جهت محاسبهٔ عامل توپوگرافی (LS) از مدل ارتفاع رقومی (DEM 30m) ماهواره «ASTER» استفاده شد. با استفاده از این نقشه و ابزار ArcHydro در محیط برنامهٔ ArcGIS نقشهٔ جهت جریان (Flow Direction) ساخته شد. سپس با استفاده از نقشه Fdr نقشهٔ جریان تجمعی (Flow Acculation) مورد محاسبه قرار گرفت و نقشهٔ شیب به درجه نیز با استفاده نقشه DEM تولید گردید. در نهایت با کابرد رابطهٔ (۴) نقشه رستری ۳۰ متری LS تهیه شد که در شکل (۴) نشان‌داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مقدار LS از ۰ تا ۵/۷۵ متغیر است. مناطق شمال شرقی، جنوب و جنوب غربی حوضه دارای LS بیش‌تری می‌باشد. در شکل نقشه عامل توپوگرافی (LS) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی ارائه شده است.

عامل پوشش گیاهی (C): جهت تهیهٔ نقشه عامل پوشش گیاهی (C) با استفاده از شاخص NDVI برای سال ۱۴۰۱ مقادیر عامل پوشش گیاهی (C) مورد محاسبه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود عامل C بین ۰/۱۱ تا ۰/۶۲ متغیر است. مناطق شمال و شمال غربی حوضه از مقدار C بیش‌تری برخوردار است و مناطق جنوبی حوضه مقادیر C کم‌تری را به خود اختصاص داده است.

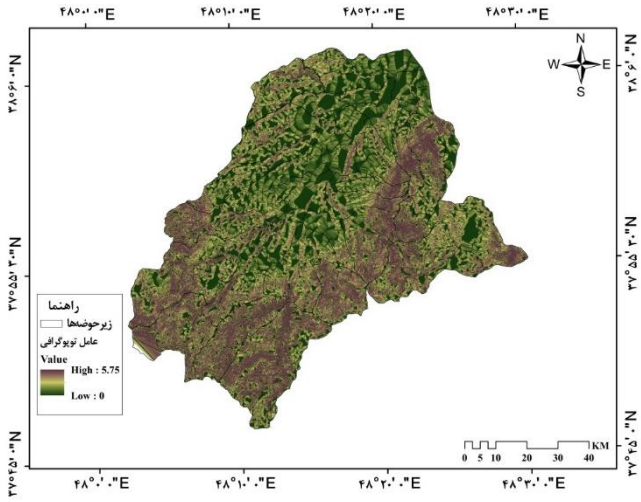
عامل عملیات حفاظتی خاک (P) نیز برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته شد.



شکل ۲: نقشهٔ عامل فرسایندگی باران (R) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

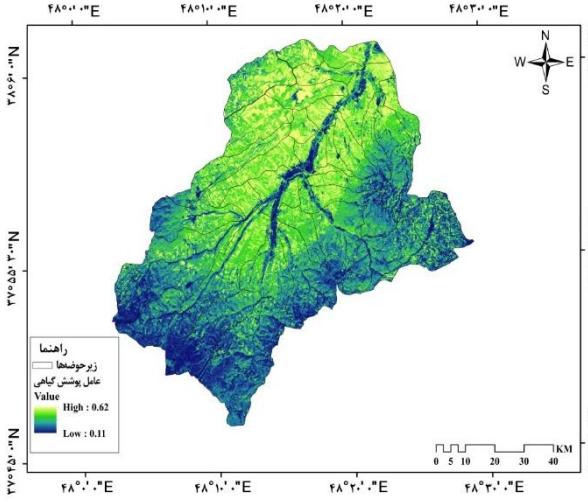


شکل ۳: نقشهٔ عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی *(تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲)*



شکل ۴: نقشهٔ عامل توپوگرافی (LS) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

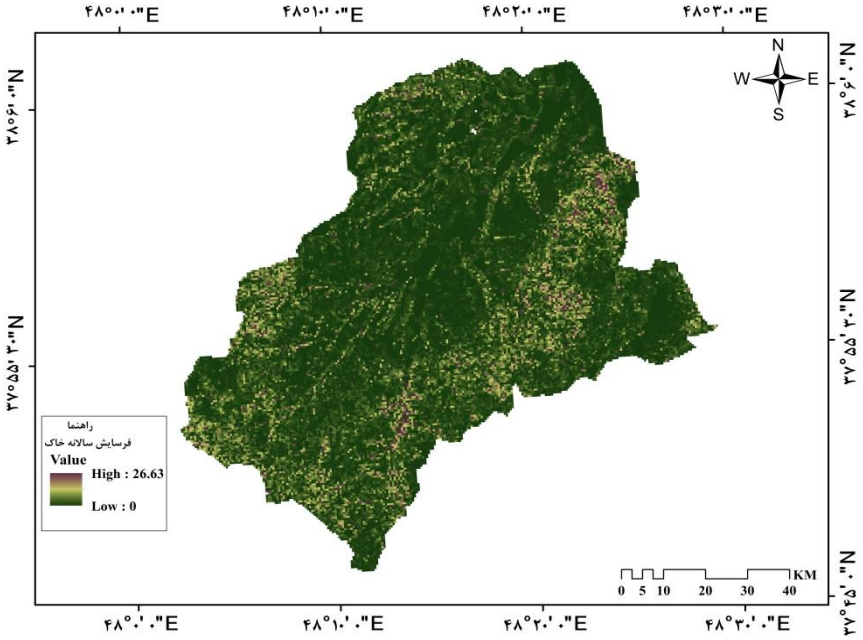
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۵: نقشهٔ عامل پوشش گیاهی (C) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

نقشهٔ متوسط فرسایش سالانهٔ خاک *(RUSLE)* همان‌طور که بیان‌شد برای تهیهٔ نقشهٔ نهایی فرسایش خاک حوضهٔ مورد مطالعه با هم‌پوشانی لایه‌های مدل «RUSLE » در محیط «ArcMAP» و با استفاده از ابزار«Raster Calculator» اقدام به تهیهٔ نقشهٔ خروجی گردید (شکل ۶). همان‌طور که در این نقشه ملاحضه می‌شود، مقدار فرسایش سالانهٔ خاک بین ۰ تا ۲۶/۶۳ تن بر هکتار در سال متغیر است که بیش‌ترین مقدار آن در قسمت‌های شمال شرقی و همچنین به‌صورت پراکنده در قسمت‌های جنوبی حوضه نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۶: نقشهٔ فرسایش سالانهٔ خاک (RUSLE) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

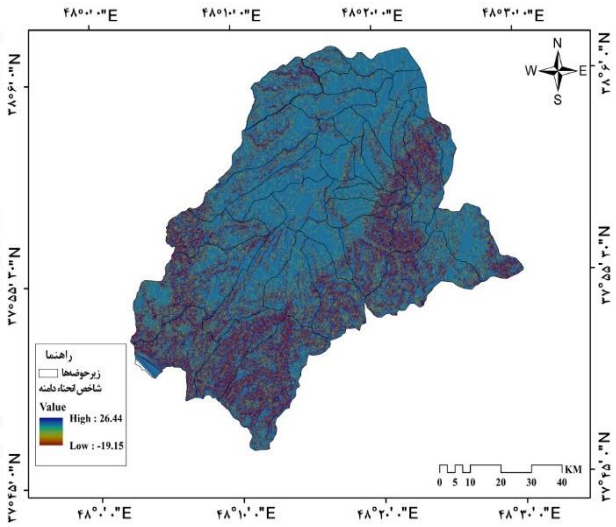
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

شاخص‌های ژئومورفیک

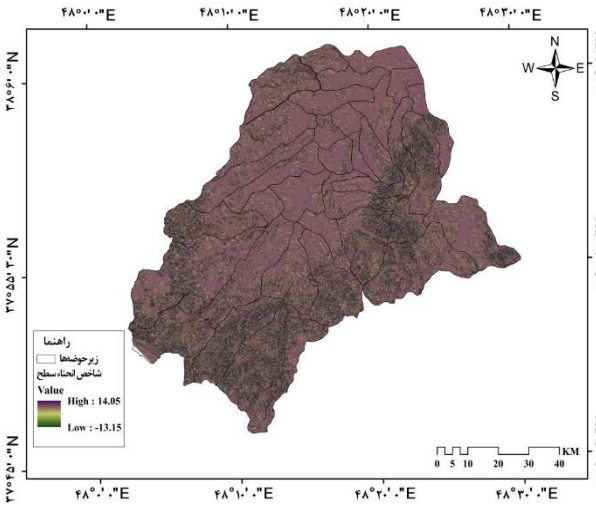
شاخص انحناء دامنه (Curvator): انحناء نشان‌دهندهٔ میزان انحراف سطح از صاف‌بودن و یا به‌عبارتی‌دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. از شاخص انحناء برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین می‌توان استفاده نمود؛ از این‌رو شاخص انحناء برای حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی در محیط «ArcMap» تهیه شد که در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به شکل، مقدار شاخص انحناء دامنه برای حوضهٔ مورد مطالعه در دامنه، بین ۱۹/۱۵- تا ۲۶/۴۴ به‌دست آمد.

شاخص انحناء سطح (Plan Curvator): این شاخص نشان‌دهندهٔ واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان‌داده که دربرگیرندهٔ خطالراس‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شکل (۸) شاخص انحناء پلان حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقدار شاخص انحناء سطح برای حوضهٔ مورد مطالعه بین ۱۳/۱۵- تا ۱۴/۰۵ متغیر می‌باشد. همچنین با توجه به شکل، قسمت‌های مرکزی و شمال حوضه و بخش‌های جنوب و جنوب شرقی به‌ترتیب دارای مقادیر بیش‌تر و کم‌تری را به‌خود اختصاص داده است.

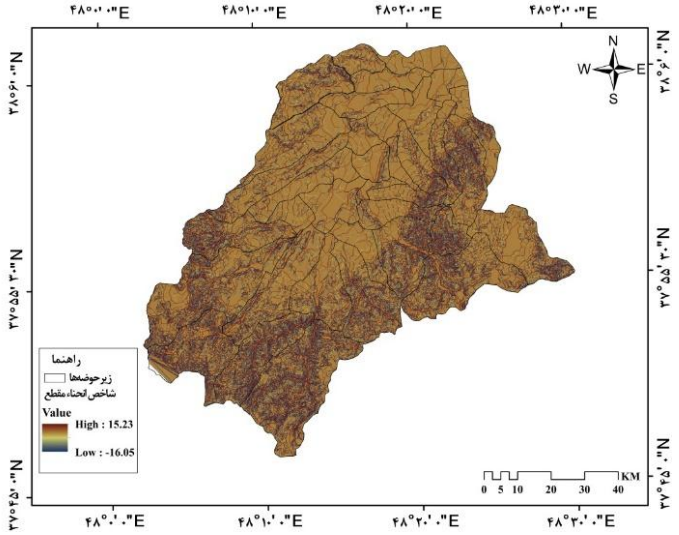
شاخص انحناء مقطع (Profil Curvator): انحناء پروفیل، معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحنا معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. شکل (۹) شاخص انحناء مقطع حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل، مقدار به‌دست آمده برای حوضهٔ مورد مطالعه بین ۱۶/۰۵- تا ۱۵/۲۳ می‌باشد.



شکل ۷: نقشهٔ شاخص انحناء دامنه (Curvator)
حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۸: نقشهٔ شاخص انحناء سطح (Plan Curvator)
حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۹: نقشهٔ شاخص انحناء مقطع (Profil Curvator) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

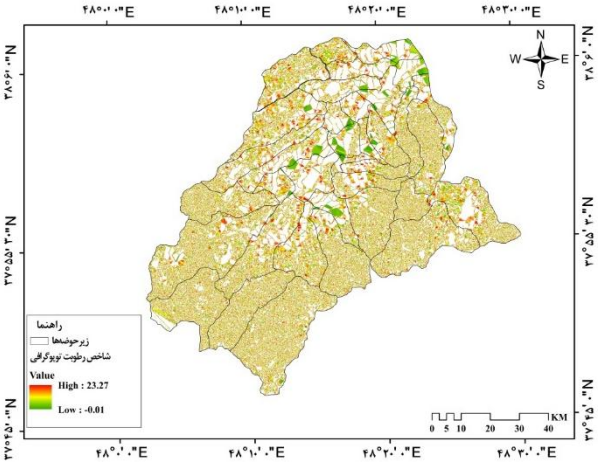
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، نشان‌دهندهٔ تأثیرات چندگانهٔ زمین در فرآیندهای رواناب اضافی اشباع است و با مرتب‌سازی مواد رسوب معلق مرتبط است. توزیع همگن از شرایط خاک برای محاسبهٔ رطوبت توپوگرافی خاک صورت گرفت. توزیع فضایی شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در شکل (۱۰) ارائه شده است. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در محدودهٔ ۰/۰۱- تا ۲۳/۲۷ می‌باشد. شکل (۱۰)، نشان می‌دهد که مقدار بالای شاخص رطوبت توپوگرافی بیش‌تر در قسمت میانی حوضه (سطح هموار و صاف) یافت می‌شوند، درحالی‌که مقادیر کم در قسمت‌های جنوب، جنوب شرقی، غربی و قسمت‌هایی از شمال شرقی حوضهٔ آبریز (مناطق شیب‌دار و ناپایدار)، معمول است؛ ازاین‌رو مناطقی که دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا هستند دارای اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا می‌باشد و بالعکس.

شاخص قدرت جریان (SPI): شاخص قدرت جریان (SPI)، فرآیندی است که خطوط جریان مشابه را مانند شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، پیش‌بینی می‌کند. با این‌حال، مقادیر شبکه نشان‌دهندهٔ شتاب جریان است که با افزایش سرعت شیب آب، به‌سرعت در حال افزایش است. مقادیر «SPI» در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» بین ۰/۵۴ تا ۲۳/۸۳ می‌باشد. با توجه به این‌که شاخص قدرت جریان مستقیماً با پتانسیل فرسایش سازگار است؛ از این‌رو مناطقی که با شدت زیاد «SPI» همراه است دارای پتانسیل فرسایش بالا خواهد بود درحالی‌که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهندهٔ سطح پتانسیل رسوب است؛ از این‌رو شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مقادیر بالای شاخص قدرت جریان «SPI» بیش‌تر در قسمت شمال و مرکز حوضه متمرکز است، البته به‌صورت پراکنده در کل حوضه نیز مشاهده می‌شود.

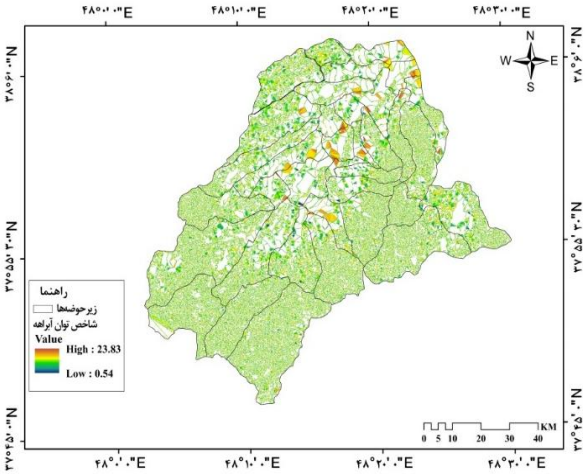
شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI): با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی عادی به‌عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش‌تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می‌شود. در این مطالعه، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) به‌عنوان اندازه‌گیری میزان و تراکم پوشش گیاهی در نظر گرفته شد.

تصویر شاخص پوشش گیاهی عادی برای سال ۱۴۰۲ از داده‌های ماهواره لندست ۹ به‌دست آمد؛ ازاین‌رو مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در دامنه بین ۰/۲۱- تا ۰/۸۵ می‌باشد. شکل (۱۲)، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، حوضهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



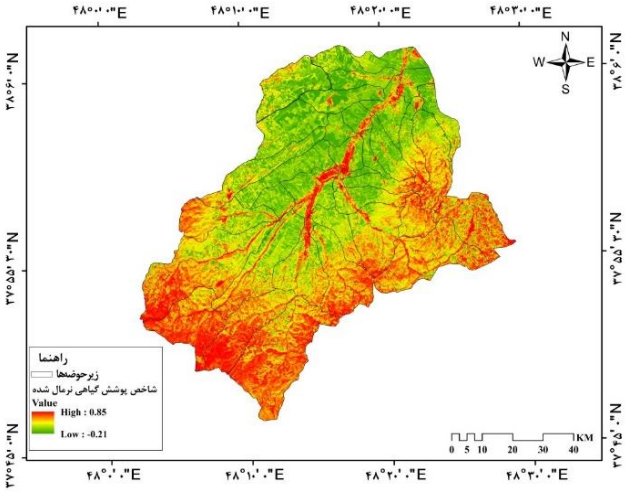
شکل ۱۰: نقشهٔ شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۱۱: نقشهٔ شاخص توان آبراهه (SPI) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



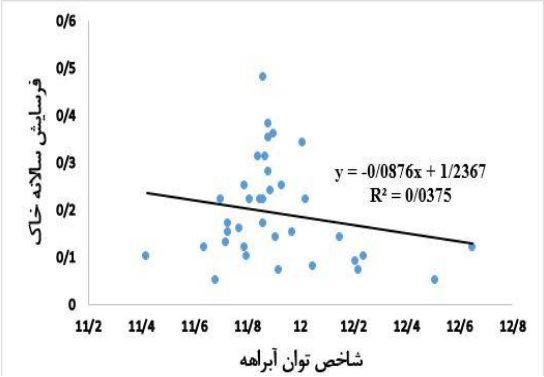
شکل ۱۲: نقشهٔ شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

ارتباط میان شاخص‌های استخراج‌شده با مقادیر فرسایش در زیرحوضه‌های آبخیز «کوزه‌توپراقی»

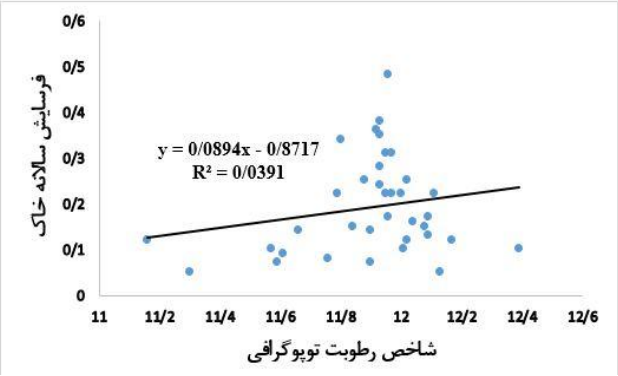
پس از این‌که نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های (TWI, SPI, Slope, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, NDVI) به‌دست‌آمد، ارتباط این شاخص‌ها با میزان فرسایش سالانهٔ خاک به‌صورت رابطهٔ رگرسیونی در محیط «ExcelStat» به‌دست آمد تا میزان همبستگی آن‌ها مشخص شود. به‌عبارتی دیگر تجزیهٔ رگرسیون، یک وسیلهٔ آماری است که برای برآورد ارزش یک متغیر کمی با توجه به رابطه‌اش با یک متغیر با یک یا چند متغیر کمی دیگر به‌کار می‌رود. این رابطه طوری است که با استفاده از یک متغیر می‌توان دیگری را پیش‌بینی کرد. هم‌چنین این رابطه همیشه

بین ۰ تا ۱ درصد است که ۰ نشان‌دهندهٔ این نکته است که مدل مورد استفاده، هیچ یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن‌را تبیین نمی‌کند و مقدار ۱ درصد نیز نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده تغییرپذیری داده‌ها را در اطراف میانگین آن تبیین می‌کند. برای انجام تحلیل رگرسیون در این پژوهش، بعد از تهیهٔ لایه‌های مورد نیاز، مقادیر متوسط این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار «ExcelStat» شده و با استفاده از ماژول Statistics روش «REGRESS» عمل رگرسیون انجام گردید. در این مدل رگرسیونی متوسط فرسایش سالانهٔ خاک به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و شاخص‌هایTWI, SPI, Slope, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, NDVI به‌عنوان متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در بین شاخص‌های استخراج‌شده، شاخص‌های: شیب، انحناء سطح، انحناء مقطع، انحناء دامنه و رطوبت توپوگرافی به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۸، ۰/۴۰، ۰/۲۰، ۰/۰۶ و ۰/۰۳ بیش‌ترین تأثیرگذاری را در فرسایش خاک حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» داشته‌اند. درحالی‌که شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده و توان آبراهه رابطه‌ای معکوس با فرسایش سالانهٔ خاک داشته‌اند. نتایج حاصل از همبستگی میان فرسایش و شاخص‌های مورد مطالعه در شکل‌های (۱۳ تا ۱۹) ارائه شده است. به‌عبارتی دیگر ارتباط بین فرسایش خاک با شاخص‌های مورد مطالعه با استفاده از روش پیرسون مورد آزمون آماری قرار گرفت (جدول ۴) و مشخص شد بین فرسایش سالانهٔ خاک با شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده، رابطهٔ معکوس معنی‌دار وجود داشته اما با شاخص‌های شیب، انحناء سطح و انحنای مقطع رابطه‌ای مستقیم معنی‌داری برقرار بوده است.



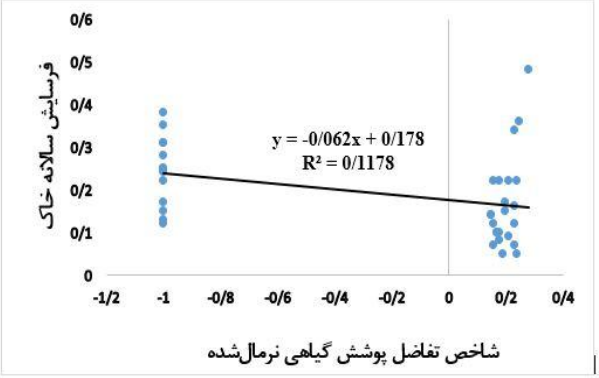
شکل ۱۳: همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص قدرت جریان SPI در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



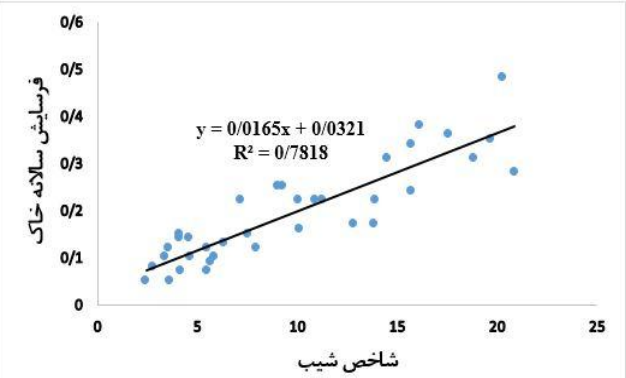
شکل ۱۴: همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص رطوبت توپوگرافی TWI در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



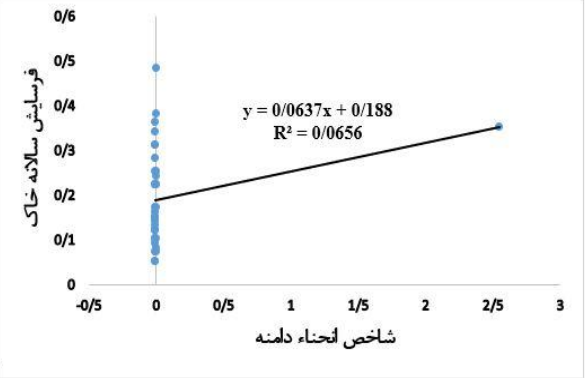
شکل ۱۵: نمودار همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص پوشش گیاهی NDVI در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



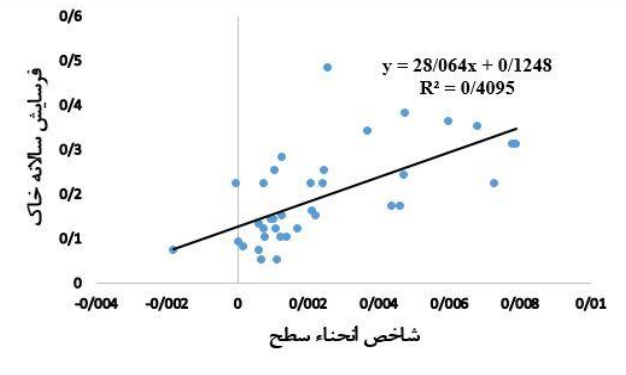
شکل ۱۶: همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص شیب Slope در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



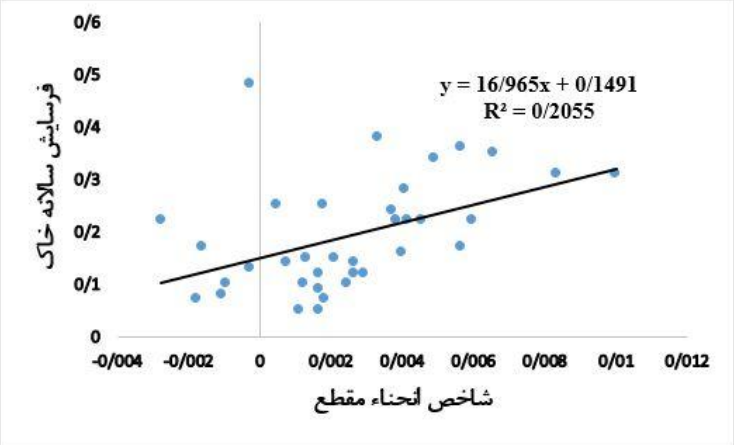
شکل ۱۷: نمودار همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص انحناء دامنه در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۱۸: همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص انحناء سطح در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲



شکل ۱۹: نمودار همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص انحناء مقطع در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

جدول ۴: همبستگی مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه با فرسایش سالانهٔ خاک در حوضهٔ آبخیز کوزه‌توپراقی

	TWI	SPI	NDVI	SLOPE	Curvatore	Plan Curvatore	Profil Curvatore
RUSLE	0/19	-0/19	-0/35*	0/88**	0/25	0/64**	0/45**

* اطمینان در سطح ۹۵ درصد ** اطمینان در سطح ۹۹ درصد

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۲

نتیجه

در این پژوهش با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده، به ارزیابی و بررسی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در استان اردبیل پرداخته شده است. نتایج پهنه‌بندی فرسایش در حوضهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد که متوسط فرسایش سالانهٔ خاک برابر با ۶/۹۳ تن بر هکتار در سال متغیر است. مقدار زیاد تغییرات حاصل فیزیوگرافی، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی محدوده است که البته نباید عامل انسانی و تأثیر فعالیت‌های انسانی در حوضه را نادیده گرفت. بررسی نقشهٔ عامل فرسایندگی باران در سطح حوضه نشان‌داد که مقادیر این عامل با توجه به نقشه R منطقه بین ۴۵/۱۲ تا ۸۴/۹۶

مگاژول بر میلی‌متر بر هکتار در سال متغیر است که در نواحی پرشیب حوضه، دارای مقادیر بیش‌تر بوده و در نواحی کم‌ارتفاع مخصوصا نواحی مرکزی، دارای کم‌ترین ارزش عددی می‌باشند. به‌عبارتی دیگر، کاهش عامل R رابطهٔ نزدیکی با کاهش ارتفاع و باران در نواحی مختلف حوضهٔ مورد مطالعه دارد. دیگر عامل این مدل که فرسایش‌پذیری خاک است دارای مقداری بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۲ متغیر بود که بیش‌ترین میزان حساسیت خاک به فرسایش در قسمت‌های شمالی و شمال غربی حوضه را شامل می‌شود. همچنین کم‌ترین مقدار آن نیز در قسمت‌های جنوبی و قسمت‌هایی از شمال شرقی را نشان می‌دهد. عامل توپوگرافی نیز تأثیر توپوگرافی بر میزان فرسایش خاک را نشان می‌دهد. در واقع نشان‌داده شده است که افزایش طول و شیب می‌تواند سرعت جریان آب‌های سطحی را افزایش داده و منجر به افزایش فرسایش خاک شود. فرسایش خالص خاک به تغییرات شیب حساس‌تر از طول شیب است؛ بنابراین متوسط مقدار این عامل در حوضهٔ مورد مطالعه برابر با ۵/۷۵ می‌باشد. عامل بعدی مدیریت پوشش گیاهی است. مقادیر این عامل برای حوضهٔ مورد مطالعه بین ۰/۱۱ تا ۰/۶۲ متغیر است. نقشهٔ خطر فرسایش خاک حوضه که از ترکیب و هم‌پوشانی لایه‌های فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی در محیط «GIS» تولید گردید. مقدار فرسایش در حوضهٔ مورد مطالعه بین ۰ تا ۲۶/۶۳ تن بر هکتار در سال به‌دست‌آمد که این مقدار فرسایش خاک با نتایج سایر محققین نزدیک می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۷) میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضهٔ «تالار» با مدل «RUSLE» برآورد کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌داد، میزان فرسایش در منطقهٔ مورد مطالعه بین ۰ تا ۹۲/۰۱ تن در هکتار در سال می‌باشد. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضهٔ «گابریک» جنوب خاوری استان هرمزگان با مدل «RUSLE» مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ارزیابی آن‌ها نشان‌داد میزان فرسایش در کل منطقهٔ مورد مطالعه از ۰ تا ۳۰ تن در هکتار در سال می‌باشد. در این پژوهش، از شاخص‌های پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، رطوبت توپوگرافی (TWI)، قدرت توان آبراهه (SPI)، شیب (Slope) و همچنین شاخص‌های انحناء دامنه (Curvatore)، انحناء سطح (PlanCurvatore) و شاخص انحناء مقطع (Profile Curvatore) استفاده شد. بدین‌منظور جهت برآورد شاخص «NDVI» از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ أخذ شده از سایت زمین‌شناسی امریکا برای سال ۱۴۰۱ استفاده شد. با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی عادی به‌عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش‌تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می‌شود. در این مطالعه، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) به‌عنوان اندازه‌گیری میزان و تراکم پوشش گیاهی در نظر گرفته شد؛ ازاین‌رو مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» در دامنه بین ۰/۲۱- تا ۰/۸۵ می‌باشد؛ بنابراین مقدار این شاخص برای حوضهٔ مورد مطالعه، برابر با ۰/۲۱- تا ۰/۸۵ متغیر است. با توجه به نتایج، قسمت‌های مرکزی و جنوبی حوضهٔ مورد مطالعه، از پوشش گیاهی غنی‌تری نسبت به سایر قسمت‌های حوضه (قسمت‌های شمالی و شمال شرقی تراکم کم‌تر) دارا می‌باشد. دیگر شاخص، قدرت توان آبراهه است. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در محدودهٔ ۰/۰۱- تا ۲۳/۲۷ می‌باشد. مقدار بالای شاخص رطوبت توپوگرافی بیش‌تر در قسمت میانی حوضه (سطح هموار و صاف) یافت می‌شوند، درحالی‌که مقادیر کم در قسمت‌های جنوب، جنوب شرقی، غربی و قسمت‌هایی از شمال شرقی حوضهٔ آبریز (مناطق شیب‌دار و ناپایدار)، معمول است؛ ازاین‌رو مناطقی که دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا هستند دارای اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا می‌باشد و بالعکس. شاخص قدرت توان آبراهه (SPI)؛ شاخص توان آبراهه

فرآیندی است که خطوط جریان مشابه را مانند شاخص رطوبت توپوگرافی پیش‌بینی می‌کند. با این‌حال، مقادیر شبکه نشان‌دهندهٔ شتاب جریان است که با افزایش سرعت شیب آب به‌سرعت در حال افزایش است. مقادیر«SPI» در حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی»، بین ۰/۵۴ تا ۲۳/۸۳ می‌باشد. نتایج ارتباط فرسایش خاک با شاخص توان آبراهه نشان‌داد که با افزایش میزان فرسایش خاک در منطقهٔ مورد مطالعه، مقادیر «SPI» در حالت کمینه خود بوده است. از دیگر شاخص‌های مورد مطالعه، شاخص‌های انحناء دامنه که مقادیر آن نشان‌دهندهٔ مورفولوژی توپوگرافی است و دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است انحنای مثبت به‌صورت یک مقعر رو به بالا و انحنای منفی نشانگر محدب رو به پایین است همچنین مقدار صفر نشان‌دهندهٔ سطوح صاف است *(Rejith et al, 2019: 350)*؛ بنابراین مقدار این شاخص برای حوضه، برابر با ۱۹/۱۰- تا ۲۶/۴۴ به‌دست آمد. شاخص دیگر، انحناء سطح است که بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد؛ بنابراین نشان‌دهندهٔ واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت، انحناء پلان واگرایی جریان را نشان‌داده که دربرگیرندهٔ خط‌الراس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد؛ از این‌رو مقادیر این شاخص برابر با ۱۳/۱۵- تا ۱۴/۰۵ برای حوضهٔ مورد مطالعه برآورد شد. شاخص انحناء مقطع که معرف اندازهٔ تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. این شاخص نشان‌دهندهٔ شدت جریان آب و فرآیندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود، به‌طوری‌که مقدار منفی این انحنا، سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص برابر با ۱۶/۰۵- تا ۱۵/۲۳ به‌دست آمد. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه را با فرسایش خاک مورد مقایسه قرار داده و با یک رابطهٔ همبستگی مشخص‌گردید که کدام شاخص بیش‌ترین و کم‌ترین تاثیرگذاری را فرسایش منطقهٔ مورد مطالعه دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در بین شاخص‌های استخراج-شده شاخص‌های: شیب، انحناء سطح، انحناء مقطع، انحناء دامنه و رطوبت توپوگرافی به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۸، ۰/۴۰، ۰/۲۰، ۰/۰۶ و ۰/۰۳ بیش‌ترین تاثیرگذاری را در فرسایش خاک حوضهٔ آبخیز «کوزه‌توپراقی» داشته‌اند، در حالی‌که شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده و توان آبراهه، به‌ترتیب با مقادیر ۰/۱۱ و ۰/۰۳ رابطه‌ای معکوس با فرسایش سالانهٔ خاک داشته‌اند. بین فرسایش خاک با شاخص‌های مورد مطالعه، با استفاده از روش پیرسون مورد آزمون آماری قرار گرفت (جدول ۴) و مشخص‌شد بین فرسایش سالانهٔ خاک با شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده رابطهٔ معکوس معنی‌دار وجود داشته اما با شاخص‌های شیب، انحناء سطح و انحنای مقطع رابطهٔ مستقیم معنی‌داری برقرار بوده است. در آخر پیشنهاد می‌شود، کشاورزان در مناطق زراعی تمهیدات حفاظتی اتخاذ کنند تا از هدر رفت بیش‌تر خاک جلوگیری شده و در آینده شاهد نابودی زمین‌های کشاورزی نباشیم. همچنین با توجه به نتایج حاصله و وجود مشکلات جدی ناشی از فرسایش، می‌توان نسبت به اولویت‌بندی مناطق از نظر خطر فرسایش، افزایش آگاهی مردم نسبت به پیامدهای این پدیده، مدیریت رواناب و جلوگیری از تغییر کاربری‌ها برای مدیریت حفاظت خاک و بهره‌برداری از آن اقدام کرد.

منابع

احمدی، حسن (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، چاپ ۶. انتشارات دانشگاه تهران. صفحه ۵۰۷.

اسفندیاری‌درآباد، فریبا؛ رئوف مصطفی‌زاده؛ امیرحسام پاسبان؛ بهروز نظافت‌تکله (۱۴۰۱). تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین اردبیل، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. دوره ۹. شماره ۱. صفحات ۹۶-۷۷.

Doi:20.1001.1.22519424.1397.7.3.6.4

بابلی‌موخر، حمید؛ علیرضا تقیان؛ کورش شیرانی (۱۳۹۷). ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با به‌کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۷. شماره ۳. صفحات ۱۱۶-۹۱.

Doi:20.1001.1.22519424.1397.7.3.6.4

ذاکری‌نژاد، رضا؛ سلمان فلاح (۱۴۰۱). ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظرشده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال ۱۱. شماره ۴. صفحات ۲۰۹-۱۸۹.

Doi:10.22034/GMPJ.2022.360905.1375

زندی، جلال؛ محمود حبیب‌نژادروشن؛ کریم سلیمانی (۱۳۹۲). ارزیابی نقشه خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی، مطالعه موردی: حوضه آبخیز وازرود، مازندران، مرتع و آبخیزداری، دوره ۶۶. شماره ۳. صفحات ۴۱۵-۴۰۱.

https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.36516

عابدینی، موسی؛ داریوش ابوالفتحی؛ مریم رئیسی (۱۴۰۱). پهنه‌بندی فرسایش حوضه آبریز رزن با استفاده از مدل‌های منطق فازی، EPM و BLM در محیط GIS، جغرافیا و توسعه. دوره ۲۰. شماره ۶۸. صفحات ۸۶-۶۲.

Doi:10.22111/GDIJ10.22111.2022.7002

عابدینی، موسی؛ فریده بهرام‌نیا؛ رئوف مصطفی‌زاده؛ امیرحسام پاسبان (۱۴۰۲). بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی در یک دوره بیست سال بر میزان فرسایش و رسوب حوضه رضی‌چای، جغرافیا و مطالعات محیطی. دوره ۱۲. شماره ۴۵. صفحات ۱۳۳-۱۱۴.

Doi:20.1001.1.20087845.1402.12.45.7.9

عابدینی، موسی؛ سجاد جوادی‌علی‌بابالو؛ رئوف مصطفی‌زاده؛ امیرحسام پاسبان (۱۴۰۱). ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه‌توپراقی، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۳۲. سال ۹. صفحات ۱۲۸-۱۰۵.

https://doi.org/10.22034/hyd.2022.51464.1636

قربانی، اردوان؛ زینب حزباوی؛ رئوف مصطفی‌زاده؛ نازیلا علائی (۱۳۹۹). تحلیل ارتباط بین سنجه‌های سیمای سرزمین و فرسایش خاک حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی، استان اردبیل، جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۹. شماره ۴. صفحات ۹۱-۶۵.

Doi:10.22067/geoeh.2021.67020.0

کلارستاقی، عطاالله؛ حسن احمدی؛ محمد جعفری؛ جمال قدوسی (۱۳۸۷). پیش‌بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل‌سازی احتمالاتی در حوضه آبخیز فریم صحرا استان مازندران، پژوهش و سازندگی. دوره ۲۱. شماره ۳. صفحات ۶۳-۵۲.

Doi: 20.1001.1.20087845.1402.12.45.7.9

معتمدی‌راد، محمد؛ محمدعلی زنگنه اسدی؛ حسین عجم (۱۴۰۲). بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل RUSLE و روش پسیاک اصلاح شده (مطالعه موردی: حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال ۱۱. شماره ۴. صفحات ۱۶۵-۱۴۷.

Doi:10.22034/GMPJ.2022.360813.1374

ملکی، صدیقه؛ فرهاد خرمالی؛ علیرضا کریمی (۱۳۹۳). معرفی الگوریتم‌های مختلف جریان، برای تهیه نقشه شاخص خیسی و کربن آلی خاک در بخشی از اراضی لسی، منطقه توشن استان گلستان، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره ۲۱. شماره ۱. صفحات ۱۶۵-۱۴۱.

https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1042417.html

نورائی‌صفت، الهام؛ مسعود بختیاری‌کیا؛ محمد اکبریان (۱۴۰۲). روند تغییرات هدررفت خاک با تأکید بر نقش فرسایشی رواناب در حوضه آبریز رودخانه کل (استان هرمزگان)، پژوهش‌های فرسایش محیطی. دوره ۱. شماره ۱۳. صفحات ۹۵-۷۰.

Doi:20.1001.1.22517812.1402.13.1.3.5

References

Ammar, A.K., Alaa, m., Fadhil, K., Alzahrani, H., Hamad, S (2023). Predicting Soil Erosion Rate at Transboundary Sub-Watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model, Sustainability, Vol 15, 1776.

https://doi.org/10.3390/su15031776

Arnoldus, H.M.J (1980). approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation M, De Boodt, D. Gabriels (Eds.), Assessment of Erosion, Wiley, Chichester, 127-132.

DOI: 10.4236/jgis.2012.46061

Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W., Musarat, M. A., Jabbar, T., Zafar, A (2010). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan, Ain Shams Engineering Journal, Vol 12, No 2, 1637-1649.

https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.015

Brini, I., Dimitrios, D., Kalaitzidis, Ch (2021). Linking Soil Erosion Modeling to Landscape Patterns and Geomorphometry: An Application in Crete, Greece, Appl. Sci, Vol 11, No 5684, 1-38.

https://doi.org/10.3390/app11125684

Chi, W., Wang, Y., Lou, Y., Na, Y., Luo, Q (2022). Effect of Land Use/Cover Change on Soil Wind Erosion in the Yellow River Basin since the 1990s, Sustainability, Vol 14, No 19, 1-16.

https://doi.org/10.3390/su141912930

Choudhury, M.K., Nayak, T (2003). Estimation of soil erosion in Sagar Lake catchment of Central India Proc, International Conference on Water and Environment, 387-392.

https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-015-0034-1

Dabral, P.P., Baithuri, N., Pandey, A (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing, Water Resources Management, Vol 22, No 12, 1783-1798.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-008-9253-9

Elsayed, A., Mostafa, A., Farag, O., Ahmad, B., Dmitry, E., Mohamad, S (2023). Integration of RUSLE Model, Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Soil Erosion Hazards in Arid Zones, Agriculture, Vol 13, No 35, 1-19.
DOI:10.3390/agriculture13010035

Imajjane, L., Belfoul, M., Elkadiri, R., Stokes, M (2020). Soil erosion assessmentin asemi aridenvironment: casestudy from the Argana Corridor, Morocco, EnvironmentalEarthSciences, Vol 79, 409.
https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-020-09127-8

Moore, I.D., Grayson, R.B (1991). Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application, Hydrol. Vol 5, 3-30
https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103

Olorunfemi, I.E., Komolafe, A.A., Fasinmirin, J.T., Olufayo, A.A. Akande, S.O (2020). A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models CATENA, Land, Vol 194, 104725.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725

Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C (2007). Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing, Water Resources Management, Vol 21, No 4, 729-746.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-006-9061-z

Qin, Ch. Z., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B. L., Scholten, T., Behrens, T., Zhou, CH. H (2009). An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient, Precision Agriculture, Vol 12, No 1, 32-43.
DOI:10.1007/s11119-009-9152-y

Renard, K.G. Freidmund, J.R (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factorin the RUSLE, Journal of Hydrology, Vol 157, 287-306.
https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4

Rejith, R.G., Anirudhan, s (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in hard rock Terrain Using Integrated Remote Sensing GIS and MCDM Techniques A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India, Gis and Geostatistical Techniques for Groundwater science, 349-364.
DOI:10.1016/B978-0-12-815413-7.00025-0

Sharma, A (2010). Integrating Terrain and Vegetation Indices for Identifying Potential soil Erosion Risk Area, Geo-Spatial Information Science, Vol 13, No 13, 201-209.
https://link.springer.com/article/10.1007/s11806-010-0342-6

Shin, G.J (1999). The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Gang-won National University, 47.
DOI: 10.4236/ojapps.2012.24B038

Ugese, A., Ajiboye, J., Ibrahim, E., Gajere, E., Shaba, A (2022). Soil Loss Estimation Using Remote Sensing and RUSLE Model in Koromi-Federe Catchment Area of Jos-East LGA, Plateau State, Nigeria, Geomatics, Vol 2, 499-517.
https://doi.org/10.3390/geomatics2040027

Vijith, H., Seling, L.W., Dodge-Wan, D (2018). Estimation of soil loss and identification of erosion risk zones in a forested region in Sarawak, Malaysia, Northern Borneo, Environment, Development and Sustainability, Vol 20, No 3, 1365-1384.

https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-017-9946-4

Wang, S., Wente, G.Z., Gertner, A (2020). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images Int. J. Remote Sens, Vol 23, No 18, 3649-3667.

https://doi.org/10.1080/01431160110114538

Waseem, M., Iqbal, F., Humayun, M., Latif, M., Javed, T., Leta, M (2023). Spatial Assessment of Soil Erosion Risk Using RUSLE Embedded in GIS Environment: A Case Study of Jhelum River Watershed, Applied sciences, No 13: 1-16.

https://doi.org/10.3390/app13063775

Whittington, D (2022). Improving the Performance of Contingent Valuation Studies in Developing Countries, Environ. Resour. Econ, No 22, 323-367.

https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015575517927

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D (1978). Predicting rainfall erosion, losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Handbook, Washington DC, Vol 537, 13-27.

DOI: 10.4236/jep.2016.710114