



<http://ui.ac.ir/en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
Vol. 34, Issue 1, No. 70, Spring 2018
pp. 13-16
Received: 04.07.2016 Accepted: 13.01.2018

Evaluation of erosion risk map based on hierarchical decision tree method, a case study: Semnan drainage basin

Khalil Rezaei*

Assistant Professor, Sedimentology, Department of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

**Corresponding author email: kh.rezaei@gmail.com*

Introduction

Today, Soil erosion has become one of the biggest problems in the country, especially in arid and semi-arid including Semnan. Effective and long term water and soil conservation programs require the concentration of resources on limited areas. For that purpose, regional-scale assessments of erosion risk are required. There are various methods to studying, evaluating, calculate and prevention with soil erosion. In addition, a number of parameters such as lithology, slope, aspect, land cover, elevation, and distance to stream, drainage density, vegetable cover, land use, river banks, and human activities are recommended to analyze the mechanism of soil erosion. So a rapid and cost effective methodological erosion assessment for these regions is required to describe and monitor the processes that control erosion. This study uses one of the remote sensing analyses to describe the contribution of several factors that control erosion in Semnan drainage basin where erosion is the major environmental problem. Remote sensing monitoring has been carried out by using aero photos, or multispectral images, DTM (Digital Terrain Model) or ALS (Airborne LASER Scanning) data. Semnan basin, study area, is located in north of Kavir plain and south of Alborz mountain range.

Material & Methods

This study was conducted to evaluate the potential of analyzing regional erosion risk Topography, land use; vegetation density, soil properties and climatic proxies are used to determine erosion risk and to provide basic maps of water and soil conservation practices. A hierarchical decision tree is used to sum and combine the weight of parameters controlling the erosion. The assigned weights of each spatial unit express the susceptibility to erosion. The most important attributes in the definition of erosion landforms like gullies were selected using decision tree induction algorithms, being these attributes spectral, altimetry and texture. Classifications hierarchical and by decision trees were carried out. Using decision tree the classification is performed only by a factor of scale, not allowing the identification of all the constituent features of the erosion landforms system. One of the advantages of this method is that it can be used if there are insufficient experimental data. The lack of experimental data can be compensated for through the use of expert evaluations.

Discussion of Results & Conclusions

Three different combinations of the three dominant controlling factors are yielded in this study. In order to optimize the qualitative erosion risk assessment, each combination is discussed and evaluated depending on the contribution of parameters involved in the erosion process. As different erosion landforms erosion is similar when presents the same evolution stage and soil type, it is not possible to select attributes to classify all erosion landform systems, being necessary to investigate attributes for each

erosion landform erosion, based on available data and existing land use classes in the area. The erosion landforms are the biggest erosive processes and, consequently, responsible for ambient, social and financial damages. Corrective and preventive measures need mapping and monitoring, which can be made by local measurements or by remote sensing. In relation to the remote sensing, the erosion landform erosion presents spectral heterogeneity (soil, vegetation, shade and water mix), spatial heterogeneity (existence of features as head, canals and digits with irregular forms and variable dimensions) and altimetry variation (with high declivity on the edges). Due to spectral heterogeneity, it is not enough use only spectral data, being necessary auxiliary data, as altimetry and texture data. This clearly shows that the study area is generally exposed to a high hazard of soil erosion. Nevertheless, there is a probability that the rate of erosion will increase in the future, as hazard is the probability of occurrence of a potential damaging phenomenon, within a period of time and a given area. As known, there is always an interest to depend on latest developments when making subjective judgments. In spite of the results obtained in this study, the development of a susceptibility map is usually determined by the needs and available resources, and AHP method can be equally important for all sorts of susceptibility zoning practices. The purpose of this study was to assess the soil erosion hazard in the Semnan province for planning appropriate conservation measures. The integrated GIS-AHP model was used to define spatial distribution of soil erosion hazard. In this area, erosion risk mainly was related with vegetation and

also, it anticipated that the southern and south-eastern region due to the poverty of vegetation associated with increased levels of erosion. In each of the three mapped models, the area of the class with high erosion sensitivity was more than 75% and for observational data, the area in all three maps is above 71%. Also, the results of the assessment show that in all three maps there are over 99% correlation between the data obtained from the modeling and the test data. The erosion landforms present spectral and spatial heterogeneity and altimetry variation. This research demonstrates that the model developed was an effective tool for fast assessment of soil erosion hazard by the integration of remote sensed data, AHP, and GIS techniques. Nevertheless, the results obtained in this study are valid only for generalized planning and assessment purposes. They may be less useful at the site-specific scale, where local geological and geographic heterogeneities may prevail. Finally, any proposed decision-making tool in erosion control studies should also include local experimentation data to better simulate the erosion hazard, resulting thereby in the most appropriate and efficient choice of soil conservation works.

Keyword: Sediment, Erosion, Remote Sensing, Modeling, GIS, Semnan.

References

- Agassi M. 1996. Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation. Marcel Dekker Inc., New York, p. 424.
- Bayramin I. Dengiz O. Baskan O. and Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Beypazar YArea. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 27:105-116.
- Bishr Y.A. and Radwan M.M. 1995. Preliminary design of a decision support system for watershed management. ITC Journal, 1:23-28.
- Biswas S. Sudhakar S. and Desai V.R. 1999. Prioritization of sub-watersheds based on morphometric analysis of drainage basin: a remote sensing and GIS approach. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 27 (3):155-166.
- Boardman J. and Vandaele K. 2010. Soil erosion, muddy floods and the need for institutional memory, Area, 42(4):502-513.
- Bouaziz M. Leidig M. and Gloaguen R. 2011. Optimal parameter selection for qualitative regional erosion risk monitoring: A remote sensing study of SE Ethiopia. Geoscience Frontiers 2(2):237- 245.
- Bouaziz M. Wijaya A. and Gloaguen R. 2009. Gully erosion mapping using aster data and drainage network analysis in the main Ethiopian rift. In: Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Cape Town, South Africa. p. I13-I16.
- Bryan R.B. 1977. Assessment of soil erodibility: new approaches and directions. In: Toy, T.J. (Ed.), Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery, Geoabstracts, Norwich. p. 57-72.
- Chen W. Xie X. Wang J. Pradhan B. Hong H. Bui D.T. Duan Zh. And Ma J. 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. CATENA, 151:147-160.
- Cerdan O. Souchere V. Lecomte V. Couturier A. Le and Bissonnais Y. 2002. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. CATENA 46 (2-3):189-205.
- Crepani E. de Medeiros J.S. Hernandez F.P. Galloti F.T. Duarte V. and Faria B.C.C. 2001. Remote Sensing and Geoprocessing Applied to the Ecological and Economical Zoning and to the Territorial Ordering, INPE-8454-RPQ/722, São José dos Campos, Brazil, p. 124 (in Portuguese with English abstract).
- Devi R. Tesfahun E. Legesse W. Deboch B. and Beyene A. 2008. Assessment of siltation and nutrient enrichment of Gilgel Gibe dam, Southwest Ethiopia. Journal of Bioresource Technology 99(5):975-979.
- Drzewiecki W. Wezyk P. Pierzchalski M. and Szafran-Ska B. 2013. Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Małopolska (Poland), Supported by an Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images, J. Pure and Applied Geophysics, DOI 10.1007/s00024-013-0669-7.
- Dupac M. 2010. Soil erosion and degradation based on sand particles transport caused by wind blowing, Natural Resource Modeling, 23(2):121-122.
- El-Swaify S.A. 1997. Factors affecting soil erosion hazards and conservation needs for tropical steeplands. Soil Technology 11: 3-6.
- Enters T. 1998. A framework for economic assessment of soil erosion and soil conservation. In: Penning de Vries, F.W.T., Agus, F., Kerr, J. (Eds.), Soil Erosion at Multiple Scales: Principles and Methods for Assessing Causes and Impacts. CAB Publishing, Wallingford, UK, p. 317-342.
- Essa S. 2004. GIS modeling of land degradation in Northern Jordan using Landsat imagery. In: Proceeding of the 20th ISPRS Congress 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, 505-510.
- Fernandes J. Bateirad C. Soares L. Faria A. Oliveira A. Hermenegildo C. Moura R. and Gonçalves J. 2017. SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. CATENA, 153:39-49.
- Foth L.T. and Turk L.M. 1972. Fundamentals of Soil Science, fifth ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 371.
- Frank T.D. and Isard S.A. 1986. Alpine vegetation classification using high resolution aerial imagery and topoclimatic index values. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52 (3): 381-388.
- Gahegan M. German G. and West G. 1999. Improving Neural Network Performance on the Classification of Complex Geographic Datasets. Journal of Geographical Systems, 1:3-2.
- Gessler P.E. Moore I.D. McKenzie N.J. and Ryan P.J. 1995. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. International Journal of Geographical Information Systems 9 (4):421-432.
- Grum B. Woldearegay K. Hessel R. Baartman J.E.M. Abdulkadir M. Yazewe E. Kessler A. Ritsem C. J. and Geissen V. 2017. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in

- northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM), *CATENA*, 159: 20-34.
- Harris M.T. and Boardman J. 1990. A rule-based expert system approach to predicting waterborne soil erosion. In: Boardman, J. Foster, D.L. Dearing, J.A. (Eds.) *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons, Chichester, p. 401-412.
- Hill J. Megier J. Mehl W. 1995. Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Reviews*, 12:107-130.
- Hurni H. 1993. Land degradation, famine and resource scenarios in Ethiopia. In: Pimental, D. (Ed.), *World Soil Erosion and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 27-61.
- Jain S.K. Dolezal F. 2000. Modeling soil erosion using EPIC supported by GIS, Bohemia, Czech Republic. *Journal of Environmental Hydrology*, 8:1-11.
- Kirkby M. 2001. Modeling the interaction between soil surface properties and water erosion. *CATENA* 46: 89-102.
- Kothyari U.C. 1996. Erosion and sedimentation problems in India. In: Wailing D.E. Webb B.W. (Eds.), *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, 236. IAHS Publication, 531-540.
- Li P. Mu X. Holden J. Wu Y. Irvine B. Wang F. Gao P. Zhao G. and Sun W. 2017. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau, *Earth-Science Reviews*, 170: 17-30.
- Li Zh. Zhang Y. Zhu Q. Yang S. Lia H. and Ma H. 2017. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area, *CATENA*, 148(2):195-203.
- Majaliwa M.J.G. Magunda M.K. Tenywa M.M. and Isabirye M. 2003. Effect of topography on soil erodibility in Kakuuto micro-catchment, Uganda. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 69(1):19-27.
- Martinez G. Weltz M. Pierson F.B. Spaeth K.E. and Pachepsky Y. 2017. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability, *CATENA*, 151:161-173.
- Martinez-Casasnovas, J.A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *CATENA* 50 (24): 293-308.
- Mitasova H. Hofierka J. Zlocha M. and Iverson L.R. 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5):629-641.
- Morgan R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*, second ed., Essex, New York, p. 320.
- Moore I.D. Gessler P.E. Nielson G.A. and Peterson G.A. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 2:443-452.
- Nearing M. A. Yin Sh. Borrelli P. and Polyakova V.O. 2017. Rainfall erosivity: An historical review. *CATENA*, 157:357-362.
- Oldeman L.R. Hakkeling R.T.A. and Sombroek W.G. 1990. *World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: An Explanatory Note*, Wageningen, Netherlands, p. 34.
- Oldeman L.R. 1994. The global extent of soil degradation. In: Greenland, D.J., Szabolcs, I. (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB International, Oxon, U.K., p. 115.
- Pickup G. and Chewings V.H. 1996. Correlations between DEM-derived topographic indices and remotely sensed vegetation cover in rangelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21:517-529.
- Quinton J.N. 1997. Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model EUROSEM, 30:101-117.
- Qyrgarden L. 2003. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway. 50 (2-4):217-242.
- Reusing M. Schneider T. and Ammer U. 2000. Modeling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS- 02/D2-stereo-data in a GIS. *Journal of Remote Sensing*, 21:1885-1896
- Rouse J.W. Haas R.H. Schell J.A. and Deering D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti E.P. Becker M.A. (Eds.), *Third Earth Resource Technology Satellite-1 Symposium*, vol. 1, Technical Presentations. NASA, Washington, D.C. p. 309-317.
- Singh G. Babu R. Narain P. Bhushan L.S. and Abrol I.P. 1992. Soil erosion rates in India. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47 (1): 97-99.
- Stocking M.A. and Murnaghan N. 2001. *A Handbook for the Field Assessment of Land Degradation*. Earthscan Publication, London, UK, p. 169.
- Sukhanovskii Y. P. 2010. Rainfall Erosion Model, *Eurasian Soil Science*, 43(9):1036-1046.
- Thornes J.B. Shao J.X. Diaz E. Roldan A. McMahon M. and Hawkes J.C. 1996. Testing the MEDALUS hillslope model. 26:137-160.
- Toy T.J. Foster G.R. and Renard K.G. 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control*. John Wiley & Sons, New York.
- Trimble W.S. 1990. Geomorphic effects of vegetation cover and management: some time and space considerations in predicting of erosion and sediment yield. In: Thornes, J.B. (Ed.), *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons Ltd., UK, p. 55-65.
- Van Rompaey A.J.J. and Govers G. 2002. Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(7): 663-680.
- Vrieling A. Sterk G. and Beaulieu N. 2002. Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(3):158-163.
- Wang L. Huang J. Du Y. Hu Y. and Han P. 2013. Dynamic Assessment of Soil Erosion Risk Using Landsat TM and HJ Satellite Data in Danjiangkou Reservoir Area, China, *Remote Sensing*, 5:3826-3848.
- Wijaya A. 2005. *Application of Multi-stage Classification to Detect Illegal Logging with the Use of Multi-source Data*, MSc. Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Yao H. Shi Ch. Shao W. Bai J. and Yang H. 2017. Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China, *CATENA*, 142:1-10.
- Yves L.B. Montier C. Jamagne M. Daroussin J. and King D. 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *CATENA*, 46(23):207-220.

ارزیابی نقشه حساسیت نسبت به فرسایش بر اساس روش تصمیم‌گیری درختی (مطالعه موردی): حوضه آبریز سمنان

خلیل رضایی، استادیار، گروه آموزشی زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران*

چکیده

امروزه، فرسایش خاک به یکی از بزرگ‌ترین معضله‌های کشور به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک از جمله سمنان تبدیل شده است. روش‌های مطالعه و ارزیابی متنوعی برای محاسبه فرسایش خاک و مقابله با آن وجود دارند و بکارگیری روشی سریع و مقرون‌به‌صرفه برای ارزیابی مناطق مستعد به فرسایش به‌منظور توصیف و پایش فرایند کنترل فرسایش ضروری و حیاتی است. در مطالعه حاضر، یکی از روش‌های سنجش از دور برای توصیف شیوه توزیع تعدادی از عوامل مؤثر در کنترل فرسایش در حوضه آبریز سمنان استفاده شده است. این حوضه آبریز در شمال دشت کویر و دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز قرار دارد و به علت شرایط آب‌وهوایی، فرایند فرسایش جزو مسائل مهم محیط طبیعی آن است. توپوگرافی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و داده‌های مؤثر آب‌وهوایی برای مشخص کردن حساسیت نسبت به فرسایش و تهیه نقشه پایه اقدام‌های حفاظت آب و خاک استفاده شدند. روش تصمیم‌گیری درختی برای جمع‌کردن و ترکیب وزن شاخص‌های کنترل فرسایش استفاده شد. وزن‌های اختصاص‌یافته به هر یک از واحدهای فضایی، میزان حساسیت به فرسایش را بیان می‌کند. سه نقشه از سه ترکیب متفاوت عوامل کنترلی فرسایش در منطقه مطالعه شده استخراج شدند و برای بهینه‌کردن ارزیابی کیفی حساسیت نسبت به، هر یک از ترکیبات ایجاد شده بسته به توزیع شاخص‌های دربرگیرنده فرایند فرسایشی بحث و ارزیابی شدند. در این منطقه، حساسیت نسبت به فرسایش خاک به‌طور عمده با پوشش گیاهی مرتبط است و پیش‌بینی می‌شود بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی منطقه به علت فقر پوشش گیاهی با افزایش میزان فرسایش همراه شوند. مساحت کلاس حساسیت زیاد فرسایش در هر سه نقشه الگوسازی شده بیش از ۷۵ درصد و برای داده‌های مشاهده‌ای نیز این مساحت در هر سه نقشه بیش از ۷۱ درصد است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهند در هر سه نقشه، همبستگی بیش از ۹۹ درصد بین داده‌های حاصل از الگوسازی و داده‌های آزمون وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: رسوب، فرسایش، سنجش از دور، الگوسازی، سمنان

مقدمه

فرسایش خاک فرایندی فیزیکی و یکی از خطرناک‌ترین سازوکارهای گسیختگی سطح زمین است که باعث کاهش حاصلخیزی خاک و آسیب به زمین‌های کشاورزی می‌شود (Oldeman 1994; Morgan 1995; El-Swaify 1997; Enters 1998; Boardman & Vandaele 2010; Dupac 2010). رفتن خاک‌های بارز برای کشت، پرشدن سدها و رودخانه‌ها از جمله نتایج اصلی آن هستند (Kothyari 1996; Biswas et al. 1999; Jain and Dolezal 2000). تأثیر اقتصادی فرسایش خاک در جایگزینی مواد مغذی هدررفته به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مواجه با کمبود منابع درخور توجه است (Reusing et al. 2000).

امروزه با توجه به شدت خشکسالی‌های پیاپی و تأثیر انسان در طبیعت و تخریب منابع زیست‌محیطی به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع، پدیده بیابان‌زایی باعث هجوم ماسه‌ها، تخریب مزارع و زیرساخت‌ها و در پی آن، مهاجرت روستاییان شده است. پیشروی بیابان‌ها در مرحله نخست فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری بیش از حد منابع طبیعی، روش‌های نامناسب و نادرست آبیاری، تغییرات آب‌وهوا و هدررفت آب و گرم شدن کره زمین را در پی داشته است. خاک طی فرایند فرسایش و تخریب از مواد معدنی و آلی تهی می‌شود و کم‌کم استعداد رویش در آن کاهش می‌یابد. فرسایش بر اثر موقعیت‌های مختلف و رویارویی با عوامل زمینی، خاک، منابع آب و پوشش گیاهی اتفاق می‌افتد و عوامل طبیعی مانند نوع سازندهای زمین‌شناسی، بافت خاک، اقلیم، تغییر کاربری اراضی در کنار عوامل انسانی، اجتماعی، اقتصادی و افزایش جمعیت، نابودی جنگل‌ها و مراتع، زراعت نادرست و چرای کنترل‌نشده دام به شتاب گرفتن فرسایش خاک به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه کمک می‌کنند (Stocking and Murnaghan 2001).

در مقوله فرایندهای فرسایشی، بیشتر پژوهشگران در پی روشی کمی برای تهیه نقشه مقادیر فرسایش و پراکندگی مکانی دقیق آن هستند (Singh et al. 1992; Martinez- Casasnovas 2003).

Qyrgarden 2003; Essa 2004; Chen et al. 2017; Fernandes et al. 2017; Grum et al. 2017). اگرچه مطالعه‌های اندکی درباره روش‌های نقشه‌برداری کیفی حساسیت نسبت به فرسایش وجود دارند (Li et al. 2017; Li et al. 2017; Martinez et al. 2017)، بدیهی است ارزیابی کیفی مبتنی بر شناخت عوامل فرسایش به‌منظور انجام اقدام‌های حفاظت خاک، برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر در هر منطقه بسیار مفید است و تخریب زمین را کاهش می‌دهد. مطالعه‌های متعددی درباره فرایندهای فرسایشی انجام شده‌اند (Oldeman et al. 1990; Humi 1993; Devi et al. 2008). چندین الگو و روش فرسایش خاک از جمله الگوی MPSIAC، معادله جهانی خاک (USLE)، الگوی جایگزین آن یعنی تجدیدنظر در معادله جهانی خاک (RUSLE)، الگوی ارزیابی فرسایش خاک (برای نمونه، الگوی ICONA)، الگوی SIMWE، الگوی LISEM، الگوی QUERIM و ... برای ارزیابی یا پیش‌بینی فرسایش کیفی یا کمی خاک توسعه یافته‌اند.

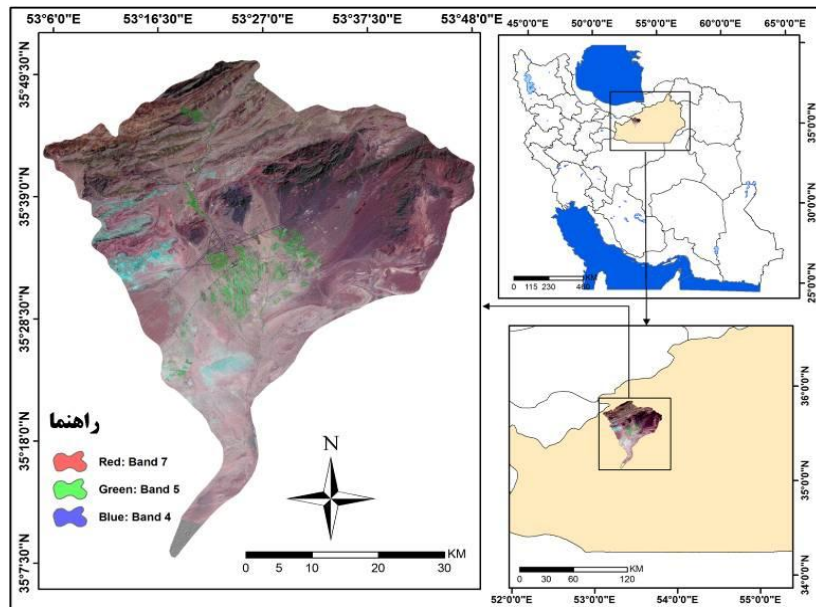
جمع‌آوری داده‌های ورودی، مشکل بزرگی است که با مطالعه‌های سنجش از راه دور تا حدی از شدت آن کاسته می‌شود. سنجش از دور، منبع مهم اطلاعاتی برای تهیه الگوی فرسایش خاک در مقیاس منطقه‌ای است و پس از انجام تغییرات لازم در آن با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تجزیه و تحلیل می‌شود. هدف مطالعه حاضر، استفاده از داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، ترکیب با GIS و ارائه سه نقشه کیفی خطر فرسایش بر اساس عوامل مؤثر بر فرسایش خاک و بهینه‌سازی نظارت بر حساسیت کیفی فرسایش است. به کمک مطالعه حاضر، مناطقی شناسایی شدند که به سنجش حفاظت آب و خاک نیاز داشتند. سپس داده‌های لازم برای اجرای این الگو از تصاویر ماهواره‌ای و دانش کارشناسان متخصص به دست آمد. در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌های ترکیبی با استفاده از قواعد کیفی تصمیم‌گیری، نظامی سلسله‌مراتبی از شدت فرسایش خاک ارائه داد.

هر یک از بخش‌های حوضه مطالعه‌شده و تأثیرپذیری از هر کدام از عوامل را بررسی کند.

منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبریز سمنان یکی از نواحی خشک و دارای میزان بارندگی بسیار کم و بارش‌های نامنظم است که در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و فاصله ۵۳ درجه و ۴ دقیقه و ۳۶/۴۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۴۸ دقیقه و ۵۴/۳۹ ثانیه شرقی و ۳۵ درجه و ۷ دقیقه و ۳۸/۸۰ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲۵/۳۳ ثانیه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت حوضه یادشده حدود ۲۱۹۶۷۶ هکتار و با میانگین بارش ۹۰ میلی‌متر در سال جزو نواحی خشک است. میانگین ارتفاع حوضه از سطح دریا نیز حدود ۲۰۳۳ متر است.

مناطق مختلف حوضه آبریز سمنان به علت شرایط ویژه اقلیمی، بادهای شدید و گاه ویرانگر، سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش و خاک سست و فقدان پوشش گیاهی مناسب در بسیاری مناطق از خطر فرسایش خاک در امان نیستند و به تدریج بر وسعت مناطق بیابانی این استان افزوده و از میزان خاک‌های مستعد و حاصلخیز آنها کاسته می‌شود. شرایط اقلیمی حاکم بر استان سمنان و بهره‌برداری بیش از حد منابع طبیعی باعث شده‌اند ۵ میلیون و ۲۰۰ هزار هکتار عرصه بیابانی و ۱ میلیون و ۲۶۰ هزار هکتار اراضی استان تحت تأثیر فرسایش بادی قرار گیرد (ارزانی و همکاران ۱۳۸۶) و به مهاجرت روستاییان منجر شود. تاکنون بررسی‌های نقشه‌برداری از خطر فرسایش در مقیاس منطقه‌ای در سمنان انجام نشده‌اند و مقاله حاضر می‌کوشد بر اساس شاخص‌های مؤثر در فرایند حساسیت نسبت به فرسایش، مقادیر فرسایش



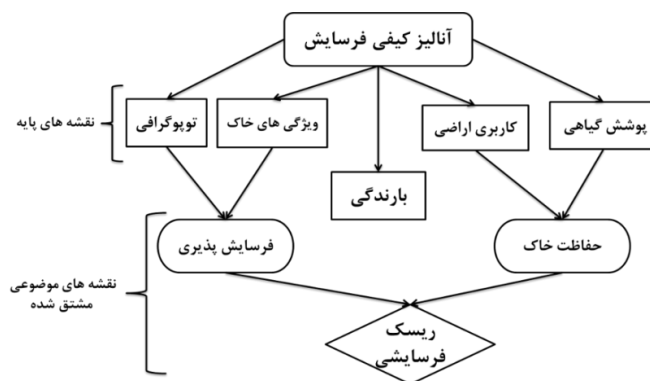
شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در سطح کشور با تصویر RGB لندست ۸

روش پژوهش
روش‌های متعددی از جمله روش‌های USLE، MPSIAC، SIMWE، LISEM، RUSLE و ICONA برای بررسی مسئله فرسایش توسعه یافته‌اند (Moor et al. 1993; Radwan and Bishr 1995; Gessler et al. 1995; Hill et al. 1995; Mitasova et al. 1996; Thornes et al. 1996; Bouaziz et al. 2009). برای ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش در حوضه آبریز سمنان، مطالعه‌ای موردی روش‌شناختی با روش‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی به شکل کیفی در منطقه یادشده انجام شد؛ بر اساس هدف پژوهش، ارزیابی کیفی فرسایش بر

روش‌های متعددی از جمله روش‌های USLE، MPSIAC، SIMWE، LISEM، RUSLE و ICONA برای بررسی مسئله فرسایش توسعه یافته‌اند (Moor et al. 1993; Radwan and Bishr 1995; Gessler et al. 1995; Hill et al. 1995; Mitasova et al. 1996; Thornes et al. 1996; Bouaziz et al. 2009). برای ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش در حوضه آبریز سمنان، مطالعه‌ای موردی روش‌شناختی با روش‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی به شکل کیفی در منطقه یادشده انجام شد؛ بر اساس هدف پژوهش، ارزیابی کیفی فرسایش بر

نقشه رقومی ارتفاع (DEM) با استفاده از داده‌های ASTER با دقت مکانی ۳۰ متر تهیه و برای استخراج و تهیه نقشه شاخص‌های ژئومورفولوژیکی منطقه شامل شیب، شبکه آبراهه‌ها و جهت شیب استفاده شد. در مطالعه حاضر، عوامل اقلیمی در قالب بارندگی بررسی شدند. ابتدا، داده‌ها به شکل نقطه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح حوضه و اطراف آن تهیه و سپس طی فرایند درون‌یابی به کل سطح حوضه تعمیم داده شدند. داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک از نقشه خاک‌شناسی کشور و اطلاعات کاربری اراضی از طبقه‌بندی تصاویر سنجنده OLI مربوط به لندست ۸ با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) تهیه شدند.

اساس عمده عوامل مؤثر در فرسایش شامل بارندگی سالانه، کاربری اراضی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی انجام شد (Bouaziz et al. 2011). گفتنی است در پژوهش حاضر، قوانین تصمیم‌گیری و سازماندهی سلسه‌مراتبی شاخص‌های مؤثر بر اساس قضاوت مهندسی و دانش کارشناسی انجام شده‌اند. روش‌های مشابه و موفق پیشین، فرسایش خاک را در مقیاس‌های مختلف الگوسازی کرده‌اند (Boardman and Harris 1990; Cerdan et al. 2002). مقایسه الگوها نیز در بسیاری از نقاط جهان برای تهیه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش بر اثر تخریب سرزمین به‌واسطه فرسایش انجام شده است (Quinton 1997; Sukhanovskii 2010).



شکل ۲- الگوی مفهومی روش پژوهش

بین کم و شدید وزندهی شد و در آن به تأثیر بر فرسایش خاک و همپوشانی پنج عامل یادشده توجه شد. این فرایند در روند تصمیم‌گیری نمایش داده شده است (جدول‌های ۱ و ۲).

داده‌های حاصل برای تولید سه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش مشتق‌شده از نقشه‌های مکانی استفاده شدند (شکل ۲). میزان حساسیت نسبت به فرسایش به‌طور کیفی

جدول ۱- قوانین تصمیم‌گیری برای فرسایش‌پذیری خاک (Bouaziz et al. 2011)

	نوع خاک		
	Rock outcrops/ Inceptisols	Aridisols/ Entisol	Salt flats/ Bad lands
	کم	متوسط	زیاد
کلاس‌های شیب	کم	کم	متوسط
(درصد)	۲-۰	متوسط	متوسط
	۵-۲	کم	زیاد
	۱۵-۵	زیاد	زیاد
	۳۵-۱۵	خیلی زیاد	خیلی زیاد
	>۳۵	زیاد	خیلی زیاد

جدول ۲- قوانین تصمیم‌گیری برای حفاظت خاک (Bouaziz et al. 2011)

		پوشش‌های سطحی				
		سطوح آبی	اراضی کشاورزی	مراعی	اراضی نمکی	زمین‌های بایر
		کم	متوسط	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
کلاس‌های	> ۵۰	کم	کم	کم	متوسط	متوسط
پوشش گیاهی	۵۰-۳۵	متوسط	کم	متوسط	متوسط	زیاد
(درصد)	۳۵-۲۰	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	۲۵-۰	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد

هندسی و رفع ابهام اتمسفری انجام شدند. پیش‌پردازش تصاویر با نرم‌افزار PCA Geomatica نسخه ۹/۱ انجام و از نرم‌افزار ENVI 4.8 برای پردازش و تحلیل استفاده شد. اختلالات مختلف اتمسفری با الگوی FLAASH و در محیط نرم‌افزار PCA Geomatica 9.1 تصحیح شدند. افزایش خطی کنتراست، روشی برای بهبود مکانی است که به منظور اصلاح شاخص‌های ژئومتریکی و شکلی مؤثر بر منطقه و بهینه‌کردن تفسیر بصری انجام شد. لایه بارندگی سالانه منطقه مربوط به سال ۲۰۱۴ نیز از طریق درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح و اطراف حوضه تهیه شد. لایه شیب پس از استخراج از لایه ارتفاع و خاک پس از رستری شدن برای تولید لایه فرسایش‌پذیری بر اساس تابع خطی با هم ترکیب شدند (جدول ۱). در نهایت، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، بارندگی، پوشش گیاهی و داده‌های توپوگرافی با سه ترکیب مختلف موجود در جدول ترکیبات عوامل برای تولید سه نقشه متفاوت حساسیت نسبت به فرسایش استفاده شدند. روش‌های سنجش از دور و استفاده از GIS در فلوچارت مطالعه نشان داده شده‌اند (شکل ۲)؛ همچنین شکل (۲)، ادغام دانش کارشناسی برای ارزیابی و تعریف حساسیت‌پذیری حوضه به فرسایش را نشان می‌دهد. روی هم‌اندازی و ترکیب لایه‌های مختلف در درخت تصمیم‌گیری بر اساس الگوی مقایسه زوجی به‌عنوان میانگین ارتباط خطی بین عوامل مؤثر در فرسایش انجام شده است.

مبانی فرایند حساسیت نسبت به فرسایش

نمودار روش پژوهش، پنج لایه ورودی متفاوت لازم را نشان

بریان و همکاران (Bryan et al. 1977) روش کیفی مشابهی را برای ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش استفاده کردند که شامل فاز پیش‌بینی، توصیف و ادغام و شروع با فاز پیش‌پردازش بود و با تهیه پایگاه داده از داده‌های رستری با اندازه پیکسل ۳۰ متر از داده‌های سنجش از دور همراه بود. سپس، به شرح پیش‌بینی حساسیت هر یک از عوامل کنترل فرسایش پرداختند و در نهایت، با ایجاد ترکیبات C_A ، C_B و C_C (Bouaziz et al. 2011) به فاز ادغام رسیدند (جدول ۳). روش کلی کار در شکل (۲) آمده است.

جدول ۳- شاخص‌های ورودی برای سه ترکیب مختلف ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش

		ترکیبات		
		C^A	C^B	C^C
فاکتورهای	توپوگرافی	X	X	X
	ویژگی‌های خاک	X	X	X
	بارندگی	---	X	X
	پوشش گیاهی	X	---	X
	کاربری اراضی	X	X	X

بر اساس اطلاعات نقشه خاک که سازمان FAO (پایگاه هم‌خوان جهانی خاک، ۲۰۰۹) تهیه کرده است، شش نوع مختلف و ترکیبی خاک در سطح منطقه تشخیص داده شدند که به سه کلاس مختلف از نظر فرسایش‌پذیری تقسیم شدند. در مرحله بعد، تصاویر OLI لندست ۸ دریافت و با استفاده از روش طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی به بخش‌های مختلف کاربری اراضی در حوضه آبریز سمنان تقسیم شدند. برای تفسیر بهتر تصاویر، عملگرهای پیش‌پردازش به منظور تصحیح

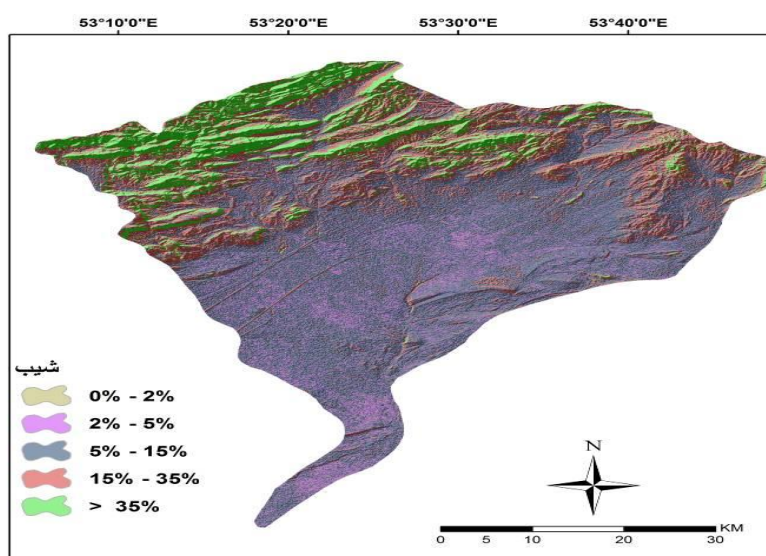
ویژگی‌های کنتراهای توپوگرافیکی بر ویژگی‌های خاک (Moore et al. 1993)، میکرواقلیم، توزیع پوشش گیاهی (Frank et al. 1986)، رواناب و رطوبت در دسترس (Moore et al. 1996; Chevings and Pickup 1993) اثر می‌گذارد (جدول ۴). در مطالعه حاضر، مقادیر شیب (به درجه) برای هر یک از پیکسل‌های ارتفاعی DEM حاصل از داده‌های سنجنده ASTER تولید و به پنج کلاس تقسیم شدند (شکل ۳).

می‌دهد (شکل ۲). در این کار، بجز داده‌های بارندگی، جمع‌آوری شاخص‌های کنترلی فرسایش از راه روش‌های سنجش از دور و GIS انجام شد. در ادامه، شاخص‌های یادشده و همچنین تعیین و ارزیابی آسیب‌پذیری نسبی فرسایش خاک شرح داده می‌شود.

شاخص‌های اصلی کنترل فرسایش

توپوگرافی - نقشه شیب

فرایند فرسایش خاک به شدت از توپوگرافی تأثیر می‌پذیرد.



شکل ۳- نقشه شیب منطقه مطالعه شده

رسوبات تولید شده حاصل از فرسایش خاک می‌توانند ذخایر و کانال‌های انتقال آب را پر کنند و با قابلیت آلوده‌کنندگی خود و حمل مواد شیمیایی جذب‌شده به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها باعث آسیب به کیفیت آب آنها شوند؛ علاوه بر این، برخی خاک‌ها دارای قابلیت ذاتی بیشتری در فرسایش‌پذیری نسبت به دیگر خاک‌ها هستند (Toy et al., 2002). مطالعه‌های (Agassi (1996), Turk and Bryan (1997), Foth (1972) و Majaliwa et al. (2003) نشان دادند خاک‌های بسیار فرسایش‌پذیر نسبت به خاک‌های مقاوم در برابر فرسایش تا ۱۰ برابر نسبت به فرایند فرسایش حساس‌تر هستند؛ بنابراین، توصیف ویژگی‌های خاک منطقه مطالعه شده

مقادیر آستانه برای هر یک از کلاس‌ها به ترتیب عبارتند از: درجه شیب‌های صفر تا ۲ درصد، ۲ تا ۵ درصد، ۵ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۵ درصد و ۳۵ تا ۴۵ درصد. مقادیر نسبی کلاس‌های شیب و سطح پوشش داده شده در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- کلاس‌های شیب در منطقه مطالعه شده

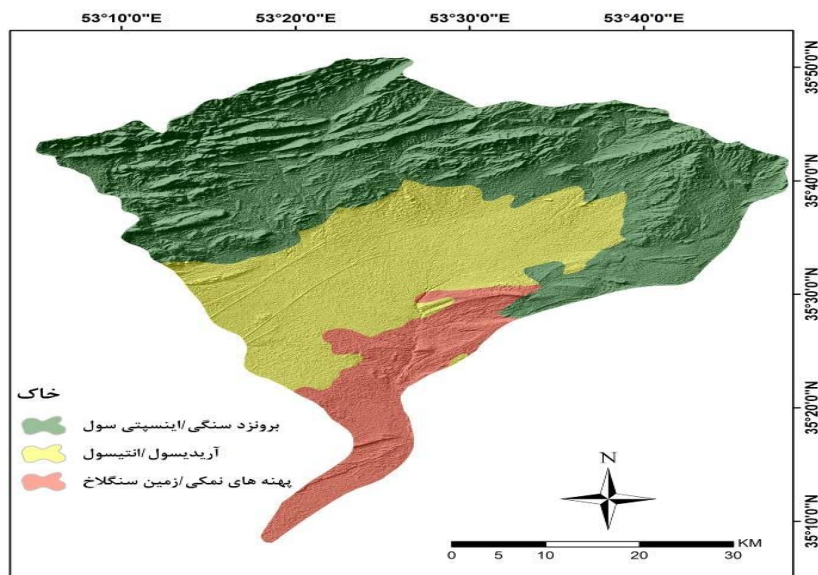
	کلاس‌های شیب				
	۰-۲٪	۲-۵٪	۵-۱۵٪	۱۵-۳۵٪	> ۳۵٪
مساحت (هکتار)	۵۶۳۵	۲۳۰۸۸	۱۰۸۹۹۱	۵۰۵۱۸	۳۱۴۴۴
مساحت (درصد)	۳	۱۰	۴۹	۲۳	۱۴

داده‌های مرجع FAO تعیین شد. مساحت ناحیه‌ای که هر یک از کلاس‌های خاک پوشش داده‌اند، در جدول (۵) مشاهده می‌شود.

جدول ۵- مساحت کلاس‌های خاک اشغال شده از سطح حوضه مطالعه شده

	نوع خاک		
	Rock outcrops/ Inceptisols	Aridisols / Entisols	Salt flats/ Bad lands
مساحت (هکتار)	۲۷۹۶۲/۸	۶۳۶۰۸/۳۴	۱۲۸۲۶۱/۹۱
مساحت (درصد)	۱۳	۲۹	۵۸

نیازمند آگاهی از حساسیت خاک‌ها نسبت به فرسایش است. سازمان خواروبار جهانی (FAO) ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل محتوای شن و ماسه و توزیع اندازه دانه‌های خاک‌های مختلف را به شکل نقشه تهیه کرده است (Harmonized World Soil Data Base, Version 1.1, March (2009). نقشه خاک FAO شامل برخی شاخص‌ها نظیر کانی‌شناسی رسی، عمق خاک، حساسیت‌پذیری خاک و زمین برای پوشش‌های گیاهی ویژه، رطوبت خاک، ظرفیت ذخیره‌سازی و کلاس‌های زهکشی خاک است. شش نوع خاک مشاهده شده در منطقه مطالعه به سه کلاس تقسیم‌بندی شدند: ۱. خاک‌های توسعه‌نیافته در نواحی کوهستانی و صخره‌ای؛ ۲. خاک‌های مناطق خشک و خاک‌های اولیه؛ ۳. دشت‌های نمکی و بدلندها (شکل ۴). حساسیت به فرسایش بر اساس شاخص‌های یادشده و پایگاه



شکل ۴- نقشه خاک منطقه مطالعه شده

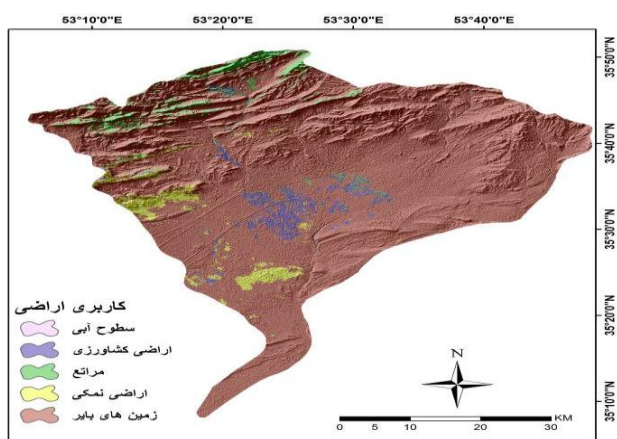
از طبقه‌بندی انجام و سپس طبقه‌بندی شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) روی تصاویر اعمال شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش مطلوبی برای طبقه‌بندی کاربری و پوشش اراضی محسوب می‌شود، زیرا برای انواع داده‌ها در مقیاس‌های آماری گوناگون استفاده‌شدنی است (Gahegan et

کاربری اراضی

فرایند فرسایش خاک با نواحی دارای شرایط محیطی متفاوت از نظر پوشش گیاهی و ناپایداری شیب بسیار منطبق است. تصویر OLI لندست ۸ (۲۰۱۴) با شرایط پژوهش حاضر برای مطالعه منطقه مدنظر متناسب بود. پیش‌پردازش تصاویر پیش

جدول ۶- مساحت کلاس‌های کاربری اراضی در سطح حوضه مطالعه‌شده

زمین‌های بایر	اراضی نمکی	پوشش‌های سطحی		مساحت (هکتار)
		سطوح آبی	مراعات کشاورزی	
۱۹۸۱۹۱/۶۱	۷۳۲۸/۹۶	۹۵/۸۹	۸۳۱۷/۵۵	۵۸۹۷/۹۶
۹۰	۳	۰/۵	۴	۲/۵
مساحت (درصد)				



شکل ۵- نقشه پوشش کاربری اراضی در سطح منطقه مطالعه‌شده

اقلیم

اقلیم، یکی از مهم‌ترین عوامل در کنش متقابل با دیگر عوامل است که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر فرسایش خاک تأثیر می‌گذارد (Toy et al. 2002). بارندگی، مهم‌ترین متغیر اقلیمی مؤثر در فرسایش خاک است که به تنهایی در نظر گرفته می‌شود و با پرداختن به فرسایش از راه برخورد درخور توجه قطره‌های باران به سطح خاک و جریان آب روی سطح خاک برجسته می‌شود؛ بنابراین، همواره از بین رفتن خاک با مقدار بارندگی مرتبط است که شاخصی اقلیمی در ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش است. مشاهده‌ها و اطلاعات در دسترس از منطقه مطالعه‌شده و بررسی آنها نشان می‌دهند اگرچه جریان آب روی سطح خاک اتفاق می‌افتد، ایجاد رواناب ناگهانی نیست و اساساً در فصل بارندگی رخ

به‌طورکلی سه مرحله در طبقه‌بندی شبکه عصبی وجود دارد: مرحله اول، فرایند آموزش شبکه با استفاده از داده‌های ورودی است؛ مرحله دوم، فاز اعتبارسنجی و آزمون خطای شبکه است که موفقیت فاز آموزشی و درستی شبکه را تعیین می‌کند؛ مرحله سوم، شبیه‌سازی و طبقه‌بندی است که نقشه طبقه‌بندی‌شده پوشش یا کاربری اراضی را ایجاد می‌کند (Wijaya 2005). اطلاعات ورودی شامل ۶ نورون و بیان‌کننده تعداد باندهای تصویر لندست استفاده‌شده بود. تعداد نورون‌های لایه میانی برای شبکه با انتخاب ۵ لایه آغاز و خروجی هر شبکه با افزایش تعداد لایه‌ها به مقادیر واقعی نزدیک‌تر و بهترین خروجی با انتخاب ۹ لایه دریافت شد و دقت خروجی شبکه با ۱۰ لایه درونی کاهش یافت. خروجی هر شبکه با میانگین مجذور مربع خطا و برازش رگرسیون کنترل شد و درنهایت، لایه خروجی شامل ۱ نورون بود. شبکه با ۹ نورون در لایه میانی و در تکرار پنجم با مقدار RMSE برابر ۰/۰۸۱۸۵ بهترین عملکرد را داشت. در پژوهش حاضر از روش MLP بر پایه الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا و الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت^۳ استفاده شد. نتایج طبقه‌بندی کلاس‌های کاربری زمین در شکل (۵) و جدول (۶) نمایش داده شده‌اند. نقشه طبقه‌بندی حاصل دارای درصد درستی^۴ عملیات برابر ۹۱/۵ درصد و متوسط درصد اطمینان^۵ برابر ۸۹/۲ درصد و ضریب کاپای کلی برابر ۰/۸۷ است. هر یک از کلاس‌های موجود در نقشه پوشش سطحی از نظر فرسایش خاک با رفتار ویژه‌ای مرتبط است. اراضی بایر و نواحی شور، پوشش غالب منطقه مطالعه‌شده را تشکیل داده‌اند و بیشتر حساسیت خاک نیز به این دو بخش از پوشش سطحی مربوط است.

¹ Root-Mean-Square Error

² Multi Layer Perceptron

³ Levenberg-Marquardt

⁴ Accuracy

⁵ Reliability

تعدیل‌شده تبدیل خاک^۴ (TSAVI)، شاخص گیاهی تعدیل‌شده تغییر خاک^۵ (MSAVI)، شاخص گیاهی تعدیل بهینه خاک^۶ (OSAVI) و چندین شاخص گیاهی دیگر نیز برای به حداقل رساندن آثار خاک و اتمسفر ارائه شده‌اند. در پژوهش حاضر، از شاخص NDVI استخراج‌شده از تصویر OLI لندست ۸ (۲۰۱۴) برای تعریف کیفی پوشش گیاهی استفاده شد؛ این شاخص یکی از پرکاربردترین شاخص‌های گیاهی و برای هدف مدنظر در منطقه مطالعه شده بسیار مناسب است. در لندست ۸، برای استخراج این شاخص از نسبت تفاضلی بانندی قرمز به مادون قرمز (-NIR) (NIR+RED)/(RED) استفاده شد. پوشش گیاهی متغیری فصلی است که فرسایش را کنترل می‌کند. لایه NDVI تولیدشده (شکل ۷) برای تولید لایه پوشش گیاهی در چهار گروه طبقه‌بندی شد و در ترکیب C_A، لایه پوشش گیاهی با نقشه آن برای انجام تحلیل حفاظت خاک تولید شد (جدول ۲).

می‌دهد. بارندگی طی فصل خشک نیز اتفاق می‌افتد، اما مقدار آن بسیار ناچیز و معمولاً بدون رواناب است؛ از این رو، عمده بارندگی در منطقه مطالعه شده در فصل آبی انجام و از آن برای ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش استفاده می‌شود. داده‌های بارندگی ماهانه سال ۲۰۱۴ از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح حوضه و اطراف آن از سازمان آب‌وهواشناسی استان سمنان دریافت شدند (جدول ۷). سپس، مجموع سالانه داده‌ها به شکل نقطه‌ای در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و با استفاده از روش معکوس فاصله وزن‌دار^۱ (IDW) درون‌یابی و به کل سطح حوضه تعمیم داده شد؛ به این ترتیب، نقشه بارندگی سالانه حوضه مطالعه شده حاصل شد که توزیع فضایی بارش باران در سطح حوضه را نشان می‌دهد (شکل ۶). در پژوهش حاضر، این نقشه در ترکیب‌های C_B و C_C برای فراهم کردن دو نقشه متفاوت حساسیت نسبت به فرسایش استفاده شد.

شاخص پوشش گیاهی

پوشش گیاهی یکی از عوامل کنترلی فرسایش و بیشتر متأثر از دخالت‌های انسانی است؛ این عامل یکی از عوامل مهم در هر نوع الگوی پیش‌بینی‌کننده است (Trimble 1990) و چندین نوع شاخص پوشش گیاهی با استفاده از اعمال روش نسبت باندهای طیفی برای نشان دادن پوشش گیاهی استفاده می‌شوند. شاخص نرمال‌شده نسبت تفاضل بانندی^۲ (NDVI) که Rouse و همکاران (۱۹۷۴) آن را توسعه دادند، یکی از پرکاربردترین شاخص‌های گیاهی در بین پژوهش‌های کاربردی مختلف سنجش از دور است. همچنین شاخص‌های گیاهی پیشرفته‌تری نظیر شاخص گیاهی تعدیل‌شده خاک^۳ (SAVI) که بازتاب از سطح خاک را در نظر می‌گیرد، برای بهبود ارزیابی پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند. شاخص گیاهی

⁴ Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

⁵ Modified Soil Adjusted Vegetation Index

⁶ Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

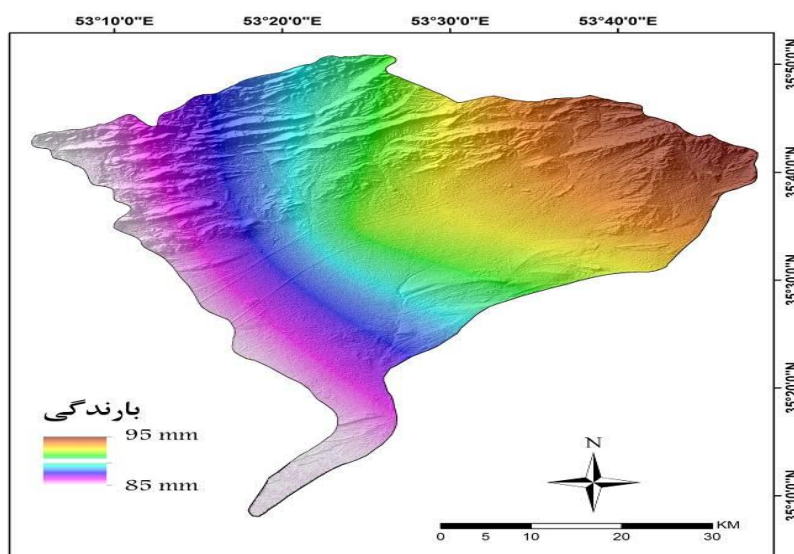
¹ Inverse Distance Weighted

² The Normalized Difference Vegetation Index

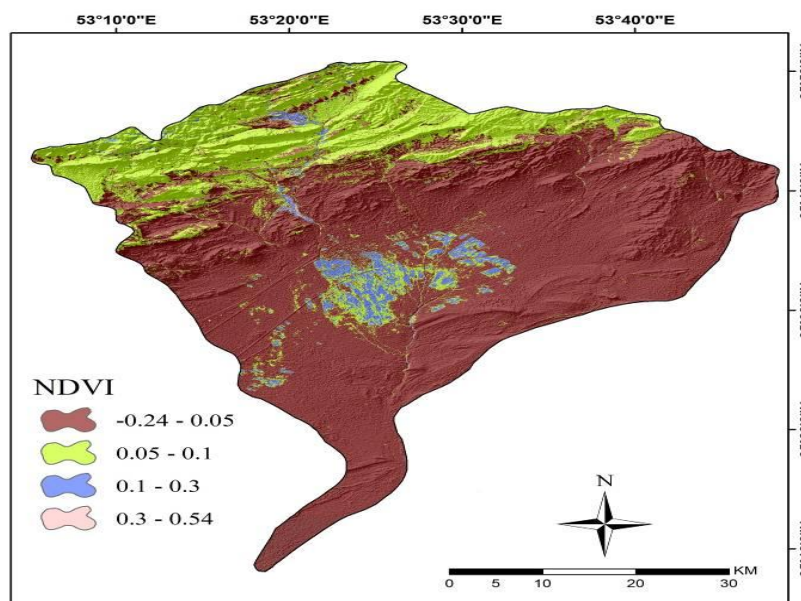
³ soils adjusted vegetation indices

جدول ۷- مجموع بارندگی‌های اندازه‌گیری‌شده در سال ۱۳۹۴ در محل ایستگاه‌های سینوپتیک سطح منطقه

نام ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
بیارجمند	۰	۰/۳	۱۴/۴	۱۱/۹	۵/۳	۳/۴	۰	۰	۰/۷	۵/۳	۱۶/۴	۸/۴	۶۶/۱
دامغان	۲/۴	۰	۲۴	۱۲/۱	۳/۹	۷/۳	۰/۶	۰/۲	۴۰/۲	۵/۹	۹/۷	۱/۱	۱۰۷/۲
سمنان	۵/۹	۰	۱۹/۲	۱۷/۶	۶۶	۱۳	۱	۰	۰	۷	۶/۲	۱۵/۳	۹۱۸
شاهرود	۱/۳	۰/۴	۲۳/۳	۳۶/۴	۱۵/۹	۶۶	۰	۰	۰	۸	۲۲/۱	۴	۱۱۸
گرمسار	۳/۵	۰/۸	۳۰/۶	۵/۷	۱۳	۲۳	۰	۰	۰	۱/۵	۹۶	۶/۳	۶۱۶



شکل ۶- نقشه بارندگی منطقه مطالعه شده

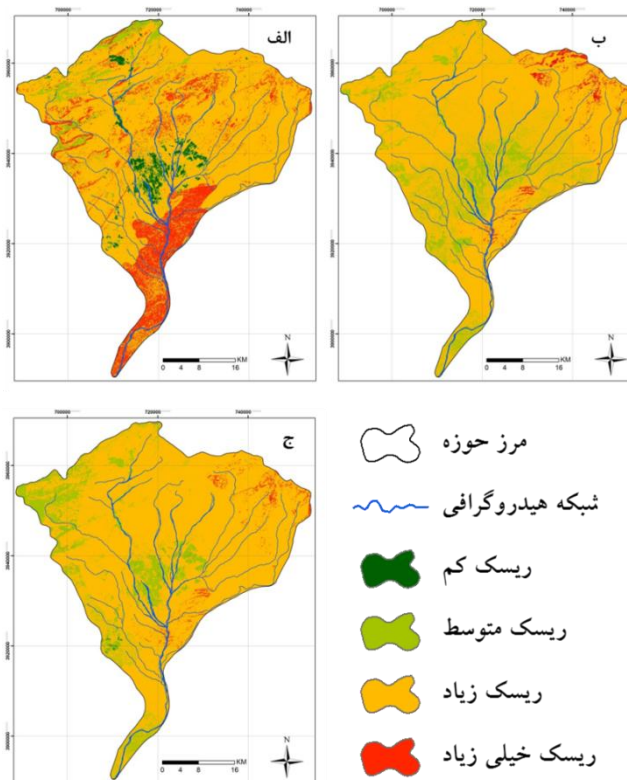


شکل ۷- نقشه طبقه‌بندی شده شاخص NDVI منطقه مطالعه شده

نقشه‌های حساسیت نسبت به فرسایش

نقشه‌های حساسیت نسبت به فرسایش خاک با توجه به ارتباط عوامل کنترل‌کننده فرسایش (توپوگرافی، کاربری اراضی، نقشه خاک، پوشش گیاهی و بارندگی) در چند ترکیب تولید شدند (شکل ۸). نقشه‌ها با رده‌بندی از کم به بسیار زیاد در چهار طبقه کلاس‌بندی شدند. سه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش برای نشان‌دادن رتبه حساسیت نسبت به فرسایش در

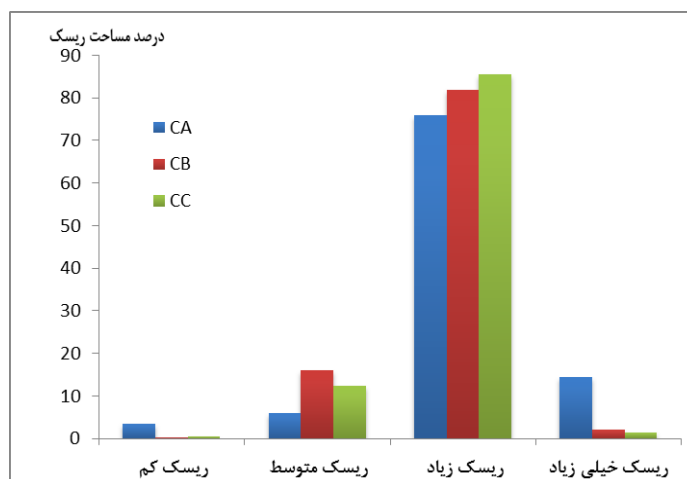
حوضه آبریز سمنان تولید و چهار رنگ برای سه نقشه خروجی مربوط به هر یک از کلاس‌های فرسایشی استفاده شد. بر اساس شکل ۵، توزیع کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش به الگوی اجرا شده بستگی دارد. بیشترین مساحت در حوضه مطالعه شده مربوط به نواحی دارای حساسیت زیاد با مقادیر $۸۵/۵$ و $۸۱/۹$ درصد به ترتیب در ترکیب C_C و C_B قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۹ و ۱۰ و جدول ۸).



شکل ۸- نقشه حساسیت نسبت به فرسایش برای سه ترکیب استفاده شده در پژوهش. الف. CA، ب. CB، ج. CC

جدول ۸- توزیع درصد مساحت متأثر از هر یک از کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش

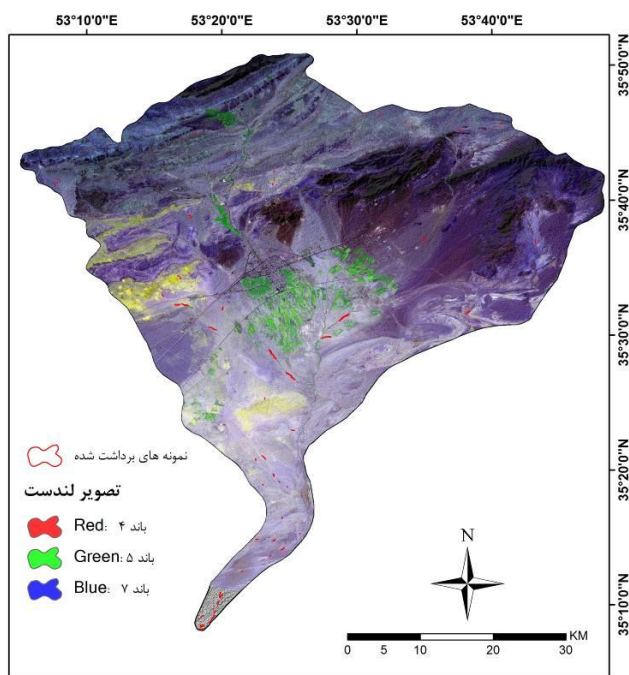
	ترکیبات ریسک فرسایش		
	C^C	C^B	C^A
ریسک کم	۰/۵	۰/۱	۳/۵
ریسک متوسط	۱۲/۵	۱۶	۶
ریسک زیاد	۸۵/۵	۸۱/۹	۷۶
ریسک خیلی زیاد	۱/۵	۲	۱۴/۵



شکل ۹- نمودار توزیع کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش برای هر یک از ترکیبات

اعتبارسنجی

در مطالعه حاضر، اعتبارسنجی نقشه حساسیت نسبت به فرسایش حاصل از ترکیب عوامل کنترل فرسایش، امری حیاتی برای بررسی دقت الگوسازی در سطح منطقه است. با وجود این، اندازه‌گیری کمی میزان فرسایش خاک در سطح منطقه به ندرت انجام شده است. با ترکیب اطلاعات حاصل از مشاهده‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای دارای تفکیک مناسب حاصل از تصاویر سنجنده OLI^۱ لندست ۸، جزئیاتی از توزیع فضایی فرسایش خندقی و شیاری در سطح منطقه ارزیابی شدند. کار میدانی انجام شده نشان داد تراکم زیادی از فرسایش خندقی و شیاری در بخش‌های جنوبی تا میانی منطقه رخ داده است و این مشاهده‌ها با نتایج نقشه‌های حاصل از ترکیب CA و CC تطابق دارد (شکل ۸). توان تفکیک مکانی مناسب بانده پانکروماتیک سنجنده OLI (۱۵ متر) و توان تفکیک طیفی در باندهای طیفی این سنجنده (۳۰ متر) در محدوده مرئی طیف الکترومغناطیسی در تمایز نواحی تأثیرپذیرفته از گالی‌ها و نواحی بدون تأثیر بسیار مناسب است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمونه‌های فرسایش شیاری و خندقی برداشت شده از سطح منطقه به همراه ترکیب رنگی تصویر لندست ۸

تفسیرهای بصری اطلاعات پس از بارسازی و پیش‌پردازش تصاویر نشان می‌دهند برخی بخش‌های شمالی نیز از فرسایش خندقی متأثر هستند. همه نقشه‌های حاصل از ترکیب عوامل کنترل فرسایش با نتایج تصاویر لندست مقایسه شدند (جدول ۹)؛ همان‌طور که مشخص است مساحتی که داده‌های برداشت شده از مشاهده‌های میدانی و تصاویر

¹ Operational Land Imager

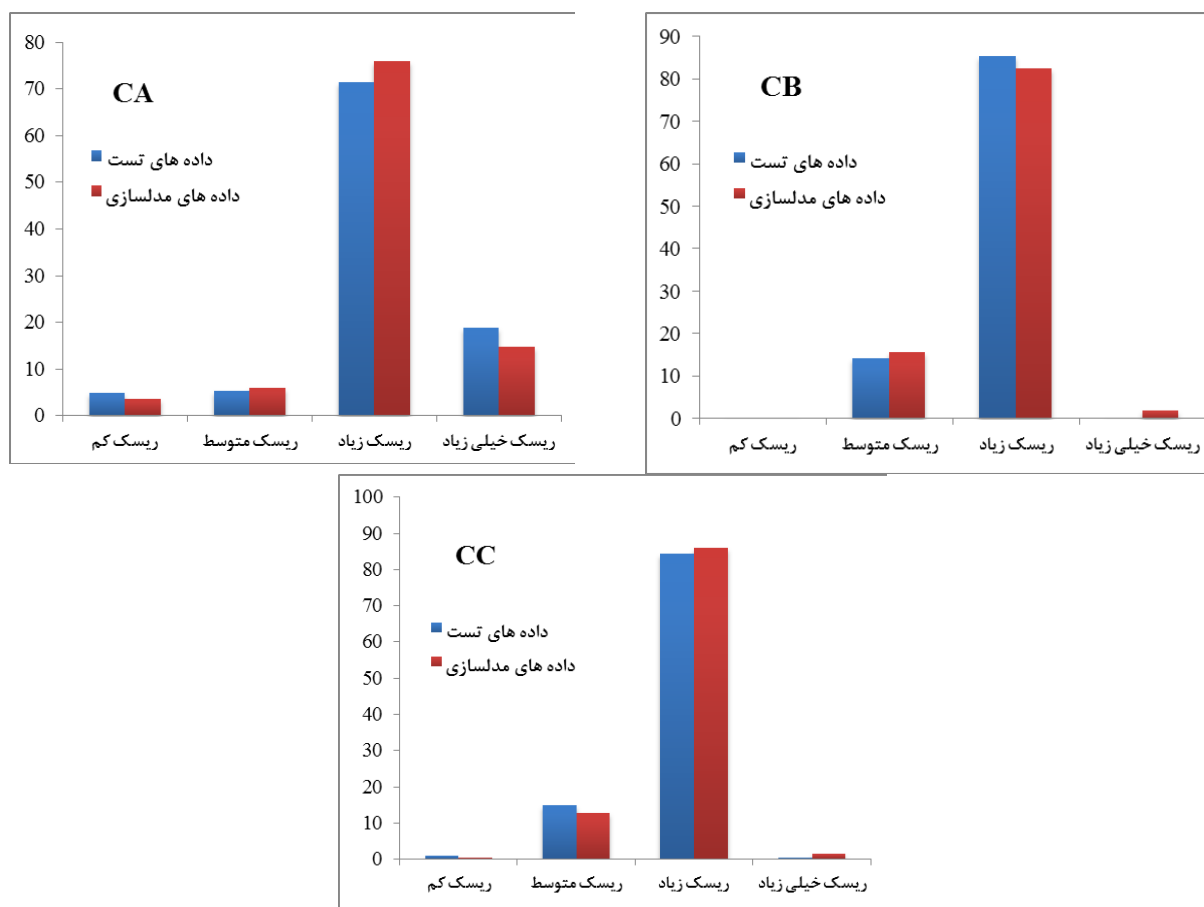
گوناگون در مقیاس محلی است که به‌طور ویژه نیازمند رویکرد کمی است. همچنین مشابه یافته‌های Yves و همکاران (۲۰۰۲)، دقت نتایج بیش از آنکه به خود الگو وابسته باشد، به توان تفکیک مکانی و کیفیت داده‌های ورودی بستگی دارد؛ زیرا الگوهای حساسیت نسبت به فرسایش بر اساس فرضیه‌های ساده و منطقه‌ای هستند و درنهایت، این الگو بر اساس حساسیت داده است و مطابق یافته‌های van Rompaey و Govers (۲۰۰۲) انتشار خطای ناشی از کیفیت کم داده به‌طور چشمگیری دقت نتایج خروجی را کمتر می‌کند.

ماهواره‌ای (داده‌های آزمون) برای هر کلاس پوشش می‌دهند، تشابه فراوانی با نقشه‌های حاصل از الگوسازی (داده‌های الگوسازی) دارد (ضریب همبستگی در هر سه نقشه بیش از ۹۹ درصد است).

الگوی استفاده‌شده برای تهیه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش، رویکردی کیفی و به‌طور نسبی موضوعی ارایه می‌دهد. نقشه‌ها، حاصل الگوسازی محیطی اطلاعات و دانش کارشناسان هستند. مطالعه حاضر حاصل جمع‌آوری اطلاعات ناهمگون با مقیاس‌ها، دقت مکانی و شاخص‌های ویژه

جدول ۹- مساحت (بر حسب متر) و درصد مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش در هر یک از ترکیبات مطالعه‌شده برای داده‌های آزمون و داده‌های الگوسازی شده

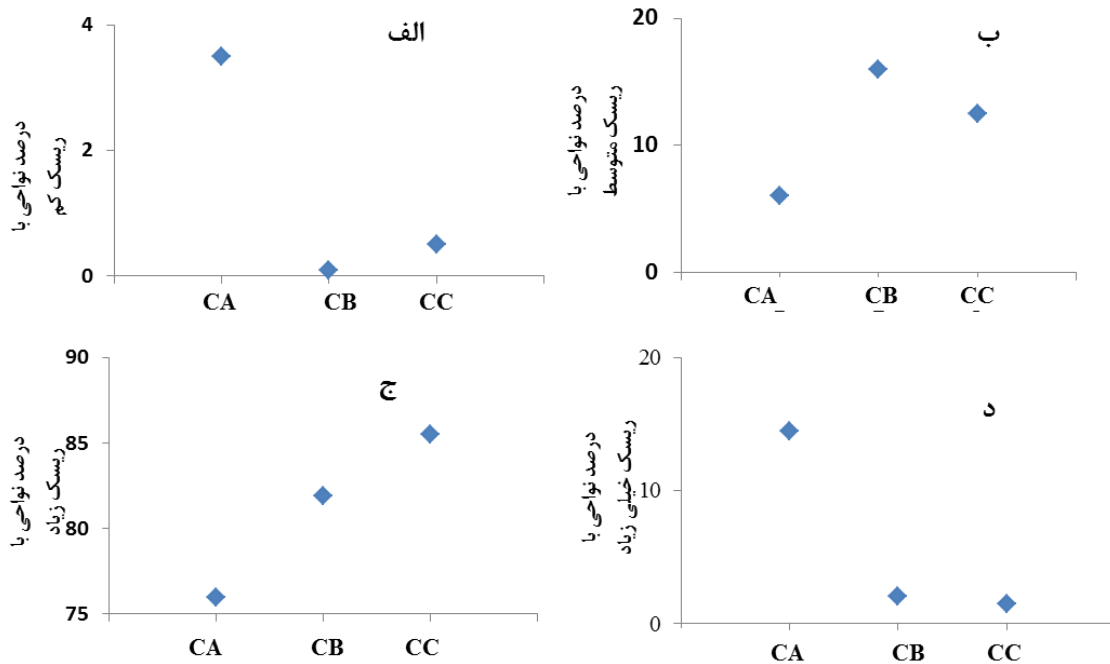
C ^A	داده‌های تست		داده‌های مدل‌سازی	
	مساحت	درصد مساحت	مساحت	درصد مساحت
ریسک کم	۳۱۷۳۸/۰۰۹۸۴	۴/۷۹۰۴۲۵	۷۸۷۰۳۳۹۱/۰۸	۳/۵۸۲۷۰۳
ریسک متوسط	۳۴۲۴۵/۹۱۳۷۶	۵/۱۶۸۹۵۹	۱۲۹۱۷۵۴۸۹	۵/۸۱۰۲۷۳
ریسک زیاد	۴۷۲۴۴۹/۷۹۴۲	۷۱/۳۰۹۹۳۱	۱۶۶۸۲۶۵۴۱۸	۷۵/۹۴۲۰۸۸
ریسک خیلی زیاد	۱۲۴۰۹۶/۴۳۶۱	۱۸/۷۳۰۶۸۵	۳۲۲۰۸۹۴۴۸۷	۱۴/۶۶۲۰۲۲
C ^B	داده‌های تست		داده‌های مدل‌سازی	
	مساحت	درصد مساحت	مساحت	درصد مساحت
ریسک کم	۰	۰	۲۲۱۷۲۲۹/۰۶۳	۰/۱۰۰۹۳۱
ریسک متوسط	۹۴۲۸۰/۰۳۱۸۵	۱۴/۲۳۰۳۰۱	۳۴۵۳۵۷۴۲۲/۱	۱۵/۷۲۱۲۱۸
ریسک زیاد	۵۶۶۴۶۲/۰۷۹۷	۸۵/۴۹۹۸۱۹	۱۸۱۱۴۵۲۶۵	۸۲/۴۶۰۱۹
ریسک خیلی زیاد	۱۷۸۸/۰۴۲۳۴۲	۰/۲۶۹۸۸۱	۳۹۲۰۶۲۳۶/۶۷	۱/۷۸۴۳۷
C ^C	داده‌های تست		داده‌های مدل‌سازی	
	مساحت	درصد مساحت	مساحت	درصد مساحت
ریسک کم	۵۷۵۵/۵۸۸۳۸۶	۰/۸۶۸۷۲۹	۹۴۹۹۰۴۴/۰۱۴	۰/۴۳۲۴۱۱
ریسک متوسط	۹۷۵۰۷/۲۵۳۱۲	۱۴/۷۱۷۴۰۶	۲۷۵۴۴۱۰۸۹/۳	۱۲/۵۳۸۵۱۵
ریسک زیاد	۵۵۹۱۷۲/۱۹۹۵	۸۴/۳۹۹۵۰۹	۱۸۸۵۲۲۷۶۳۴	۸۵/۸۱۸۵۵۳
ریسک خیلی زیاد	۹۵/۱۱۲۸۹۷	۰/۰۱۴۳۵۶	۲۸۰۷۲۷۹۰/۵۸	۱/۲۷۷۹۱۸



شکل ۱۱- مقایسه مساحت و درصد مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش در هر یک از ترکیبات مطالعه‌شده برای داده‌های آزمون و داده‌های الگوسازی‌شده

تخریب زمین ناشی از رخداد عمده تخریب بسیار اهمیت دارند؛ توجه به این نکته در منطقه مطالعه‌شده بسیار مهم و ضروری است که بخش بزرگی از مساحت کل منطقه تحت‌تأثیر حساسیت زیاد قرار دارد. نمودارهای شکل (۱۲)، درصد مساحت نواحی دارای خطرپذیری‌های مختلف فرسایش در هر یک از ترکیبات تعیین‌شده را نشان می‌دهند؛ بیشترین مساحت منطقه مدنظر متأثر از خطرپذیری زیاد و میزان آن در همه ترکیبات بیش از ۷۵ درصد است. همچنین درصد مساحت شامل نواحی دارای خطرپذیری کم در همه ترکیبات بسیار ناچیز و کمتر از ۴ درصد کل مساحت منطقه است. تطابق نتایج در این بخش با نتایج داده‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای استنادپذیر است (شکل ۱۱).

در پژوهش حاضر، چندین عامل کنترلی فرسایش برای ارزیابی اثر حساسیت نسبت به فرسایش بررسی شدند. تغییر در عوامل محیطی ورودی بین سه ترکیب C_A ، C_B و C_C کمکی می‌کند تأثیر هر یک از عوامل در توانایی برای اثرگذاری در فرسایش مشخص شود. خروجی‌های مربوط به هر یک از عوامل محیطی، ورودی متفاوت در ترکیب C_A ، C_B و C_C ارزیابی شدند و چهار سطح از نقشه حساسیت نسبت به فرسایش شرح و بسط داده شد. به علت شباهت توزیع فضایی کلاس حساسیت نسبت به فرسایش کم در همه نقشه‌های حساسیت نسبت به فرسایش، کلاس خطرپذیری کم و متوسط با هم ارزیابی و کلاس‌های خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد نیز هر کدام جداگانه ارزیابی شدند. کلاس‌های خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد برای ارزیابی هر نوع



شکل ۱۲- توزیع درصد مساحت کلاس‌های حساسیت نسبت به فرسایش برای هر یک از ترکیبات. الف. خطرپذیری کم، ب. خطرپذیری متوسط، ج. خطرپذیری زیاد، د. خطرپذیری بسیار زیاد

توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک است. عامل بارندگی در ترکیب C_B اضافه می‌شود، اما تأثیر آن بسیار جزئی است. تأثیر بارندگی در ترکیب C_C افزایش می‌یابد و عامل پوشش گیاهی حذف شده در ترکیب قبلی به‌طور وسیعی در حساسیت نسبت به فرسایش متوسط تأثیر می‌گذارد. بنابراین پوشش گیاهی در موقعیت الگوی C_C برای حساسیت نسبت به فرسایش (وقتی با بارندگی در مناطق نیمه‌خشک مانند منطقه مطالعه شده مقایسه شود) عامل بسیار مهمی است.

ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش زیاد

نواحی دارای حساسیت نسبت به فرسایش زیاد اهمیت ویژه‌ای دارند؛ این بخش‌ها به‌طور ذاتی مستعد فرسایش هستند و تأثیر بسیار شدیدی بر خاک می‌گذارند. حساسیت نسبت به فرسایش زیاد در همه ترکیب‌ها به‌ویژه ترکیب‌های C_B و C_C سطح بسیار زیادی را به خود اختصاص داده است. ترکیب C_A از نظر مقدار مساحت مربوط به این کلاس

ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش کم و متوسط

نواحی دارای حساسیت نسبت به فرسایش کم و متوسط بیشتر در کنار رودخانه اصلی حوضه و نزدیکی نواحی آبی دارای شیب ملایم مشاهده شدند. نواحی شناخته شده با حساسیت نسبت به فرسایش کم دارای مقدار تقریباً برابری (مقدار متغیری بین ۰/۵ تا ۳/۵ درصد سطح حوضه) در هر سه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش بودند (جدول ۸). حساسیت نسبت به فرسایش کم به‌طور ویژه در نواحی دارای کاربری کشاورزی و شیب ملایم وجود دارد؛ مکان‌هایی که پوشش گیاهی بسیار زیاد و نوع خاک Aridisolos (کلاس ۲) است. خطرپذیری متوسط برخلاف خطرپذیری ملایم، تغییرات درخور توجهی را بین سه ترکیب A، B و C نشان می‌دهد (شکل ۵). ترکیب‌های B و C مقادیر نزدیکی از توزیع فضایی کلاس خطرپذیری متوسط را نشان می‌دهند و ترکیب A مقدار کمتری از این کلاس را نشان می‌دهد. این ترکیب با الگوی ICONA (C_A) مرتبط است که شامل کاربری اراضی،

زیاد دیده نمی‌شود. عامل کنترلی پوشش گیاهی تنها در ترکیب C_B در نظر گرفته نشده است و بنابراین، نقش غالب این شاخص مؤثر در حساسیت نسبت به فرسایش بسیار زیاد روشن است. ارزیابی‌های انجام‌شده از حساسیت نسبت به فرسایش کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد بر پوشش گیاهی تأکید می‌کنند. شواهدی نیز دال بر نقش عمده و اساسی شاخص پوشش گیاهی در تأثیر بر حساسیت نسبت به فرسایش وجود دارند. این نتیجه‌گیری تقریباً مشابه نتایج Kirkby (۲۰۰۱) است که ارتباط بسیار قوی فرسایش خاک با پوشش گیاهی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک را نشان می‌دهند.

نتیجه

کاربری اراضی، توپوگرافی، بارندگی، پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک عوامل کلیدی کنترل فرسایش خاک هستند که در پژوهش حاضر با روش‌های سنجش از دور و GIS تحلیل و ارزیابی شدند. سه نقش خطرپذیری حاصل از الگوهای اعمال‌شده نشان می‌دهند حساسیت نسبت به فرسایش زیاد و بسیار زیاد، حوضه مطالعه‌شده و به‌ویژه نواحی دارای پوشش سطحی اراضی بایر و نواحی نمکی را به‌طور گسترده پوشش می‌دهند. در حوضه آبریز سمنان، پوشش گیاهی در نواحی نزدیک ذخایر آبی، اطراف سکونتگاهها و رودخانه‌های فصلی بیشتر است و این مناطق دارای شیب ملایمی بین صفر تا ۵ درصد هستند که حساسیت نسبت به فرسایش کم تا متوسط را نشان می‌دهد. حساسیت نسبت به فرسایش خاک به‌طور عمده با پوشش گیاهی مشخص می‌شود؛ پیش‌بینی می‌شود بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه آبریز سمنان به علت فقر پوشش گیاهی با افزایش سطح فرسایش مواجه شوند. بدیهی است اتخاذ تصمیم‌های فوری حفاظت از سطوح دارای حساسیت نسبت به فرسایش زیاد و بسیار زیاد برای جلوگیری از تخریب اراضی در آینده امری ضروری است. همچنین روش

خطرپذیری در رتبه سوم قرار دارد. در اینجا اختلاف زیادی بین خروجی سه ترکیب وجود ندارد و نتایج نشان می‌دهند اختلاف موجود در ارتباط مستقیم با پوشش گیاهی است. پوشش گیاهی حاصل از شاخص NDVI تنها عامل کنترلی در کاهش اثر بارندگی در پراکنده‌کردن اجزای خاک است و در ترکیب C_C در نظر گرفته نشده است (شکل ۲).

با در نظر گرفتن پوشش گیاهی در ترکیب‌های C_A و C_B ، ۸۷ تا ۹۱ درصد مساحت حوضه جزو نواحی دارای حساسیت نسبت به فرسایش زیاد قرار می‌گیرند و با چشم‌پوشی از این عامل در ترکیب C_C ، این مقدار حدود ۸۰ درصد باقی می‌ماند (جدول ۸). اختلاف بین ترکیب‌های مختلف در میزان مساحت بخش خطرپذیری زیاد، شواهدی بر اهمیت حیاتی پوشش گیاهی برای الگوهای ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش است. بنابراین نباید از پوشش گیاهی در مطالعه‌های مربوط به حساسیت نسبت به فرسایش چشم‌پوشی شود.

ارزیابی حساسیت نسبت به فرسایش بسیار زیاد

از بین سطوح مختلف حساسیت نسبت به فرسایش، حساسیت فرسایشی بسیار زیاد به‌طور جدی بسیار بحرانی است و به علت درجه زیاد تخریب خاک در این کلاس نسبت به دیگر کلاس‌ها، بازسازی در این بخش بسیار مشکل است. مقادیر حساسیت نسبت به فرسایش برای این کلاس در ترکیب‌های C_A و C_B نزدیک به هم و بین ۱ تا ۲ درصد سطح منطقه است؛ این بخش در ترکیب C_C به طور درخور توجهی افزایش می‌یابد و مقدار آن به ۱۴/۵ درصد سطح حوضه می‌رسد. چشم‌پوشی از مقادیر بارندگی در ترکیب C_A و در نظر گرفتن دوباره آن در ترکیب C_B تغییرات چندانی در مساحت تحت پوشش حساسیت نسبت به فرسایش بسیار زیاد ایجاد نمی‌کند و نشان می‌دهد عامل بارندگی در حساسیت نسبت به فرسایش نقش اساسی ندارد. به عبارتی، وقتی ترکیب C_A با ترکیب C_B مقایسه شود، تفاوت چندانی در مقادیر و توزیع فضایی حساسیت نسبت به فرسایش بسیار

- Cerdan O. Souchere V. Lecomte V. Couturier A. Le and Bissonnais Y. 2002. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *CATENA* 46 (2-3):189-205.
- Crepani E. de Medeiros J.S. Hernandez F.P. Galloti F.T. Duarte V. and Faria B.C.C. 2001. Remote Sensing and Geoprocessing Applied to the Ecological and Economical Zoning and to the Territorial Ordering, INPE-8454-RPQ/722, São José dos Campos, Brazil, p. 124 (in Portuguese with English abstract).
- Devi R. Tesfahune E. Legesse W. Deboch B. and Beyene A. 2008. Assessment of siltation and nutrient enrichment of Gilgel Gibe dam, Southwest Ethiopia. *Journal of Bioresource Technology* 99(5):975-979.
- Drzewiecki W. Wezyk P. Pierzchalski M. and Szafranska B. 2013. Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Małopolska (Poland), Supported by an Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images, *J. Pure and Applied Geophysics*, DOI 10.1007/s00024-013-0669-7.
- Dupac M. 2010. Soil erosion and degradation based on sand particles transport caused by wind blowing, *Natural Resource Modeling*, 23(2):121-122.
- El-Swaify S.A. 1997. Factors affecting soil erosion hazards and conservation needs for tropical steeplands. *Soil Technology* 11: 3-6.
- Enters T. 1998. A framework for economic assessment of soil erosion and soil conservation. In: Penning de Vries, F.W.T., Agus, F., Kerr, J. (Eds.), *Soil Erosion at Multiple Scales: Principles and Methods for Assessing Causes and Impacts*. CAB Publishing, Wallingford, UK, p. 317-342.
- Essa S. 2004. GIS modeling of land degradation in Northern Jordan using Landsat imagery. In: *Proceeding of the 20th ISPRS Congress 12e23 July 2004, Istanbul, Turkey*, 505-510.
- Fernandes J. Bateirad C. Soares L. Faria A. Oliveira A. Hermenegildo C. Moura R. and Gonçalves J. 2017. SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *CATENA*, 153:39-49.
- Foth L.T. and Turk L.M. 1972. *Fundamentals of Soil Science*, fifth ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 371.
- Frank T.D. and Isard S.A. 1986. Alpine vegetation classification using high resolution aerial imagery and topoclimatic index values. *نقشه‌برداری و الگوسازی پژوهش حاضر، روشی سریع، ساده و عمدتاً با استفاده از داده‌های سنجنش از دور است که برای انواع مناطق جهان به‌ویژه کشورهای نظیر ایران که تجهیزات تکنیکی و آمار تاریخی و اندازه‌گیری‌های میدانی در آنها ضعیف هستند، ابزاری انعطاف‌پذیر و کاربردی فراهم می‌کند.*
- References**
- Agassi M. 1996. *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*. Marcel Dekker Inc., New York, p. 424.
- Bayramin I. Dengiz O. Baskan O. and Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Beypazar YArea. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 27:105-116.
- Bishr Y.A. and Radwan M.M. 1995. Preliminary design of a decision support system for watershed management. *ITC Journal*, 1:23-28.
- Biswas S. Sudhakar S. and Desai V.R. 1999. Prioritization of sub-watersheds based on morphometric analysis of drainage basin: a remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 27 (3):155-166.
- Boardman J. and Vandaele K. 2010. Soil erosion, muddy floods and the need for institutional memory, *Area*, 42(4):502-513.
- Bouaziz M. Leidig M. and Gloaguen R. 2011. Optimal parameter selection for qualitative regional erosion risk monitoring: A remote sensing study of SE Ethiopia. *Geoscience Frontiers* 2(2):237-245.
- Bouaziz M. Wijaya A. and Gloaguen R. 2009. Gully erosion mapping using aster data and drainage network analysis in the main Ethiopian rift. In: *Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IRARSS), Cape Town, South Africa*. p. I13-I16.
- Bryan R.B. 1977. Assessment of soil erodibility: new approaches and directions. In: Toy, T.J. (Ed.), *Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery*, Geoabstracts, Norwich. p. 57-72.
- Chen W. Xie X. Wang J. Pradhan B. Hong H. Bui D.T. Duan Zh. And Ma J. 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *CATENA*, 151:147-160.

- in gully length and area, CATENA, 148(2):195-203.
- Majaliwa M.J.G. Magunda M.K. Tenywa M.M. and Isabirye M. 2003. Effect of topography on soil erodibility in Kakuuto micro-catchment, Uganda. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 69(1):19-27.
- Martinez G. Weltz M. Pierson F.B. Spaeth K.E. and Pachepsky Y. 2017. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability, CATENA, 151:161-173.
- Martinez-Casasnovas, J.A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. CATENA 50 (24): 293-308.
- Mitasova H. Hofierka J. Zlocha M. and Iverson L.R. 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5):629-641.
- Morgan R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*, second ed., Essex, New York, p. 320.
- Moore I.D. Gessler P.E. Nielson G.A. and Peterson G.A. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 2:443-452.
- Nearing M. A. Yin Sh. Borrelli P. and Polyakova V.O. 2017. Rainfall erosivity: An historical review. CATENA, 157:357-362.
- Oldeman L.R. Hakkeling R.T.A. and Sombroek W.G. 1990. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: An Explanatory Note, Wageningen, Netherlands, p. 34.
- Oldeman L.R. 1994. The global extent of soil degradation. In: Greenland, D.J., Szabolcs, I. (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CAB International, Oxon, U.K., p. 115.
- Pickup G. and Chewings V.H. 1996. Correlations between DEM-derived topographic indices and remotely sensed vegetation cover in rangelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21:517-529.
- Quinton J.N. 1997. Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model EUROSEM, 30:101-117.
- Qygarden L. 2003. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway. 50 (2-4):217-242.
- Reusing M. Schneider T. and Ammer U. 2000. Modeling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS- 02/D2-stereo-data in a GIS. *Journal of Remote Sensing*, 21:1885-1896
- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52 (3): 381-388.
- Gahegan M. German G. and West G. 1999. Improving Neural Network Performance on the Classification of Complex Geographic Datasets. *Journal of Geographical Systems*, 1:3-2.
- Gessler P.E. Moore I.D. McKenzie N.J. and Ryan P.J. 1995. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9 (4):421-432.
- Grum B. Woldearegay K. Hessel R. Baartman J.E.M. Abdulkadir M. Yazewe E. Kessler A. Ritsem C. J. and Geissen V. 2017. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM), CATENA, 159: 20-34.
- Harris M.T. and Boardman J. 1990. A rule-based expert system approach to predicting waterborne soil erosion. In: Boardman, J. Foster, D.L. Dearing, J.A. (Eds.) *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons, Chichester, p. 401-412.
- Hill J. Megier J. Mehl W. 1995. Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Reviews*, 12:107-130.
- Hurni H. 1993. Land degradation, famine and resource scenarios in Ethiopia. In: Pimental, D. (Ed.), *World Soil Erosion and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 27-61.
- Jain S.K. Dolezal F. 2000. Modeling soil erosion using EPIC supported by GIS, Bohemia, Czech Republic. *Journal of Environmental Hydrology*, 8:1-11.
- Kirkby M. 2001. Modeling the interaction between soil surface properties and water erosion. CATENA 46: 89-102.
- Kothyari U.C. 1996. Erosion and sedimentation problems in India. In: Wailing D.E. Webb B.W. (Eds.), *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, 236. IAHS Publication, 531-540.
- Li P. Mu X. Holden J. Wu Y. Irvine B. Wang F. Gao P. Zhao G. and Sun W. 2017. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau, *Earth-Science Reviews*, 170: 17-30.
- Li Zh. Zhang Y. Zhu Q. Yang S. Lia H. and Ma H. 2017. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes

- Van Rompaey A.J.J. and Govers G. 2002. Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(7): 663-680.
- Vrieling A. Sterk G. and Beaulieu N. 2002. Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(3):158-163.
- Wang L. Huang J. Du Y. Hu Y. and Han P. 2013. Dynamic Assessment of Soil Erosion Risk Using Landsat TM and HJ Satellite Data in Danjiangkou Reservoir Area, China, *Remote Sensing*, 5:3826-3848.
- Wijaya A. 2005. Application of Multi-stage Classification to Detect Illegal Logging with the Use of Multi-source Data, MSc. Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Yao H. Shi Ch. Shao W. Bai J. and Yang H. 2017. Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China, *CATENA*, 142:1-10.
- Yves L.B. Montier C. Jamagne M. Daroussin J. and King D. 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *CATENA*, 46(23):207-220.
- Rouse J.W. Haas R.H. Schell J.A. and Deering D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti E.P. Becker M.A. (Eds.), *Third Earth Resource Technology Satellite-1 Symposium*, vol. 1, Technical Presentations. NASA, Washington, D.C. p. 309-317.
- Singh G. Babu R. Narain P. Bhushan L.S. and Abrol I.P. 1992. Soil erosion rates in India. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47 (1): 97-99.
- Stocking M.A. and Murnaghan N. 2001. *A Handbook for the Field Assessment of Land Degradation*. Earthscan Publication, London, UK, p. 169.
- Sukhanovskii Y. P. 2010. Rainfall Erosion Model, *Eurasian Soil Science*, 43(9):1036-1046.
- Thornes J.B. Shao J.X. Diaz E. Roldan A. McMahon M. and Hawkes J.C. 1996. Testing the MEDALUS hillslope model. 26:137-160.
- Toy T.J. Foster G.R. and Renard K.G. 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control*. John Wiley & Sons, New York.
- Trimble W.S. 1990. Geomorphic effects of vegetation cover and management: some time and space considerations in predicting of erosion and sediment yield. In: Thornes, J.B. (Ed.), *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons Ltd., UK, p. 55-65.

