



Comparative Comparison of Erosion rate in Prone Areas of Isfahan Province

Ahmad Hajarian¹ ✉

1. (Corresponding Author) Department of Rural Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: A.hajarian@ltr.ui.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:

3 June 2024

Received in revised form:

26 August 2024

Accepted:

29 September 2024

Available online:

7 November 2024

Keywords:

Isfahan Province,
Random Forest,
Modeling,
Soil Erosion,
Support Vector Machine.

ABSTRACT

Urban weathering refers to the processes of loosening, decay, and eventual deterioration of materials used in various urban constructions. This study focuses on assessing the degree of weathering in gravestones from the Joy-e-Horhor and Khold-e-Barin cemeteries in Yazd. A combination of petrographic analyses and longitudinal monitoring of Schmidt hammer rebound values for hundreds of gravestones was employed to achieve this. The findings indicate that in addition to the petrographic characteristics of the stones, such as mineralogical composition, mineral diversity, and rock texture and fabric, local climatic conditions significantly influence the weathering and degradation of these materials. Key processes contributing to the loss of stone durability include temperature fluctuations leading to thermal expansion and contraction, the albedo effect of the stone, wet-dry cycling, and the crystallization and dissolution of secondary minerals like calcite and gypsum. Gravestones made of travertine and marble, characterized by a predominance of calcite minerals and light-colored surfaces, exhibit higher resistance to weathering compared to other lithologies, provided they are not exposed to excessive moisture or frequent washing. In contrast, low-grade metamorphic rocks such as slate and phyllite are the least suitable for gravestones due to their high density of fractures and cleavage planes. Similarly, dark-colored igneous rocks are prone to rapid durability loss, as the differential thermal expansion and contraction of their constituent minerals in response to temperature changes accelerate their weathering processes.

Cite this article: Hajarian, A. (2024). Comparative Comparison of Erosion rate in Prone Areas of Isfahan Province. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (3), 59-75.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.382042.1007839>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended abstract

Introduction

The role of humans in soil erosion is significant directly and indirectly. For this reason, severe damage caused by soil erosion has prompted managers and researchers to make great efforts to predict and spread soil erosion. Iran is one of the countries that has severe soil erosion due to its location in the dry and semi-arid belt. Examining the surface of the areas affected by soil erosion shows that soil erosion has an increasing trend, so that the survey of land area shows an increasing trend in these areas. Isfahan province has the necessary and high potential for soil erosion due to the special conditions of the region, such as topography, slope, lithological condition (presence of formations with low permeability) and climatic conditions (arid and semi-arid). Therefore, since soil erosion is accompanied by numerous damages, it is very important to check the points prone to erosion risk. According to the mentioned points, the phenomenon of erosion can be investigated and studied despite all its complications. One of the management methods of dealing with soil erosion is determining the points prone to erosion. Therefore, the purpose of this research is to evaluate and determine areas prone to erosion using machine learning methods in Isfahan province.

Methodology

In this research, the main goal is to determine the areas prone to erosion. For this reason, in the first step, based on past research, as well as experts' opinions and examining the history of erosion areas, the factors affecting the occurrence of erosion were first determined. Among the influential factors, we can mention 4 main criteria (topographic, biological, climatic and man-made factors) and 17 sub-criteria. Each criterion and its sub-criteria are briefly described below. The map related to all environmental factors was created in a raster format with a pixel size of 30 x 30 square meters. After preparing layers of environmental factors, information about erosion points was extracted. In this research, all information related to the occurrence of erosion in the last 20 years

was collected from available sources. In this regard, in addition to the information of the departments of natural resources, watershed management and environmental protection, it was used. In total, after removing duplicate points and merging points with a distance of less than 100 meters, the final layer of erosion points was created as a point. This information was divided into two groups of points necessary for training the model (70%) and points necessary for evaluating the results of the model (30%) completely randomly. In total, 2543 points were used to train and build the models and 784 points were used to evaluate the accuracy of the models. The modeling related to two models of random forest and support vector machine was done in R software and "randomForest" and "e1071" packages, respectively. Also, to determine the relative importance of environmental variables in the occurrence of erosion in Isfahan province, the method of relative importance diagram (varImpPlot) was used in the random forest algorithm.

Results and discussion

Investigating the relative importance of the layers used in modeling using the random forest algorithm showed that the layers of vegetation and precipitation were the most important factors in the occurrence of erosion in Isfahan province, respectively (Figure 3). Also, the distance layer from the residential areas was the least important factor in the areas with a history of erosion in Isfahan province. According to the results, in the support vector machine model, the low risk class had the largest area of 7345617 (68.6 percent). In the support vector machine model, the second class with a large area was related to the medium risk class, which includes 19.8% of the study area. While in the random forest model, the average class with an area of 3,276,567 thousand hectares, equivalent to 30.6 of the area, has more value than the support vector machine model. Finally, in the support vector machine model, the lowest area was related to the high-risk class, which covered only 11.6% of the area, while in the random forest model, the lowest area was related to the high-risk

class with an area equal to 2157652 hectares. (20.1 percent) was. The evaluation of the accuracy of the support vector machine and random forest models based on the area under the graph (AUC) in the ROC curve showed that both models have good accuracy, but the random forest model has a higher accuracy. Based on the results, the random forest model had a level under the graph of 0.97 and the support vector machine model had a level under the graph of 0.86.

Conclusion

Modeling of erosion-prone areas can be a key tool for correct and timely management of natural hazards, including soil destruction. Considering that Iran is located in the dry and semi-arid belt, soil erosion is one of its most important crises. Many managers are trying to discover suitable solutions for erosion management that can be used to manage and control erosion in the shortest possible time. Considering the time required for erosion control and resource investment, accurate estimation of the risk of erosion and preparation of erosion distribution maps is the first step in erosion management and risk assessment. The present research was also carried out in order to investigate the efficiency of different machine learning methods in modeling areas prone to erosion in Isfahan province. In the present research, based on the results of modeling, the layers of vegetation and precipitation were the most important factors in the occurrence of erosion in Isfahan province, and the distance from residential areas was the least important factor in areas with a history of erosion in Isfahan province. Based on the conducted studies, temperature, air humidity, and increase in rainfall are among the natural factors that provide the basis for extensive surface erosion in the regions. In general, the accuracy of the used model depends on many factors, which can be attributed to the characteristics of the studied area, such as topography, factors affecting the occurrence of erosion, the accuracy and type of layers of independent variables for modeling the probability of the risk of erosion, the accuracy of points And the recorded ranges of erosion pointed

to the continuous occurrence in the past and the type of prediction algorithm used among the factors affecting the overall accuracy of the classification. Considering the increase of erosion rate and increase of crisis in the regions, the results of this research can be used as a model for erosion management in the study area and help managers in planning and actions and providing facilities in high-risk areas and prone to erosion.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



کاربرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی در پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی استان اصفهان

احمد حجاریان^۱

۱- نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: a.hajarian@ltr.ui.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فرسایش خاک ممکن است به از بین رفتن کیفیت خاک و در نتیجه، کاهش بهره‌وری خاک منجر شود. یکی از راه‌کارهای اساسی برای مهار و کاهش اثرات مخرب فرسایش، شناسایی مناطق مستعد فرسایش در مناطق است. به همین دلیل تعیین مناطق مستعد به فرسایش نقش مهمی در مدیریت فرسایش در منابع طبیعی دارد. تحقیق حاضر درصدد است تا با استفاده از دو روش یادگیری ماشینی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و ۳۳۲۷ نقطه وقوع فرسایش، مناطق مستعد به فرسایش را در استان اصفهان را تعیین نماید. عوامل محیطی در چهار گروه اصلی شامل عوامل توپوگرافی، عوامل اقلیمی، عوامل زیستی و عوامل انسان‌ساخت تهیه شدند. بررسی شاخص AUC نشان داد که هر دو مدل دارای دقت مناسبی بوده هرچند مدل جنگل تصادفی ($AUC = 0.97$) دارای دقت بالاتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان ($AUC = 0.86$) بود. بر اساس نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان، حدود ۱۱/۶ درصد در کلاس پرخطر و حدود ۶۸/۶ درصد در کلاس خطر کم فرسایش قرار دارد. همچنین در مدل جنگل تصادفی حدود ۲۰/۱ درصد در کلاس پرخطر و حدود ۴۹/۲ درصد در کلاس خطر کم قرار دارد. در این زمینه، نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند با ارائه گستره‌ای از مناطق استان اصفهان و بهره‌گیری از این دو مدل، به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان در تدوین برنامه‌ای مدیریتی و نیز اتخاذ اقداماتی راهبردی در جهت کنترل فرسایش کمک کند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۰۸

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۰۸/۰۷

واژگان کلیدی:

استان اصفهان،
جنگل تصادفی،
فرسایش خاک،
مدل سازی،
ماشین بردار پشتیبان.

استناد: حجاریان، احمد. (۱۴۰۳). کاربرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی در پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی استان اصفهان. *مجله پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۶ (۳)، ۵۹-۷۵.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.382042.1007839>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نویسندگان



مقدمه

خاک یکی از باارزش‌ترین ثروت‌های ملی هر کشور است. اگر استفاده از خاک بر اساس استعداد و قدرت تولیدی آن و مبتنی بر رعایت اصول صحیح و علمی باشد، میزان هدر رفت خاک به حداقل می‌رسد. (Khosraviaqdam et al., 2019). فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و تأثیر زیادی بر کیفیت، کمیت و بهره‌وری خاک و در نهایت فرآیندهای بیابان‌زایی دارد (Kairis et al., 2013). فرسایش خاک یک مسئله محیطی جهانی است که از حاصلخیزی و کیفیت خاک کاسته، رسوب‌زدایی و احتمال ایجاد فرسایش را افزایش می‌دهد. فرسایش خاک عللی زیادی دارد که می‌توان تغییر ارضی، چرای بی‌رویه، فعالیت‌های نامناسب کشاورزی و عمق خاک است (Poesen, 2018). در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی، فرسایش خاک با فراوانی زیاد و در مکانی گسترده اتفاق می‌افتد (Green et al., 2018). در کل کره زمین سالانه ۷۵ بلیون تن خاک زمین‌های مطلوب کشاورزی در اثر فرسایش بادی و آبی از دسترس خارج می‌شود (Pimentel et al., 1994) و بیش از ۸۰ درصد از اراضی جهان تحت فرسایش قرار دارند (Blanco, 2008). ایران از جمله کشورهایی است که فرسایش خاک در آن بسیار زیاد است. فرسایش خاک در کشور ۲ تا ۲/۵ میلیارد تن گزارش شده است درحالی‌که طبق پیش‌بینی‌های سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی طی ۱۰ الی ۲۰ سال آینده میزان فرسایش خاک کشور به ۴/۵ میلیارد در سال خواهد رسید و در صورت به وقوع پیوستن این مقدار بسیار نگران‌کننده و فاجعه‌آمیز است و نیاز به چاره‌اندیشی بسیار اصولی دارد (Khalife et al, 2010). اگر به ارزش اقتصادی خاک و اهمیت زیاد آن در حیات انسان دقیقاً توجه شود، مشخص می‌شود که این گوهر گران‌بهای طبیعت سرمنشأ تولید تمامی مایحتاج اولیه بشر و تأمین‌کننده نیازهای کلیه موجودات زنده می‌باشد که زندگی انسان وابسته به آن است (Khalife et al, 2010).

در دهه‌های اخیر فرسایش خاک توسط آب، با تغییر آب‌وهوا و کاهش تدریجی منابع طبیعی نسبت به جمعیت‌های انسانی به یک مسئله جهانی تبدیل شده است. فعالیت‌های انسانی و استفاده نامناسب از ارضی باعث تسریع در فرسایش خاک در بسیاری از مناطق سطح زمین شده است (Zhang et al, 2015). با فرسایش خاک میلیون‌ها تن رسوبات وارد مخازن و دریاچه‌ها می‌شود که باعث آسیب به سدها، کاهش عمر مفید آن‌ها، تغییر کیفیت آب و خسارت‌های زیادی از نظر اقتصادی می‌شود (motamedirad et al, 2023). در نتیجه پیشگیری و مهار فرسایش خاک در گستره حوزه‌های آبخیز و سایر نقاط و در چهارچوب طرح‌های بهره‌برداری آب‌و خاک و آبخیزداری یک نیاز اساسی است. به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب‌دهی ضرورت دارد که نقاط مستعد در معرض فرسایش شناسایی گردد (Zerihun et al., 2018).

اما فرسایش خاک یک فرآیند پیچیده و خطر ژئومورفولوژیکی بالقوه است و مقدار آن بازتابی از نحوه مدیریت زمین و شاخص‌های محیطی تخریب به شمار می‌رود. اگرچه برای پیش‌بینی فرسایش خاک از مدل‌های تجربی از قبیل معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) به‌صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود، اما این‌گونه مدل‌ها بر مبنای داده‌های تجربی به دست می‌آیند و دقت آن‌ها تابع ضرایب مورد استفاده و شرایط منطقه است (Guo & Xion, 2017). میزان فرسایش خاک شاخص جامع برای ارزیابی درجه توسعه‌یافتگی و پایداری برنامه‌های مدیریتی سرزمینی کشورها است و از طرفی داشتن اطلاعات مکانی در ارتباط با پدیده‌ها این امکان را فراهم می‌کند که همبستگی بین پدیده‌ها و الگوی فضایی بین آن‌ها شناسایی شود. در نتیجه شناخت الگوی فضایی بین فرسایش خاک، یک کلید برای درک دینامیک و شناسایی دلایل زیستی و غیر زیستی فرسایش خاک است و تعیین الگوی پراکنش شدت فرسایش و رسوب می‌تواند به ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش و مقابله با فرسایش و رسوب در مناطق کمک کند (Zangeneh Asadi et al., 2020).

کشور ایران ازجمله کشورهایی است که به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک، دارای فرسایش شدید خاک می‌باشد. بررسی سطح مناطق تحت تأثیر فرسایش خاک نشان می‌دهد که فرسایش خاک دارای روندی افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که بررسی مساحت اراضی، نشان‌دهنده روند افزایشی در این نواحی بوده است. استان اصفهان به لحاظ شرایط خاص منطقه، مانند توپوگرافی، شیب، وضعیت لیتولوژی (وجود سازندهایی با نفوذپذیری کم) و شرایط اقلیمی (خشک و نیمه‌خشک) از پتانسیل بالایی برای فرسایش خاک برخوردار است (Bagio et al., 2017). لذا هدف از انجام این تحقیق ارزیابی و تعیین مناطق مستعد به فرسایش با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی در استان اصفهان می‌باشد. در این راستا، به بررسی برخی مطالعات انجام‌شده در این زمینه پرداخته شده است.

تاری‌پناه و همکاران (۱۴۰۲) به طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی و بررسی ریسک واقعی فرسایش آن‌ها در مناطق کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خارستان) پرداختند. نتایج نشان داد ریسک واقعی فرسایش در سه کلاس کم، متوسط و زیاد با مساحت‌های ۳۱/۱۴٪، ۳۱/۱۱٪ و ۳۷/۷۸٪ طبقه‌بندی شد.

زنگنه اسدی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی پتانسیل فرسایش مناطق مستعد فرسایش با مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه گناباد) پرداختند. با توجه به مطالعه عوامل مؤثر در مدل فرسایش خاک این نتیجه به دست می‌آید که پارامترهای شیب، سازند زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک، فاصله از آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی (Twi) حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش داشته و عوامل مؤثر بر فرسایش در این مناطق فعالیت بیشتری دارند. مزبانی و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی خطر فرسایش خاک در کاربری‌های اراضی با استفاده از معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک پرداختند. نتایج نشان داد میزان کل فرسایش در حوزه برابر با ۱۲۸۱۱۰۰۴ تن در سال و میانگین فرسایش برابر ۱۷/۶۲ تن در هکتار در سال است.

اصغری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک با الگوریتم WLC (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق‌لاقان‌چای) پرداختند. با توجه به پهنه‌بندی فرسایش خاک در این سال‌ها، مساحت طبقه بسیار پرخطر به ترتیب ۱۱/۲۰، ۱۲/۲۰ و ۱۲/۲۲ درصد و طبقه پرخطر به ترتیب ۲۵/۵۹، ۲۶/۶۵ و ۲۸/۲۹ درصد است که افزایش فرسایش خاک را درگذر زمان نشان می‌دهد. نتایج نشان داد تغییر مراتع و تبدیل آن به مناطق کشاورزی و انسان‌ساخت، بیشترین میزان تأثیر را بر فرسایش خاک داشته است.

زنگی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش خاک در مراتع نیمه‌خشک کلات پرداختند. رگرسیون خطی چند متغیره نشان داد که سه عامل درصد تراکم پوشش گیاهی، درصد سنگریزه درشت (۱۳-۷۵ میلی‌متر) در لایه سطحی خاک و همچنین درصد شیب زمین به ترتیب مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان فرسایش خاک می‌باشند. بنابراین مدیریت پوشش گیاهی و همچنین مدیریت شیب مرتع مورد مطالعه که از مراتع شاخص منطقه به حساب می‌آید.

مددی و همکاران (۱۴۰۲) به مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر) پرداختند. نتایج نشان داد که مساحت زیر منحنی (AUC) در مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و درخت رگرسیون تقویت‌شده به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۴ محاسبه شد که منجر به پیش‌بینی دقیقی شد. همچنین نتایج نشان داد متغیر ماسه (۹/۲۹۹)، نسبت جذب سدیوم (۷/۹۶۷) و مواد خنثی شونده (۶/۱۸۵) بیشترین تأثیر را بر فرسایش خندقی دارد.

اشرف^۱ (۲۰۲۰) در پژوهشی تحت عنوان مدل‌سازی خطر فرسایش خاک در شرایط مختلف کاربری اراضی و بارندگی در حوزه رودخانه سان به این نتایج دست‌یافت که عوامل تأثیرگذار منجر به میزان فرسایش بالاتر تحت سناریوهای متغیر تغییر محیطی است.

وین رایت^۲ و همکاران (۲۰۱۸) درصد تراکم پوشش گیاهی را به‌عنوان اصلی‌ترین فاکتور محدودکننده میزان فرسایش خاک اعلام کرده‌اند.

ریس^۳ و همکاران (۲۰۱۷) خطر فرسایش را با استفاده از GIS و مدل ICONA و با استفاده از پارامترهای اقلیمی و زمین‌شناختی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که ۵۳/۶۷ درصد منطقه دارای فرسایش بسیار زیاد، ۳۸/۱ درصد دارای خطر زیاد، ۶/۹۴ درصد دارای خطر متوسط و ۰/۱۲ درصد دارای خطر پایین می‌باشند. نتایج بررسی نشان داد که مدل‌سازی عامل مبنا سهم بالقوه‌ای در مدیریت ریسک در آینده و کاربرد عملی آن در تصمیم‌گیری در سیاست انطباق و برنامه‌ریزی استراتژی داراست.

کریستو^۴ و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس ویژگی‌های زمین فضایی مدل‌های برآورد فرسایش را طبقه‌بندی نمودند و نتیجه گرفتند که برای دست‌کاری مقیاس جهت افزایش کارایی مدل تخمین فرسایش، دو نظریه فضایی سلسله مراتبی و فراکتال برای بهره‌برداری بیشتر در آینده پیشنهاد می‌شود. با توجه به ادبیات موضوع و پیشینه عملی وجه تمایز این تحقیق با پژوهش‌های قبلی در نوع مدل به کار گرفته‌شده در این پژوهش و مقایسه تطبیقی آن می‌باشد.

با توجه به نکات مذکور، پدیده فرسایش علیرغم همه پیچیدگی‌های قابل‌بررسی و مطالعه می‌باشد. یکی از روش‌های مدیریتی مواجهه با فرسایش خاک، تعیین نقاط مستعد فرسایش می‌باشد. لذا هدف از انجام این تحقیق ارزیابی و تعیین مناطق مستعد به فرسایش با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی در استان اصفهان می‌باشد. در این راستا، به بررسی برخی مطالعات انجام‌شده در این زمینه پرداخته شده است.

روش پژوهش

در این تحقیق هدف اصلی تعیین مناطق مستعد فرسایش است. به همین دلیل در گام اول، بر اساس تحقیقات گذشته و همچنین نظرات کارشناسان و بررسی سابقه مناطق دارای فرسایش، ابتدا عوامل تأثیرگذار بر وقوع فرسایش تعیین شد. از عامل‌های تأثیرگذار می‌توان به ۴ معیار اصلی (عوامل توپوگرافی، بیولوژیکی، اقلیمی و انسان‌ساخت) و ۱۷ زیر معیار (عوامل توپوگرافی (ارتفاع، جهت شیب، سازند زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، تراکم گسل، فاصله از آبراهه)، عوامل اقلیمی (بارش، رطوبت نسبی، باد، درجه حرارت)، عوامل زیستی (پوشش گیاهی، رطوبت خاک، نوع خاک) و عوامل انسان‌ساخت (فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از جاده، فاصله از اراضی کشاورزی) اشاره نمود. هر معیار و زیر معیارهای آن در ادامه به‌طور مختصر تشریح شده‌اند. نقشه مربوط به همه عوامل محیطی به‌صورت رستری و با اندازه پیکسل ۳۰ × ۳۰ مترمربعی ساخته شدند.

1. Ashraf
2. Wainwright
3. Reis
4. Christos

عوامل توپوگرافی

توپوگرافی از مهم‌ترین عوامل محیطی غیرزنده بوده که بسیاری از اعمال حیاتی موجودات زنده را به صورت مستقیم و غیرمستقیم مورد تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی، از میان ویژگی‌های توپوگرافی، هفت عامل ارتفاع، جهت شیب، سازند زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، تراکم گسل، فاصله از آبراهه شناخته‌شده‌تر بوده و در تحقیقات بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرند (ینان^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). در تحقیق حاضر از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و همچنین نقشه رقومی ارتفاع استخراجی از تصاویر ماهواره ASTER، برای استخراج نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت استفاده شد. برای آماده‌سازی لایه‌های توپوگرافی از نرم‌افزار ArcGIS10 استفاده شد.

عوامل بیولوژیک

معیارهای بیولوژیکی شامل نوع پوشش گیاهی، رطوبت خاک، نوع خاک می‌باشد. به‌طور کلی پوشش گیاهی، نقشی کلیدی در فرسایش دارد، که باعث کاهش گستردگی فرسایش می‌شود. خصوصیات و ویژگی‌های پوشش گیاهی تأثیرات زیادی بر برخی خصوصیات فرسایش از قبیل شدت فرسایش و میزان گسترش دارد (Yin et al., 2018). به همین دلیل در بررسی و مدل‌سازی وقوع فرسایش در یک منطقه، معیار پوشش گیاهی مورد توجه قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر، تأثیر پوشش گیاهی با استفاده از تولید و محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ به تاریخ ۲۰۲۳/۰۵/۱۹ با درصد ابرناکی ۰/۱۱ درصد انجام شد.

برای محاسبه رطوبت خاک از دو شاخص رطوبت تفاضل نرمال^۲ (NDWI) و شاخص رطوبت سطحی خاک^۴ (LSWI) در محیط نرم‌افزار TerrSet استفاده شد. این دو شاخص بر اساس روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند.

$$\text{رابطه (۱): } NDWI = (NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$$

$$\text{رابطه (۲): } LSWI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$$

در این روابط NIR: باندهای مادون قرمز نزدیک، SWIR1: مادون قرمز موج کوتاه اول و SWIR2: مادون قرمز موج کوتاه دوم است.

عوامل اقلیمی

شرایط اقلیمی به‌طور مستقیم در پیدایش فرسایش تأثیر دارند و به‌طور غیرمستقیم با اثر بر تیپ و تراکم پوشش گیاهی، بر گسترش فرسایش مؤثر هستند. بارش، رطوبت نسبی، باد و درجه حرارت مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی مؤثر در هر منطقه به شمار می‌روند. که در وقوع و گسترش فرسایش در مناطق دارای اهمیت است. با توجه به قرارگیری ۱۲ ایستگاه سینوپتیک در استان اصفهان، در تحقیق حاضر برای تهیه نقشه عوامل اقلیمی، از تمامی ایستگاه سینوپتیک کل استان استفاده شد. پس از استخراج اطلاعات مورد نیاز، با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله (IDW) نقشه متغیرهای اقلیمی برای کل استان اصفهان ایجاد گردید.

1. Yen an

2. Landsat_Product_ID = "LC08_L2SP_167037_20220509_20220518_02_T1"

3. Normalized Difference Water Index

4. Land Surface Water Index

عوامل انسانی

عوامل انسانی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در فرسایش به شمار می‌روند. به‌طور کلی انسان دو نقش ویژه به‌عنوان ایجادکننده و مدیریت‌کننده فرسایش دارد. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته، هرچه فاصله به سکونتگاه‌ها یا عارضه‌های انسان‌ساخت نزدیک‌تر شود احتمال وقوع خطرات فرسایش افزایش خواهد یافت. در تحقیق حاضر، لایه عوامل انسانی شامل فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از زمین زراعی ایجاد گردید. در ابتدا پس از تعیین هر عارضه (مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی) و نقشه جاده (استخراجی از نرم‌افزار Google Earth) وارد محیط نرم‌افزار Arc GIS شده و نقشه فاصله با استفاده از روش فاصله اقلیدسی^۱ ایجاد شد.

مدل جنگل تصادفی

جنگل تصادفی^۲ یک روش جدید و قدرتمند یادگیری ماشینی است که توسعه بسیاری در فناوری عرضه نموده‌اند، ولی در تحقیقات اکولوژیک شناخته نیستند. این الگوریتم به دلیل سادگی و قابلیت استفاده، هم برای دسته‌بندی و هم رگرسیون، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشینی محسوب می‌شود. رویکرد جنگل تصادفی بر پایه روش‌های جدید ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری به وجود آمده است، سپس تمام درختان باهم برای پیش‌بینی ترکیب می‌گردند. پارامترهای کلیدی برای مدل جنگل تصادفی، تعداد درختان و تعداد متغیرهای برای پیش‌بینی ترکیب می‌گردند.

مدل ماشین بردار پشتیبان

مدل ماشین بردار پشتیبان^۳ یکی از مهم‌ترین روش‌های یادگیری ماشینی است که می‌تواند به‌طور مشترک برای دو عملیات طبقه‌بندی و رگرسیونی به کار رود. این روش شامل مجموعه‌ای از توابع طبقه‌بندی است که دارای قابلیت ارزیابی خطا و تعمیم مناسب اطلاعات بوده و با استفاده از اطلاعات موجود در لایه‌های عوامل مؤثر و تکرار بالای مدل‌سازی، پیچیدگی رفتار پیدایش پدیده فرسایش را کاهش می‌دهد. این مدل شامل یک مرحله آموزشی با ورودی و ارزش‌های اهداف خروجی است. برای کمینه کردن میزان خطاهای تعمیم‌یافته باید میزان خطای آموزشی و پیچیدگی طبقه‌بندی کاهش یابد که با استفاده از صفحه جدایش انجام می‌شود که وظیفه افزایش حاشیه بین طبقات را بر عهده دارد. الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، روش کلی برای تخمین توابع ارائه می‌نمایند که هدف اصلی آن‌ها حل مسائل بهینه‌سازی درجه دوم می‌باشد.

مدل‌سازی و ارزیابی دقت

پس از تهیه لایه‌های عوامل محیطی، اطلاعات مربوط به نقاط فرسایش استخراج گردید. در این تحقیق، تمامی اطلاعات مربوط به وقوع فرسایش در ۲۰ سال اخیر از منابع موجود جمع‌آوری گردید. در این راستا علاوه بر اطلاعات ادارات منابع طبیعی و آبخیزداری و حفاظت محیط‌زیست استفاده شد. در مجموع و پس از حذف نقاط تکراری و ادغام نقاط با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر، لایه نهایی نقاط فرسایش به‌صورت نقطه‌ای ایجاد شد. این اطلاعات به دو گروه نقاط لازم برای آموزش مدل (۷۰ درصد) و نقاط لازم برای ارزیابی نتایج مدل (۳۰ درصد) به‌صورت کاملاً تصادفی تقسیم شدند. در کل، برای آموزش و ساخت مدل‌ها از ۲۵۴۳ نقطه و برای ارزیابی دقت مدل‌ها از ۷۸۴ نقطه استفاده شد.

1. Euclidean Distance

2. Random Forest

3. Support Vector Machine (SVM)

مدل‌سازی مربوط به دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در نرم‌افزار R و به ترتیب بسته‌های "randomForest" و "e1071" انجام شد. همچنین برای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در وقوع فرسایش در استان اصفهان، از روش نمودار اهمیت نسبی (varImpPlot) در الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. برای تعیین دقت و صحت نتایج و قابلیت اطمینان هر مدل‌سازی، نتایج آن باید ارزیابی شود (Zhu et al, 2020). ارزیابی نتایج مدل‌سازی سبب افزایش اطمینان به اطلاعات به‌دست‌آمده خواهد شد که در نهایت موجب مدیریت پایدار در زمینه منابع طبیعی شده و راهی برای دستیابی به توسعه پایدار می‌باشد. در این تحقیق سطح زیر نمودار^۱ در منحنی نمودار مشخصه عملکرد^۲ به معنی مشخصه عملکرد سیستم استفاده شد. همچنین برای مقایسه دو مدل مورد بررسی، برخی از مهم‌ترین آماره‌های ارزیابی متقابل شامل ضریب همبستگی (r)، ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده گردید.

محدوده مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۱۹۹ کیلومترمربع، حدود ۶/۲۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. این استان بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی در ایران مرکزی قرار دارد. استان اصفهان بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ساختاری ایران گستره‌ای است که از خاور به باختر توسط زیرزون یزد، زون ایران مرکزی، سندج - سیرجان، زیر زون بیستون و بخش‌هایی از بلندی‌های زاگرس پوشیده شده است. همچنین سنگ‌های آذرین ترشیری حجم گسترده‌ای در نواحی مرکزی و شمال استان دارند و زون افیولیتی در نواحی نائین تا انارک دارای رخنمون می‌باشد (Shafaqi, 2008). موقعیت استان اصفهان از نظر اقلیمی در درون شرایط ماکروکلیمایی ایران از آن‌چنان وضعیتی برخوردار نیست که برای تمام ایام سال تحت تأثیر شرایط همسانی از نظر توده‌های هوا قرار گیرد، به‌طوری‌که از یک‌سو در حیطه اقلیم جنب مداری بوده و از نظر ژنتیک تحت تأثیر شرایط حاصله در سطح ماکروکلیمایی ژنتیک و عوامل مؤثر در پیدایش آن قرار گرفته است (زمستان‌های سرد و بارانی و تابستان‌های گرم و خشک) (Shafaqi, 2008). متوسط دمای روزانه در سال ۱۴۰۱ در استان اصفهان ۱۶ درجه سلسیوس، تعداد روزهای یخبندان استان ۷۴ روز، میزان بارندگی ۱۲ ماه استان اصفهان ۲۱۷/۷ میلی‌متر و این استان در ارتفاع ۱۵۷۰ متری از سطح دریا می‌باشد. بخش اعظم بارندگی استان اصفهان مربوط به جریانات مدیترانه‌ای است که از سمت غرب از اوایل پائیز تا اواسط بهار این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر اساس مطالعات محققین مختلف سالیانه حدود ۴۰ مرکز کم‌فشار در دوره سرد سال و اوایل بهار، مناطق مختلف کشور را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند که قریب ۲۵ درصد آن از منطقه اصفهان عبور کرده و استان اصفهان را زیر نفوذ خود می‌گیرند (Moayeri & Entezar, 2008). به‌طور کلی می‌توان خاک‌های استان اصفهان را به سه قسمت تقسیم نمود که عبارت‌اند از:

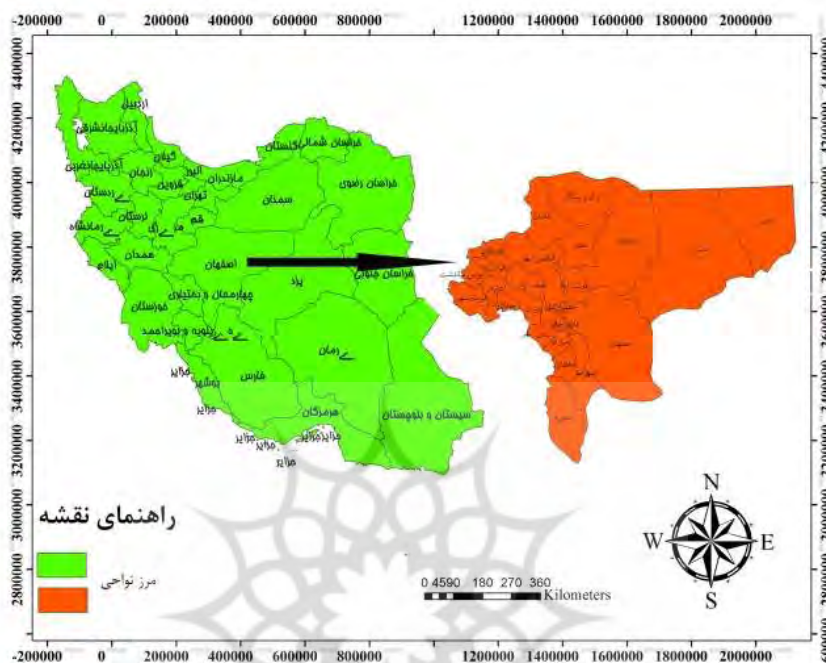
الف) خاک‌های قابل کشت و زرع ب) خاک‌های کم‌وبیش قابل کشت و زرع ج) خاک‌های غیرقابل کشت و زرع (Shafaqi, 2008).

استان اصفهان در مرکز فلات ایران قرار دارد که در منطقه‌ای کوهستانی و ارتفاع متوسط آن ۱۵۰۰ متر و گاهی تا ۲۰۰۰ متر برآورد شده است و اغلب ارتفاعات دارای جهتی شمال غربی - جنوب شرقی است. بر اساس آخرین تقسیمات

1. Area Under Curve (AUC)

2. Receiver Operating Characteristic (ROC)

سیاسی، استان اصفهان دارای ۲۴ شهرستان، ۵۱ بخش، ۱۰۶ شهر و ۱۳۱ دهستان می‌باشد. استان اصفهان از نظر پوشش گیاهی و جنگل، جزو مناطق فقیر ایران است. پوشش گیاهی آن محدود به کناره‌های رودخانه زاینده‌رود می‌باشد. همچنین در شهرستان‌های فریدون‌شهر و سمیرم جنگل‌های طبیعی به شکل پراکنده وجود دارد. در استان حدود ۲۰۰۰ گونه گیاه وجود دارد که از این تعداد ۲۳۸ گونه درخت و حدود ۹۰ گونه آن غیربومی است. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

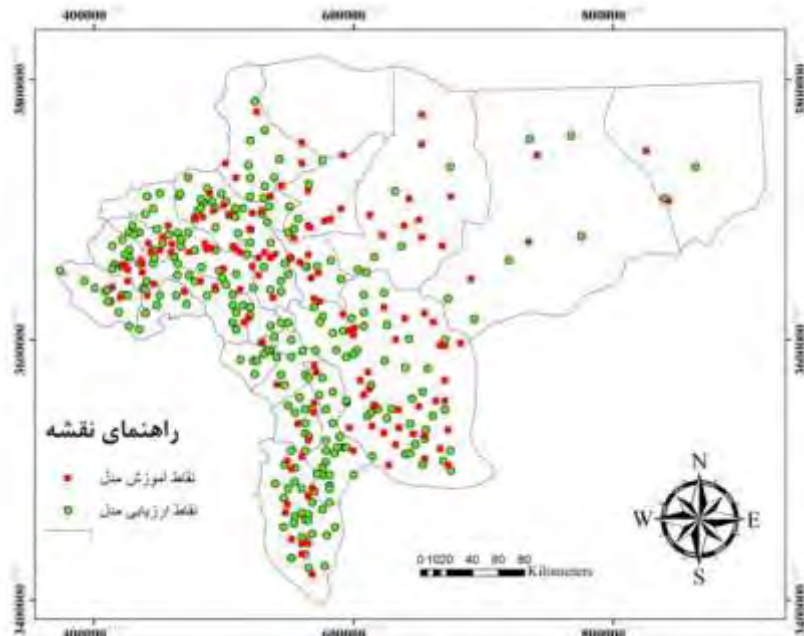


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

تهیه نقاط فرسایش برای مدل‌سازی

در تحقیق حاضر از مجموعه نقاط فرسایش ثبت‌شده و همچنین موقعیت اتفاق افتاده که توسط ادارات منابع طبیعی و آبخیزداری و همچنین اداره کل محیط‌زیست استان اصفهان ثبت گردیده بود استفاده شد. در مجموع و پس از حذف نقاط تکراری و ادغام نقاط بافاصله کمتر از ۱۰۰ متر، لایه نهایی نقاط فرسایش به صورت نقطه‌ای ایجاد شد. این اطلاعات به دو گروه نقاط لازم برای آموزش مدل (۷۰ درصد) و نقاط لازم برای ارزیابی نتایج مدل (۳۰ درصد) به صورت کاملاً تصادفی تقسیم شدند. در کل، برای آموزش و ساخت مدل‌ها از ۲۳۴۵ نقطه و برای ارزیابی دقت مدل‌ها از ۶۵۴ نقطه استفاده شد. نمایی از موقعیت نقاط آموزش و ارزیابی مدل در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. موقعیت نقاط فرسایش برای آموزش مدل و ارزیابی دقت مدل‌سازی

تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر در وقوع فرسایش

بررسی اهمیت نسبی لایه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی بر اساس شاخص اهمیت جایگشتی نشان داد که به ترتیب لایه‌های درجه حرارت و بارش مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش در استان اصفهان بودند (شکل ۳). همچنین لایه فاصله از مناطق مسکونی کم‌اهمیت‌ترین عوامل در مناطق دارای سابقه فرسایش در استان اصفهان بودند (شکل ۳).



شکل ۳. اهمیت نسبی لایه‌های مورد استفاده در تعیین مناطق مستعد به فرسایش

مدل‌سازی فرسایش

پس از تهیه نقشه لایه‌های عوامل تأثیرگذار، اطلاعات هر لایه مربوط به نقاط فرسایش مورد استفاده برای آموزش مدل به کمک نرم‌افزار Arc GIS استخراج شد. سپس این اطلاعات برای مدل‌سازی در دو الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین

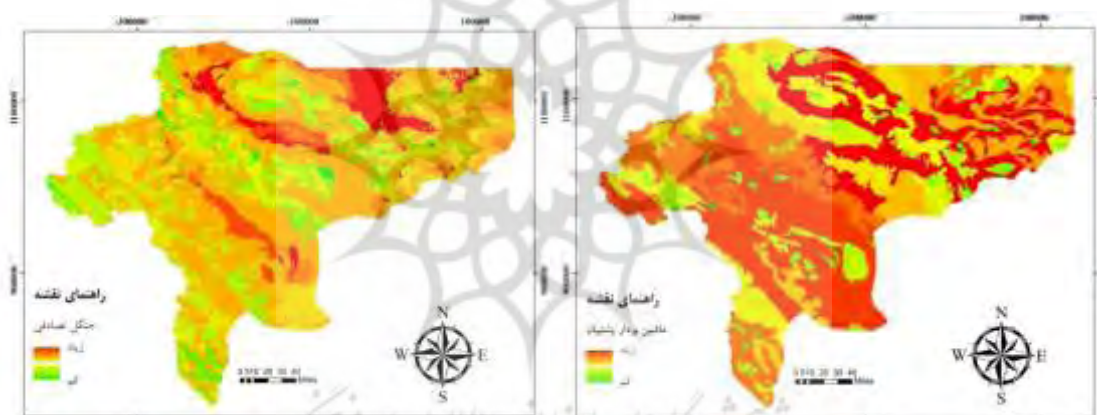
بردار پشتیبان مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت رابطه به دست آمده توسط هر مدل با استفاده از تابع پیش‌بینی^۱ در نرم‌افزار R بر روی اطلاعات تمام لایه‌های اولیه اعمال و نقشه خطر فرسایش برای هر مدل به صورت مجزا تولید گردید.

مدل‌سازی با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان:

پس از آموزش مدل با استفاده از اطلاعات تهیه شده، بر اساس شبکه‌ای از نقاط (۶۹۹۵۶) ارزش خطر فرسایش برای همه پیکسل‌های منطقه مورد بررسی بر اساس دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در نرم‌افزار R تهیه شد. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل ماشین بردار پشتیبان، عمده مناطق جنوبی، شمال-شرق و جنوب-غرب دارای خطر بیشتری برای وقوع فرسایش هستند (شکل ۴(الف)). همچنین مناطق با خطر متوسط در محدوده‌های شمال-غرب و جنوب-غرب دیده می‌شوند. نتایج مدل‌سازی خطر وقوع فرسایش در استان اصفهان با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در (شکل ۴(الف)) نمایش داده شده است.

مدل‌سازی با استفاده از مدل جنگل تصادفی:

همانند الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، نتایج الگوریتم جنگل تصادفی بیانگر وجود مناطقی مشابه در زمینه خطر وقوع فرسایش ولی به وسعت بیشتر بود (شکل ۴(ب)). بر اساس نتایج، دو منطقه با خطر زیاد و خطر متوسط در استان اصفهان وجود دارد که مناطق شمال-شرق و شمال حوزه مورد بررسی در زمینه وقوع فرسایش هستند و سایر مناطق در محدود خطر کم قرار دارند که احتمال وقوع فرسایش در آن‌ها بیشتر از ۴۹ درصد است (شکل ۴(ب)).



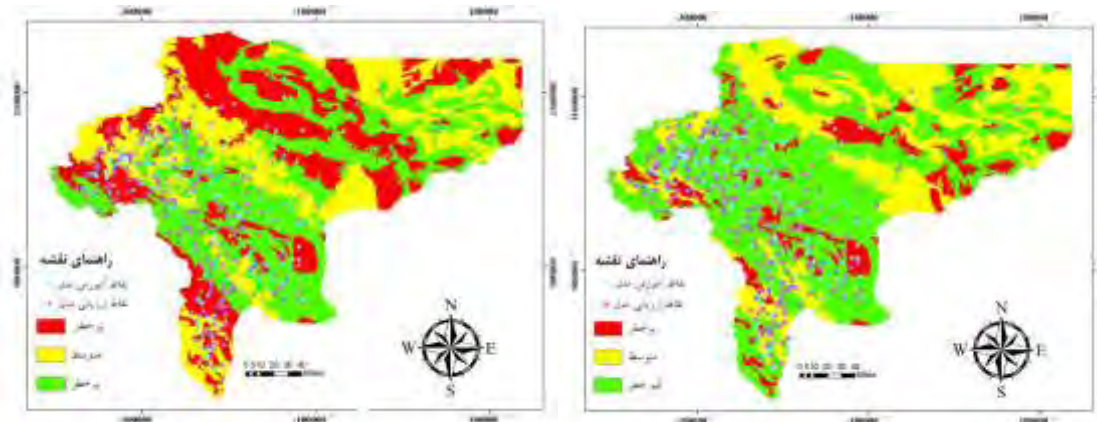
شکل ۴. (الف): مدل‌سازی خطر وقوع فرسایش مدل ماشین بردار پشتیبان؛ (ب): مدل‌سازی خطر وقوع فرسایش مدل جنگل تصادفی

کلاس‌بندی نقشه خطر فرسایش:

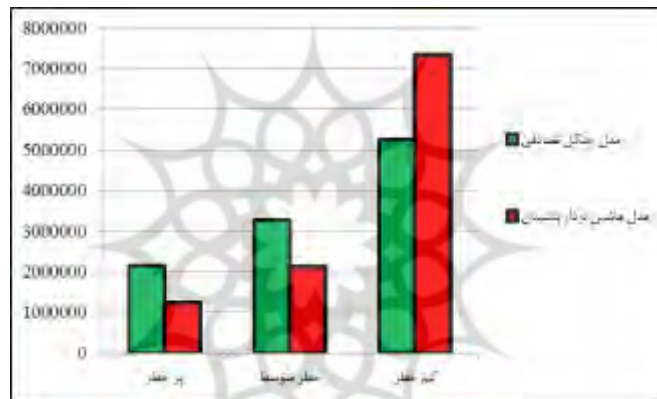
پس از تهیه نقشه خطر فرسایش، برای تحلیل بهتر اطلاعات و نتایج، این نقشه در سه کلاس خطر شامل کلاس خطر کم خطر وقوع صفر تا ۰/۵۰، کلاس خطر متوسط خطر وقوع ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ و کلاس خطر خیلی زیاد خطر وقوع ۰/۷۵ تا ۱ دسته‌بندی گردیدند.

بر اساس نتایج، در مدل ماشین بردار پشتیبان کلاس کم‌خطر دارای بیشترین مساحت (۷۳۴۵۶۱۷/۶۸ درصد) بود (شکل ۵(الف) و جدول ۱). در مدل ماشین بردار پشتیبان، دومین کلاس با مساحت زیاد مربوط به کلاس خطر متوسط بود که ۱۹/۸ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. در حالی که در مدل جنگل تصادفی، کلاس متوسط با مساحت ۳۲۷۶۵۶۷ هزار هکتار معادل ۳۰/۶ از سطح منطقه، دارای مقدار بیشتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان می‌باشد (شکل ۵(ب) و جدول ۱). در نهایت، در مدل ماشین بردار پشتیبان، کمترین مساحت مربوط به کلاس پرخطر بود

که تنها ۱۱/۶ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌داد درحالی‌که در مدل جنگل تصادفی نیز، کمترین مساحت مربوط به کلاس پرخطر با مساحتی معادل ۲۱۵۷۶۵۲ هکتار (۲۰/۱ درصد) بود (شکل ۶ و جدول ۱).



شکل ۵. (الف): کلاس خطر وقوع فرسایش مدل ماشین بردار پشتیبان (ب): کلاس خطر وقوع فرسایش مدل جنگل تصادفی

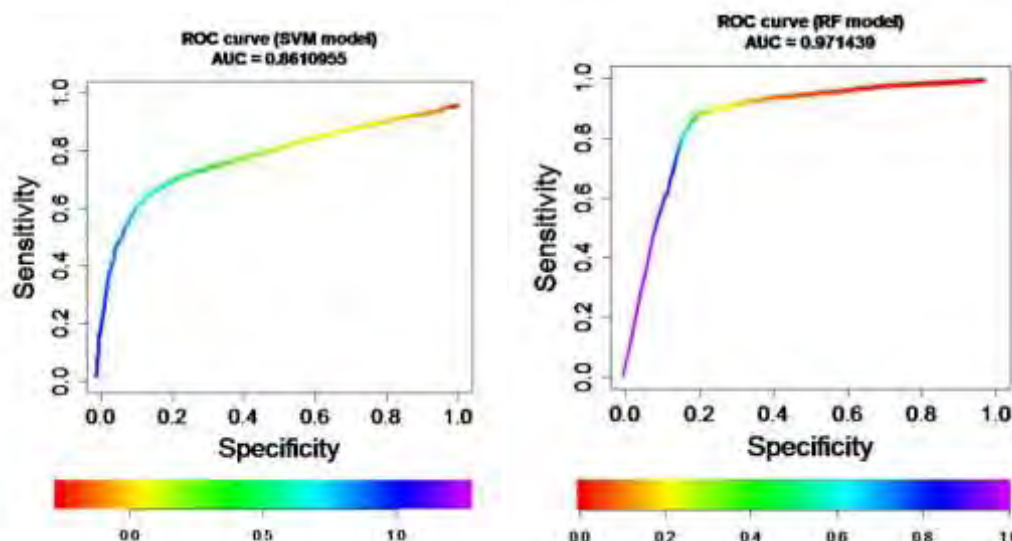


شکل ۶. مساحت (هکتار) کلاس‌های خطر وقوع فرسایش بر اساس دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان

جدول ۱. مساحت کلاس‌های مختلف خطر بر اساس مدل‌های مورد استفاده

کلاس خطر وقوع فرسایش	مدل ماشین بردار پشتیبان		مدل جنگل تصادفی	
	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)	درصد
پرخطر	۱۲۳۲۹۸۶	۱۱/۶	۲۱۵۷۶۵۲	۲۰/۱
خطر متوسط	۲۱۲۳۱۶۱	۱۹/۸	۳۲۷۶۵۶۷	۳۰/۶
کم‌خطر	۷۳۴۵۶۱۷	۶۸/۶	۵۲۶۷۵۴۵	۴۹/۲
کل	۱۰۷۰۱۷۶۴	۱۰۰	۱۰۷۰۱۷۶۴	۱۰۰

ارزیابی دقت دو مدل ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی بر اساس سطح زیر نمودار (AUC) در منحنی ROC نشان داد که هر دو مدل از دقت مناسبی برخوردار هستند اما مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالاتری است. بر اساس نتایج، مدل جنگل تصادفی دارای سطح زیر نمودار ۰/۹۷ و مدل ماشین بردار پشتیبان دارای سطح زیر نمودار ۰/۸۶ بود (شکل ۷).



شکل ۷. ارزیابی دقت مدل‌های مورد بررسی با استفاده از سطح زیر نمودار (AUC)

بررسی آماری سطح زیر نمودار در دو مدل نیز نشان داد که هر دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان از خطای کمی برخوردار بوده و سطح زیر نمودار آن‌ها به لحاظ آماری در محدوده معنی‌دار قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج، سطح زیر نمودار در مدل جنگل تصادفی بین فاصله اطمینان دو محدوده ۰/۹۶ و ۰/۹۸ قرار دارد در حالی که مدل ماشین بردار پشتیبان بین فاصله اطمینان ۰/۸۴ تا ۰/۸۸ قرار داشت (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج آماری ارزیابی دقت مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی فرسایش بر اساس سطح زیر نمودار استخراج شده از نرم‌افزار R

فاصله اطمینان در سطح ۹۵ درصد				
مدل	سطح زیر نمودار	خطا استاندارد	سطح معنی‌داری	فاصله اطمینان در سطح ۹۵ درصد
				حد بالا حد پایین
جنگل تصادفی (RF)	۰/۹۷۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۹۶۳ ۰/۹۸۰
ماشین بردار پشتیبان (SVM)	۰/۸۶۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰	۰/۸۴۰ ۰/۸۸۳

ارزیابی مقاطع^۱:

ارزیابی مقاطع با استفاده از آمارهای مرسوم نشان داد که مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان است. بر اساس نتایج، مدل جنگل تصادفی دارای ضریب همبستگی بالاتر ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق کمتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان بود (جدول ۳).

جدول ۳. ارزیابی مقاطع دقت مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان

آماره ارزیابی دقت	جنگل تصادفی (RF)	ماشین بردار پشتیبان (SVM)
ضریب همبستگی	۰/۸۷۵	۰/۶۲۳
ضریب تبیین	۰/۷۶۵	۰/۳۸۸
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۲۴۳	۰/۳۹۲
میانگین خطای مطلق	۰/۱۲۵	۰/۳۰۹
شاخص نرمال شده BIC	۲/۸۲۱	۱/۸۶۴

در ادامه به ارزیابی دقت پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی در هر دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به تفکیک نقاط پرخطر، کم‌خطر و خطر متوسط پرداخته شد (جدول ۴). بر اساس نتایج، در مدل ماشین بردار پشتیبان کلاس کم‌خطر دارای بیشترین درصد تعداد نقاط فرسایشی بود (۵۲ درصد). در مدل جنگل تصادفی این کلاس حدود ۴۳ درصد می‌باشد که در مقایسه با مدل بردار پشتیبان حدود ۱۰ درصد کمتر می‌باشد. همچنین تعداد نقاط فرسایشی در مناطق پرخطر در مدل ماشین بردار حدود ۱۵ درصد می‌باشد که در مقایسه با مدل جنگل تصادفی کمتر می‌باشد.

جدول ۴. ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی خطر فرسایش بادی

روش	ماشین بردار پشتیبان		جنگل تصادفی	
	تعداد نقاط فرسایشی	درصد نقاط فرسایشی	تعداد نقاط فرسایشی	درصد نقاط فرسایشی
کلاس کم‌خطر	۱۵۸۷	۵۳	۱۲۶۵	۴۳
خطر متوسط	۹۴۳	۳۲	۱۰۴۵	۳۵
پرخطر	۴۶۹	۱۵	۶۸۹	۲۲

بحث

بر اساس نتایج، در مدل ماشین بردار پشتیبان کلاس کم‌خطر دارای بیشترین مساحت ۷۳۴۵۶۱۷ ($۶۸/۶$ درصد) بود. در مدل ماشین بردار پشتیبان، دومین کلاس با مساحت زیاد مربوط به کلاس خطر متوسط بود که $۱۹/۸$ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. درحالی‌که در مدل جنگل تصادفی، کلاس متوسط با مساحت ۳۲۷۶۵۶۷ هزار هکتار معادل $۳۰/۶$ از سطح منطقه، دارای مقدار بیشتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان می‌باشد. درنهایت، در مدل ماشین بردار پشتیبان، کمترین مساحت مربوط به کلاس پرخطر بود که تنها $۱۱/۶$ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌داد درحالی‌که در مدل جنگل تصادفی نیز، کمترین مساحت مربوط به کلاس پرخطر با مساحتی معادل ۲۱۵۷۶۵۲ هزار هکتار ($۲۰/۱$ درصد) بود. نتایج این مطالعه با نتایج سایر محققان از جمله (Asghari saraskanroud et al, 2019) که روش‌های مختلفی را برای ارزیابی مدل‌ها ارزیابی کرده‌اند، مطابقت دارد. همچنین مشخص شد که دقت مدل‌های جنگل تصادفی در مقابل ماشین بردار پشتیبان دارای دقت بیشتری می‌باشد که با تحقیقات (Taripanah et al, 2023) مطابقت دارد. همچنین ارزیابی مقاطع با استفاده از آمارهای مرسوم نشان داد که مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان است. بر اساس نتایج، مدل جنگل تصادفی دارای ضریب همبستگی ($۰/۸۷۵$)، ضریب تبیین ($۰/۷۶۵$) و ریشه میانگین مربعات خطا ($۰/۲۴۳$) بالاتر و میانگین خطای مطلق ($۰/۱۲۵$) کمتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان بود.

نتیجه‌گیری

فرسایش خاک و تولید رسوب امروزه به یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی بشر تبدیل شده است. بنابراین مدیریت خاک به منظور بهره‌برداری مطلوب و کاهش تخریب آن ضروری می‌باشد (arekhi, 2022). در مدل‌های مختلف فرسایش خاک، شاخص‌های متفاوتی برای فرسایش‌پذیری توسعه داده شده. استفاده از مدل‌های فرسایشی، رویکردی بهینه در زمینه بررسی فرسایش، تولید رسوب و شناسایی مناطق بحرانی است. مدل‌های فرسایشی می‌توانند به عنوان ابزارهای پیش‌بینی برای ارزیابی هدر رفت خاک، برنامه‌ریزی حفاظت، موجودی فرسایش خاک و برنامه‌ریزی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

مدل‌سازی مناطق مستعد فرسایش می‌تواند ابزاری کلیدی در راستای مدیریت صحیح و به هنگام مخاطرات طبیعی از جمله نابودی خاک باشد. با توجه به قرار گرفتن ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک، فرسایش یکی از مهم‌ترین بحران‌های آن، فرسایش خاک به حساب می‌آید (Jahun et al, 2015). بسیاری از مدیران درصدد کشف راحل‌های مناسب برای مدیریت فرسایش می‌باشند که بتوان با استفاده از آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن فرسایش را مدیریت و کنترل کرد. با توجه به زمان لازم برای کنترل فرسایش و سرمایه‌گذاری منابع، تخمین دقیق احتمال وقوع فرسایش و تهیه نقشه‌های توزیع فرسایش، گام نخست در مدیریت فرسایش و ارزیابی خطر می‌باشد. تحقیق حاضر نیز به منظور بررسی کارایی روش‌های مختلف یادگیری ماشینی در مدل‌سازی مناطق مستعد به فرسایش در استان اصفهان صورت گرفت. در تحقیق حاضر بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی به ترتیب لایه‌های پوشش گیاهی و بارش مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش در استان اصفهان بودند و فاصله از مناطق مسکونی کم‌اهمیت‌ترین عامل در مناطق دارای سابقه فرسایش در استان اصفهان بودند. بر اساس مطالعات انجام‌شده دما، رطوبت هوا و افزایش بارندگی از جمله عوامل طبیعی هستند که زمینه را برای ایجاد فرسایش سطحی و گسترده در مناطق فراهم می‌کنند.

به‌طور کلی، میزان صحت مدل مورد استفاده به عوامل بسیاری وابسته است که می‌توان به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه چون توپوگرافی، عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش، دقت و نوع لایه‌های متغیرهای مستقل جهت مدل‌سازی احتمال خطر وقوع فرسایش، دقت نقاط و محدوده‌های ثبت‌شده فرسایش به وقوع پیوسته در گذشته و نوع الگوریتم پیش‌بینی مورد استفاده از جمله عوامل تأثیرگذار بر صحت کلی طبقه‌بندی اشاره کرد. با توجه به افزایش میزان فرسایش و افزایش بحران در مناطق، نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند برای مدیریت فرسایش در منطقه مورد مطالعه و کمک به مدیران در جهت برنامه‌ریزی و اقدامات و فراهم کردن امکانات در مناطق پرخطر و مستعد فرسایش باشد.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسنده این پژوهش حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسنده این مقاله در تمامی مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسنده اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارد.

تقدیر و تشکر

نویسنده از حمایت‌های معنوی دانشگاه اصفهان تشکر و قدردانی می‌نماید.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد؛ فعال نذیری، مهدی و اردشیر پی، علی‌اصغر. (۱۳۹۸). بررسی اثرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک با الگوریتم (WLC مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق‌لاقان‌چای). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۹ (۲)، ۵۳-۷۱.
- آرخی، صالح، سلمانی، سمیه، عمادالدین، سمیه. (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی روی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل EPM (مطالعه موردی: حوضه کال‌آجی استان گلستان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۲ (۳)، ۲۷۳-۳۰۱. doi: 10.22067/geoh.2022.74281.1145

تاری پناه، فریده، رنجبر فردوئی، ابوالفضل، ولی، عباسعلی، مکرم، مرضیه. (۱۴۰۲). طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی و بررسی ریسک واقعی فرسایش آن‌ها در مناطق کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خارستان). نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران، ۱۵(۲)، ۱۷-۳۶. doi: 10.48308/gisj.2023.102344

خالقی، سمیه، نصرتی، کاظم، عباسپور، رحیم. (۱۳۹۹). برآورد فرسایش خاک و انتقال رسوب در بالادست حوضه آبخیز بادآور لرستان با استفاده از مدل SWAT. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۹(۳)، ۱۸۶-۲۰۲. doi: 10.22034/gmpj.2020.122224

خسروی اقدم، کمال، ممتاز، حمیدرضا، اسدزاده، فرخ. (۱۳۹۸). برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک مدل USLE و ارتباط آن با برخی از ویژگی‌های زمین منظر در بخشی از حوضه آبخیز نازلو چای ارومیه. تحقیقات کاربردی خاک، ۷(۱)، ۳۱-۴۳.

خلیفه، ابراهیم، کاویان‌پور، محمدرضا، پاک‌پرور، مجتبی، متقی، امین‌اله. (۱۳۸۹). کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور در ارزیابی کمی و کیفی فرسایش بادی، مطالعه موردی: دشت شورجستان آباده. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۲(۱)، ۴۴-۵۵.

زنگنه اسدی، محمدعلی، ناعمی تبار، مهنار، زندی، رحمان. (۱۴۰۰). بررسی پتانسیل مناطق مستعد فرسایش با مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه گناباد). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۴)، ۹۳-۱۱۲. doi: 10.22067/geoh.2021.71162.1080

دهمرد قلعهنو، محمدرضا، نهتانی، محمد، خالدی، سعیده. (۱۳۹۸). نقش عوامل انسانی بر تشدید فرسایش بادی در منطقه هامون هیرمند. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۳)، ۶۰۹-۶۱۸. doi: 10.22092/ijwmse.2018.108923.1250

مزیانی، مهدی، رضایی مقدم، محمدحسین، حجازی، اسداله. (۱۴۰۰). ارزیابی خطر فرسایش خاک در کاربری‌های اراضی با استفاده از معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیکان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۱)، ۴۱-۶۳. doi: 10.22067/geoh.2021.67238.0

مددی، عقیل، اصغری سراسکانرود، صیاد، نگهبان، سعید، مرحمت، مهری. (۱۴۰۲). کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) و درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT) جهت مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر). پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۵(۴)، ۸۳-۱۰۱. doi: 10.22059/jphgr.2023.360424.1007775

معمدی راد، محمد، زنگنه اسدی، محمدعلی، عجم، حسین. (۱۴۰۲). بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل (RUSLE) و روش پسیاک اصلاح‌شده (مطالعه موردی: حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۴)، ۱۴۷-۱۶۵. doi: 10.22034/gmpj.2022.360813.1374

References

- Asghari saraskanroud S, faal naziri M, ardashirpay A A. (2019). studying the effects of land use on soil Erosion with WLC algorithm. Case of study: Agh Laghan Chay basin. *E.E.R.* 9, (2), 53-71. [In Persian]
- Arekhi, S., Salmani, S., & emadodin, S. (2023). Assessing the Impact of Land Use Changes on Erosion and Sediment Using Remote Sensing and GIS (Case Study: Kala aji Watershed, Golestan Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 12-19. doi: 10.22067/geoh.2022.74281.1145
- Ashraf, A. (2020). Risk modeling of soil erosion under different land use and rainfall conditions in Soan river basin. Sub -Himalayan region and mitigation options. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6: 417-428. doi: 10.1007/s40808-019-00689-6
- Bagio, B., Bertol, I., Wolschick, N.H., Schneiders, D., Santos, M.A.d.N.d., (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41p. https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160132
- Christos, G., Panagos, P., & Ioannis, Z. G. (2014). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7, 229-250. https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380

- Dahmardeh Ghaleno, M. R., Nohtani, M., & Khaledi, S. (2019). Effect of anthropogenic factors on wind erosion intensification in Hirmand Hamoon Region. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 609-618. doi: 10.22092/ijwmse.2018.108923.1250
- Green, C., Diepernk, G., EK, K., Hegger, D., Pettersson, M., Priest, S., Tapsell, S. (2014). Flood risk management in Europe: the flood problem and interventions. *Star flood*. 1- 250.
- Guo, Y., Xion, Y. (2017). Comparison of the implementation of three common types of coupled CFD-DEM model for simulating soil surface erosion. *International Journal of Multiphase Flow*, 91: 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.006>
- Khalife, E., Kavianpour, M. R., Pakparvar, M., & Mottaghi, A. (2010). Application of geographical information systems and remote sensing in qualitative and quantitative assessment of wind erosion, Case study: Shoorjestan plain. *Watershed Engineering and Management*, 2(1), 44-55. [In Persian]
- Kairis, O., Karavitis, C., Kounalaki, A., Salvati, L., & Kosmas, C. (2013). The effect of landmanagementpractices on soil erosion and land desertification in an olive grove. *Soil Use and Management*, 29(4), 597-606.
- Khaleghi, S., Nosrati, K., & Abbaspour, R. (2020). Estimation Of Soil Erosion And Sediment Transport By SWAT Model (Case Study: Upstream Of Badavar Basin, Lorestan). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3): 186-202. Doi: 10.22034/Gmpj.2020.122224
- Khosraviaqdam, K., Momtaz, H. R., & Asadzadeh, F. (2019). Estimation of Soil erodibility factor of USLE model and its relationship with landscape features in some parts of Nazzlo-Chay basin, Iran. *Applied Soil Research*, 7(1), 31-4.. [In Persian]
- Jahun, B, G. Ibrahim, R. Dlamini, N, S. Musa, S.M. (2015). Review of Soil Erosion Assessment using RUSLE Model and GIS. *Journal of Biology. Agriculture and Healthcare*, 5(9), 36-47.
- Madadi, A., asghari saraskanroud, S., Neghaban, S., & Marhamat, M. (2023). Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shore River Moher City. *Physical Geography Research*, 55(4), 83-101. doi: 10.22059/jphgr.2023.360424.1007775. [In Persian]
- 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
- Moayeri, M., & Entezar, M. (2008). Floods And Reviow Floods In Province Of Esfahan. *Journal of The Studies Of Human Settlements Planning*, 3(6), 109-123. [In Persian]
- Mezbani, M., Rezaei Moghadam, M., & Hejazi, A. (2021). Assessment of soil erosion risk in land uses using Revised Universal Soil Loss Equation (Case Study: Sikan Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(1), 41-63. doi: 10.22067/geoh.2021.67238.0. [In Persian]
- Shafaqi.S. (2008) *Geography of Isfahan*. Isfahan University Publications. [In Persian]
- Reis, m., Dutal, H., Bolat, N., Savac, G. (2017). Soil Erosion Risk Assessment Using GIS and ICONA: A Case Study in Kahramanmaras, Turkey. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 34(1), 64-75.
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 64-84. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>
- Pimentel, D., Harman, R., Pacenza, M., Pecarsky, J., & Pimentel, M. (1994). Natural resources and an optimum human population. *Population and environment*, 15, 347-369.
- Taripanah, F., Ranjbar, A., Vali, A., & Mokarram, M. (2023). Classification of Landforms Using Topographic Location Index and Assessment of their Actual Soil Erosion Risk in Mountainous Areas (Case Study: Kharestan Watershed). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 15(2), 17-36. doi: 10.48308/gisj.2023.102344. [In Persian]
- Wainwright, J., Parsons, A. J., & Abrahams, A. D. (2000). Plot- scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: Case studies from Arizona and New Mexico. *Hydrological Processes*, 14(16- 17), 2921-2943. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2921::AID-HYP127>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2921::AID-HYP127>3.0.CO;2-7)

- Wu YeNan, W. Y., Zhong PingAn, Z. P., Zhang Yu, Z. Y., Xu Bin, X. B., Ma Biao, M. B., & Yan Kun, Y. K. (2015). *Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin*. China. [Doi:10.1007/s11069-015-1737-3](https://doi.org/10.1007/s11069-015-1737-3)
- Zhu, S., Li, D., Huang, G., Chhipi-Shrestha, G., Nahiduzzaman, K.M., Hewage, K., Sadiq, R. (2020). Enhancing urban flood resilience: a holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 61, 1-52.
- Zerihun, M., Mohammedyasin, M.S., Sewnet, D., Adem, A.A., Lakew, M. (2018). Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia. *Geoderma Reg*, 12, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.002>
- Zhang, W., Zhou, J., Feng, G., Weindorf, D. C., Hu, G., & Sheng, J. (2015). Characteristics of water erosion and conservation practice in arid regions of Central Asia: Xinjiang, China as an example. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 97-111.
- Zangeneh Asadi, M. A., Naemi Tabar, M., & Zandi, R. (2022). Investigating the Potential of Erosion-Prone Areas with ICONA Models, Support Vector Machine, Chaid and Random Forest (Case Study: Gonabad Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(4): 93-112. [doi: 10.22067/geoh.2021.71162.1080](https://doi.org/10.22067/geoh.2021.71162.1080). [In Persian]

