

## Badland erosion susceptibility assessment in the Firozkuh watershed

Majid Mohammady<sup>1\*</sup> and Mojtaba Amiri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> Associate professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 07 April 2024 Accepted: 17 August 2024

### Extended abstract

#### Introduction

Human activities are at the core of global environmental change and Humans play a key role in global warming, land degradation, air and water pollution, rising sea levels, eroding the ozone layer, extensive deforestation, and acidification of the oceans. Soil erosion and degradation is a natural phenomenon altering the relief of the landscape. Erosion is often capable of causing several on-site and off-site impacts. Erosion and soil loss are common in hilly areas, but their severity will vary depending on the geoenvironmental factors including, Steep sloping, geological characteristics, vegetation and climatic factors making it more vulnerable to erosion. One of the most important kind of erosion is badland erosion. The term of badlands currently refers to areas of unconsolidated sediment with little or no vegetation, which are useless for agriculture because of their intensely dissected landscape. Badland erosion is observed mostly in arid and semi-arid regions, and the interaction of precipitation with geological materials is responsible for the development of badlands in arid and semi-arid regions. Because soil erosion is a complicated process that is influenced by the properties of the land surface and the soil as well as by environmental factors, quantitatively accurate forecasts of soil erosion and susceptibility mapping are challenging. The main goal of this research is to map badland erosion susceptibility in Firozkuh watershed using frequency ratio model.

#### Materials and methods

Firozkuh watershed was selected as study area because in this watershed, badlands are the most important contributors to soil erosion because of the condition of climatic, hydrologic, topographic, and reduced vegetation conditions, and as well as presence of susceptible soil and geology formations in this region. The first step in this research is to prepare distribution map of the badlands and determine their location on the map. This was done using Google Earth imagery and field surveys. The maps of conditioning factors were prepared from different sources and entered into the GIS environment. Digital Elevation Model (DEM) map with the cellsize of 30 meter was prepared using the elevation points and lines in the topographic maps prepared by the National Cartography Center of Iran. Slope aspect, slope degree, plan curvature, TWI and elevation classes maps were created using DEM map in ArcGIS10.3 and SAGA-GIS environment. The geology map of the watershed was extracted from the geologic map of Iran with the scale of 1:100000. River and road maps were extracted from 1:25000 topographic map and the distance from these features was calculated in ArcGIS10.3 environment. The land use of Firozkuh watershed was created from LANDSAT 8 images of year 2020 using a synthetic method. To map soil characteristics, 30 samples were taken from depth of 0-30 centimeter and analyzed in the laboratory. Average annual rainfall map was developed using rainfall data from meteorological stations. After classifying conditioning factors maps, the weight of each map was calculated using the frequency ratio model. In the next step, by combining the weights, the final badland erosion susceptibility map was prepared. The ROC curve and the area under the curve were used to assess the accuracy of the frequency ratio models.

#### Results and discussion

The relationship between badland erosion and conditioning factors was investigated using the frequency ratio model. The results showed that the highest weight of the frequency ratio is related to the elevation class of 1710 to 2286 meters, rainfall 400 to 550, slope more than 35, northwest aspect, distance less than 1150 meters from drainage network, marl, limestone and shale formations, rangelands, Convex and concave

\* Corresponding author: majid.mohammady@semnan.ac.ir

slopes, clay 25 to 33%, silt 27 to 35%, hydrological group C, soil depth 57 to 120 cm, pH 7.6 to 1.8, TWI class 6 to 11. Accuracy assessment of the frequency ratio model was done using ROC and area under this curve. The area under the ROC curve was 0.71 that showed frequency ratio model is acceptable for badland erosion susceptibility mapping in the Firozkuh watershed. Despite its simplicity, the frequency ratio model provides acceptable results due to the creation of a logical connection between the badlands and conditioning factors. Other studies, including investigating the potential of underground water, landslide susceptibility mapping, and the vulnerability to floods, have also been conducted with this model, and its accuracy has been confirmed.

### Conclusions

Because of topographical, climatic and geological conditions, the badland erosion is a dominant phenomenon in the Firozkuh watershed. In this research, badland erosion susceptibility map was prepared using the frequency ratio model. Accuracy assessment showed that frequency ratio is a suitable model for badland erosion susceptibility mapping in this watershed. The results showed that about 50% of this region has high and very high susceptibility to the badland erosion, so it is necessary to pay attention to this phenomenon and prepare a susceptibility map.

**Keywords:** Formation, Frequency ratio, ROC curve, Susceptibility map, Topography

Cite this article: Mohammady, M., Amiri, M., 2025. Badland erosion susceptibility assessment in the Firozkuh watershed. *Watershed Engineering and Management* 16(4), 571-585.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## ارزیابی حساسیت پذیری رخصاره فرسایشی هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه

مجید محمدی<sup>۱\*</sup> و مجتبی امیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

فعالیت‌های انسانی از مهم‌ترین دلایل تغییرات محیطی بوده و انسان‌ها نقش اساسی در گرمایش زمین، تخریب زمین، آلودگی آب و خاک، بالا رفتن سطح آب دریاها، تخریب لایه ازن، جنگل‌زدایی شدید و اسیدی کردن اقیانوس‌ها دارند. در مقیاس جهانی، تخریب و فرسایش یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی است که مناظر را تغییر می‌دهد. فرسایش خاک اثرات درون‌منطقه‌ای و برون‌منطقه‌ای فراوانی را به همراه دارد. فرسایش و هدررفت خاک معمولاً در مناطق شیب‌دار اتفاق می‌افتد اما شدت وقوع آن به عامل‌های محیط‌زیستی از قبیل میزان شیب، ویژگی‌های زمین‌شناسی، وضعیت پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی بستگی دارد که باعث افزایش آسیب‌پذیری یک منطقه به فرسایش می‌شود. یکی از مهم‌ترین رخصاره‌های فرسایشی رخصاره هزاردره یا بدلند است. رخصاره فرسایشی هزاردره معمولاً به مناطق با رسوبات سست و غیرمتراکم، پوشش گیاهی بسیار ضعیف یا فاقد پوشش گیاهی که به دلیل تراکم بالای شیارها و بریدگی‌ها برای کشاورزی غیرقابل استفاده است، اشاره می‌کند. فرسایش هزاردره بیش‌تر در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شود و در واقع برهم‌کنش بارش با مواد زمین‌شناسی سست بسیار مساعد ایجاد و گسترش رخصاره هزاردره در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. با توجه به اینکه فرسایش خاک یک فرایند بسیار پیچیده و تحت تأثیر ویژگی‌های سطح زمین، نوع خاک و دیگر عامل‌های محیط‌زیستی است، بررسی کمی و تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرسایش امری بحث‌برانگیز است. هدف اصلی از پژوهش حاضر، تهیه نقشه حساسیت فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه با استفاده از مدل نسبت فراوانی است.

### مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز فیروزکوه به این دلیل به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد که رخصاره فرسایش هزاردره مهم‌ترین نقش را در فرسایش خاک این حوزه به دلیل وضعیت اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی و کاهش پوشش گیاهی و همچنین وجود سازه‌های مستعد فرسایش دارد. اولین گام در این پژوهش تهیه نقشه پراکنش رخصاره‌های هزاردره و تعیین محل آنها روی نقشه است. این کار با استفاده از تصاویر گوگل ارث و پیمایش زمینی انجام شد. نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر از منابع مختلف تهیه و وارد محیط نرم‌افزار Arc/GIS شد. با استفاده از نقاط و خطوط ارتفاعی موجود در نقشه‌های توپوگرافی تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور، نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شد. نقشه‌های جهت شیب، درجه شیب، انحناء سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و طبقات ارتفاع با استفاده از نقشه DEM و در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS به دست آمد. نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز از نقشه

\* مسئول مکاتبات: majid.mohammady@semnan.ac.ir

زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج شد. نقشه‌های آبراهه و جاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ استخراج شده و فاصله از این عوارض در محیط Arc/GIS10.3 محاسبه شد. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز فیروزکوه با استفاده از تصاویر لندست ۸ برای سال ۲۰۲۰ و با روش تلفیقی به‌دست آمد. برای تهیه نقشه مشخصات مربوط به خاک ۳۰ نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و در آزمایشگاه بررسی شد. نقشه بارش متوسط سالانه با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی تهیه شد. بعد از طبقه‌بندی نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر، وزن هر نقشه با استفاده از مدل نسبت فراوانی محاسبه شد. در مرحله بعد با جمع کردن وزن‌ها، نقشه نهایی حساسیت فرسایش هزاردره تهیه شد. منحنی ROC و سطح زیر این منحنی برای ارزیابی دقت مدل نسبت فراوانی استفاده شدند.

## نتایج و بحث

ارتباط بین فرسایش هزاردره و عوامل مؤثر با استفاده از مدل نسبت فراوانی بررسی شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین وزن نسبت فراوانی مربوط به طبقه ارتفاعی ۱۷۱۰ تا ۲۲۸۶ متر، بارش ۴۰۰ تا ۵۵۰، شیب بیش‌تر از ۳۵، جهت شمال غرب، فاصله کم‌تر از ۱۱۵۰ متر از آبراهه، سازندهای ماری، آهکی و شیل، کاربری مرتع، شیب‌های محدب و مقعر، طبقه رس ۲۵ تا ۳۳ درصد، طبقه سیلت ۲۷ تا ۳۵ درصد، گروه هیدرولوژیک C، عمق خاک ۵۷ تا ۱۲۰ سانتی‌متر، اسیدپتیه ۷/۶ تا ۸/۱، طبقه ۶ تا ۱۱ شاخص TWI بوده است. بررسی دقت مدل نسبت فراوانی با استفاده از منحنی ROC و سطح زیر این منحنی انجام شد. سطح زیر منحنی ROC ۰/۷۱ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه قابل قبول است. مدل نسبت فراوانی با وجود سادگی، به‌دلیل ایجاد ارتباط منطقی بین هزاردره‌ها و عوامل مؤثر بر آن نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند. مطالعات دیگری از جمله بررسی پتانسیل آب‌های زیرزمینی، تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش و آسیب‌پذیری یک منطقه به سیلاب نیز با این مدل انجام شده و دقت آن مورد تأیید قرار گرفته است.

## نتیجه‌گیری

به‌دلیل شرایط توپوگرافی، اقلیمی و زمین‌شناسی رخساره فرسایشی هزاردره یک پدیده غالب در حوزه آبخیز فیروزکوه است. در این پژوهش نقشه حساسیت فرسایش هزاردره با استفاده از مدل نسبت فراوانی تهیه شد. ارزیابی دقت نشان داد، مدل نسبت فراوانی یک مدل مناسب برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در این حوزه آبخیز است. نتایج نشان داد که حدود ۵۰ درصد منطقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد به وقوع فرسایش هزاردره دارد، بنابراین توجه به این پدیده و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری آن امری ضروری است.

## واژه‌های کلیدی: توپوگرافی، سازند، منحنی ROC، نقشه حساسیت‌پذیری، نسبت فراوانی

### مقدمه

پیش‌بینی می‌شود زمین تا سال ۲۰۵۰ به شهری تبدیل شود که دو سوم افراد در شهرها زندگی خواهند کرد. نرخ فعلی استفاده انسان‌ها از منابع موجود فشار زیادی بر منابع طبیعی جهان وارد می‌کند و در مرزهای محدود زمین ردپای فعلی انسان‌ها پایدار نخواهد بود (Hoekstra, 2014). در مقیاس جهانی، تخریب و فرسایش یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی است که مناظر را تغییر می‌دهد. فرسایش خاک اثرات درون‌منطقه‌ای و برون‌منطقه‌ای فراوانی را به‌همراه دارد (Das et al., 2023). فرسایش و هدررفت خاک معمولاً

مهم‌ترین موضوعات محیط‌زیستی جهان در حال حاضر فرسایش خاک، کیفیت آب، تغییرات اقلیم به‌دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی، تخریب سواحل دریاها و کاهش کیفیت زیستگاه‌ها است (van Wijk et al., 2022). فعالیت‌های انسانی از مهم‌ترین دلایل تغییرات محیطی بوده و نقش اساسی در گرمایش زمین، تخریب زمین، آلودگی آب و خاک، بالا رفتن سطح آب دریاها، تخریب لایه ازن، جنگل‌زدایی شدید و اسیدی کردن اقیانوس‌ها دارد (Gabriele et al., 2023).

مختلفی از جمله آماری، نظرات کارشناسی و ترکیبی برای بررسی ارتباط فرسایش و عوامل مؤثر بر آن و همچنین تهیه نقشه حساسیت‌پذیری برای انواع رخساره‌های فرسایشی طراحی و استفاده شده است (Botero-Acosta et al., 2017).

به‌عنوان مثال (Azareh et al., 2019)، نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش در استان ایلام را با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان و حداکثر انتروپی تهیه کردند. Tien Bui et al., (2019) فرسایش آب‌کندی در بخشی از استان کردستان را با استفاده از هوش مصنوعی بررسی کرده و این روش را به‌عنوان روشی مناسب برای بررسی فرسایش آب‌کندی معرفی نمودند. Lei et al., (2020) نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی در بخشی از ایران را با استفاده از روش‌های داده‌کاوی تهیه نمودند. Cantarino et al., (2023) حساسیت‌پذیری فرسایش توده‌ای و زمین‌لغزش را در بخشی از اسپانیا با استفاده از مدل نسبت فراوانی بررسی نمودند و نتایج بیانگر دقت قابل قبول این مدل بود.

Bisht et al., (2024) با استفاده از مدل نسبت فراوانی نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش در هند را تهیه و مدل نسبت فراوانی را به‌عنوان مدل مناسب معرفی نمودند. Mohammady and Davudirad, (2024) حوزه آبخیز شازند فرسایش آب‌کندی را با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد، ارتفاع و بارش از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آب‌کندی هستند.

در این پژوهش از روش نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری رخساره فرسایشی هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه استفاده شد. مهم‌ترین مزیت این مدل دقت قابل قبول این مدل با وجود سادگی انجام آن است که در بسیاری از پژوهش‌ها به آن اشاره شده است (Sahana et al., 2018, Liao and Carin, 2009).

حوزه آبخیز فیروزکوه به‌دلیل شرایط آب و هوایی و زمین‌شناسی بسیار مستعد فرسایش بوده و فرسایش هزاردره یکی از مهم‌ترین رخساره‌های فرسایشی در این منطقه است. تاکنون در این منطقه از روش آماری دومتغیره مانند نسبت فراوانی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره استفاده نشده است. با توجه به وجود نقشه پراکنش رخساره‌های هزاردره

در مناطق شیب‌دار اتفاق می‌افتد؛ اما شدت وقوع آن به عامل‌های محیط‌زیستی، از قبیل میزان شیب، ویژگی‌های زمین‌شناسی، وضعیت پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی دارد که باعث افزایش آسیب‌پذیری یک منطقه به فرسایش می‌شود. این موارد ممکن است با فعالیت‌های انسانی نیز هم‌افزایی داشته و شدت فرسایش بیش‌تر شود (Fadul et al., 1999).

یکی از مهم‌ترین رخساره‌های فرسایشی که در نتیجه تخریب زیاد خاک ایجاد می‌شود، رخساره هزاردره یا بدلدند است. رخساره فرسایشی هزاردره معمولاً به مناطق با رسوبات سست و غیرمتراکم، پوشش گیاهی بسیار ضعیف یا فاقد پوشش گیاهی که به‌دلیل تراکم بالای شیارها و بریدگی‌ها برای کشاورزی غیرقابل استفاده است اشاره می‌کند (Gallart et al., 2002). این رخساره فرسایشی در اقلیم‌های مختلف مشاهده می‌شود ولی بیش‌تر پراکنش آن مربوط به مناطق خشک و نیمه‌خشک است که شکل آنها در درجه اول به تغییرات فصلی ویژگی‌های اقلیمی بستگی دارد (Mohammady, 2023). در واقع برهم‌کنش بارش با مواد زمین‌شناسی سست بسیار مساعد ایجاد و گسترش رخساره هزاردره در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Imumorin and Azam, 2011).

ایران به‌دلیل شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک همواره با مشکل فرسایش مواجه است. بخش‌های زیادی از حوزه آبخیز فیروزکوه و به‌ویژه قسمت‌هایی که به استان سمنان ختم می‌شود، به‌دلیل سازندهای حساس به فرسایش دارای رخساره فرسایشی هزاردره است. این رخساره‌ها موجب تخریب و هدررفت خاک در محل برداشت و مشکلات دیگری در مناطق رسوب‌گذاری می‌شوند. با توجه به این شرایط، بررسی رخساره‌های فرسایشی موجود و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری وقوع هزاردره‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به این‌که فرسایش خاک یک فرایند بسیار پیچیده و تحت تأثیر ویژگی‌های سطح زمین، نوع خاک و دیگر عامل‌های محیط‌زیستی است، بررسی کمی و تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرسایش امری بحث‌برانگیز است (Alewell et al., 2019, Chakraborty and Chandra Pal, 2023). به همین دلیل مدل‌های

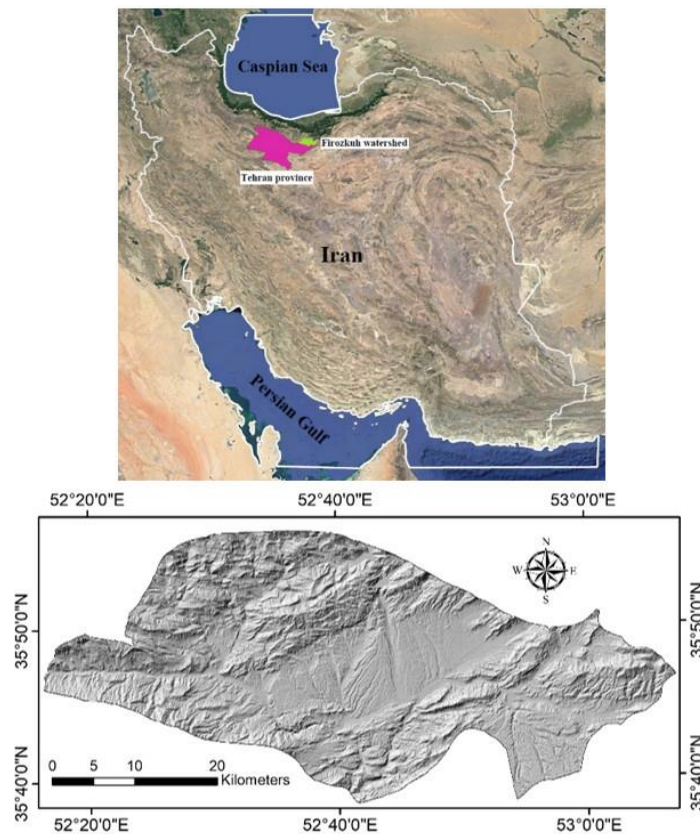
شمالی و طول‌های  $۵۲^{\circ} ۱۹'$  تا  $۵۳^{\circ} ۰۷'$  شرقی قرار گرفته است. ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه به ترتیب ۱۷۱۲ و ۳۹۴۱ متر از سطح دریا است.

کاربری‌های اصلی منطقه شامل مرتع، کشاورزی، مسکونی و زمین‌های بایر است. در حوزه آبخیز فیروزکوه، رخساره‌های هزاردره با شیب خیلی زیاد و دره‌های بریده بریده، مهم‌ترین رخساره فرسایشی بوده و نقش زیادی در تولید رسوب منطقه دارد. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان تهران و کشور را نشان می‌دهد.

انتظار می‌رود، دقت مدل‌های دو متغیره مانند نسبت فراوانی (که متکی به نقشه پراکنش رخساره هستند) قابل قبول باشد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** حوزه آبخیز فیروزکوه به دلیل وجود سازندهای ریزدانه و سست و همچنین بارش‌های فصلی شدید حساسیت زیادی به انواع فرسایش داشته و رخساره‌های فرسایشی هزاردره به وفور در آن مشاهده می‌شود. این حوضه در شرق استان تهران با مساحتی در حدود ۱۴۵۰ کیلومتر مربع واقع شده است. حوزه آبخیز فیروزکوه بین عرض‌های  $۳۵^{\circ} ۴۰'$  تا  $۳۵^{\circ} ۵۷'$

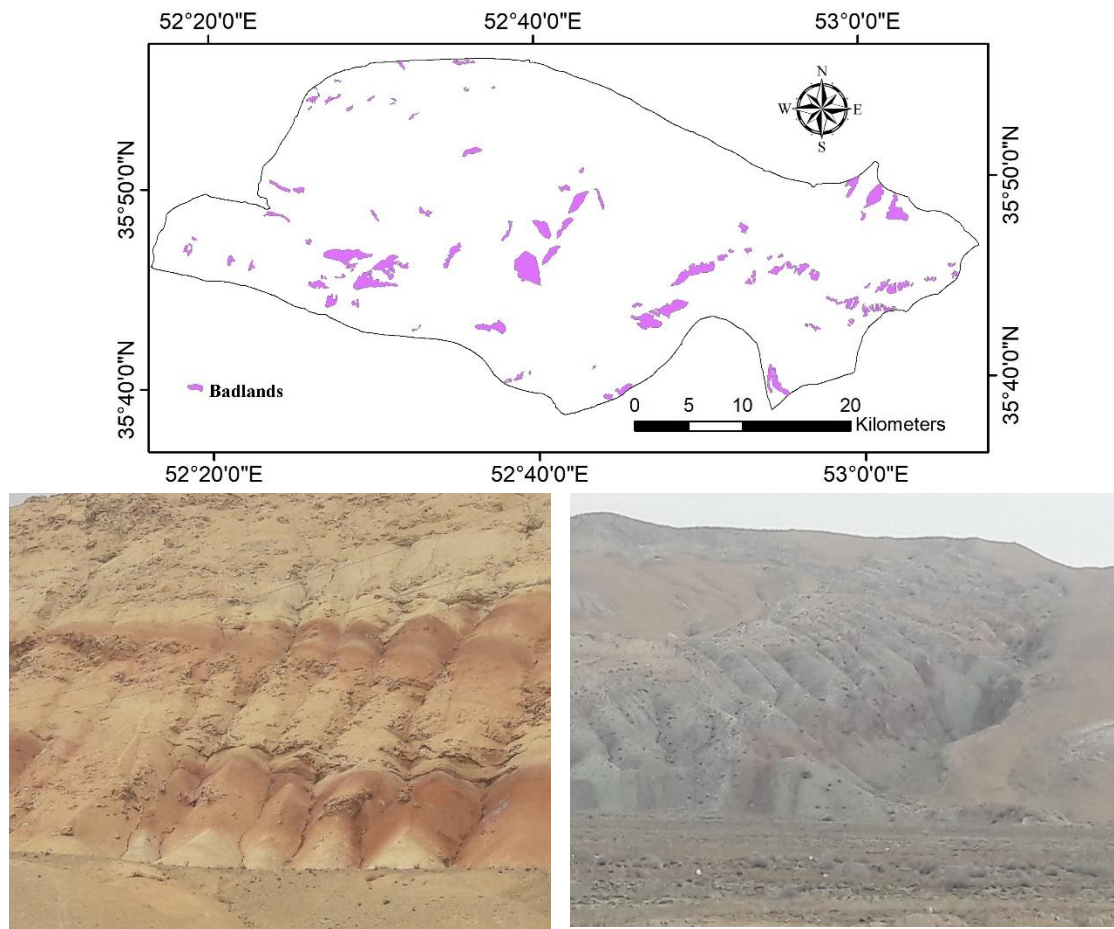


شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز فیروزکوه در استان تهران و ایران

Fig. 1. Location of the Firozkuh watershed in Tehran province and Iran

رخساره‌ها مشخص شد. به منظور تعیین محل دقیق رخساره‌ها و اطمینان از وجود آنها پیمایش زمینی در منطقه انجام شد. در کل منطقه ۱۱۵ پلی‌گون به‌عنوان محل هزاردره‌ها ثبت شد (شکل ۲).

تهیه نقشه پراکنش هزاردره: اولین گام در این پژوهش تهیه نقشه پراکنش رخساره‌های هزاردره و تعیین محل آنها روی نقشه است. به این منظور، با استفاده از گوگ ارث و تصاویر ماهواره‌ای موقعیت



شکل ۲- نقشه پراکنش و نمونه‌هایی از رخساره‌های فرسایش هزاردره در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2. Distribution map and sampels of badlands in the stud area

استخراج و رقومی شد. فاصله از این عوارض در محیط GIS تعیین شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در سال ۲۰۲۰ و با استفاده از روش ترکیبی در نرم‌افزار ENVI تهیه شد. ضریب کاپا و دقت کلی نقشه کاربری تهیه شده به ترتیب ۰/۹۵ و ۹۲ درصد به دست آمد. به منظور تهیه نقشه‌های مربوط به گروه هیدرولوژیک، درصد سیلت، درصد رس و pH خاک ۳۰ نمونه خاک در منطقه برداشت و در آزمایشگاه عامل‌های مذکور به دست آمد.

نقشه عمق خاک نیز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهران تهیه شد. داده‌های مربوط به هشت ایستگاه در یک دوره زمانی ۲۰ ساله داخل و اطراف حوضه تهیه و با درون‌یابی بارش به روش IDW نقشه نهایی میزان بارش در حوزه به دست آمد. انتخاب روش IDW به دلیل کارایی این روش حتی در صورت کم بودن ایستگاه‌های بارش است (Chen et al., 2022) شکل ۳، نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر را نشان

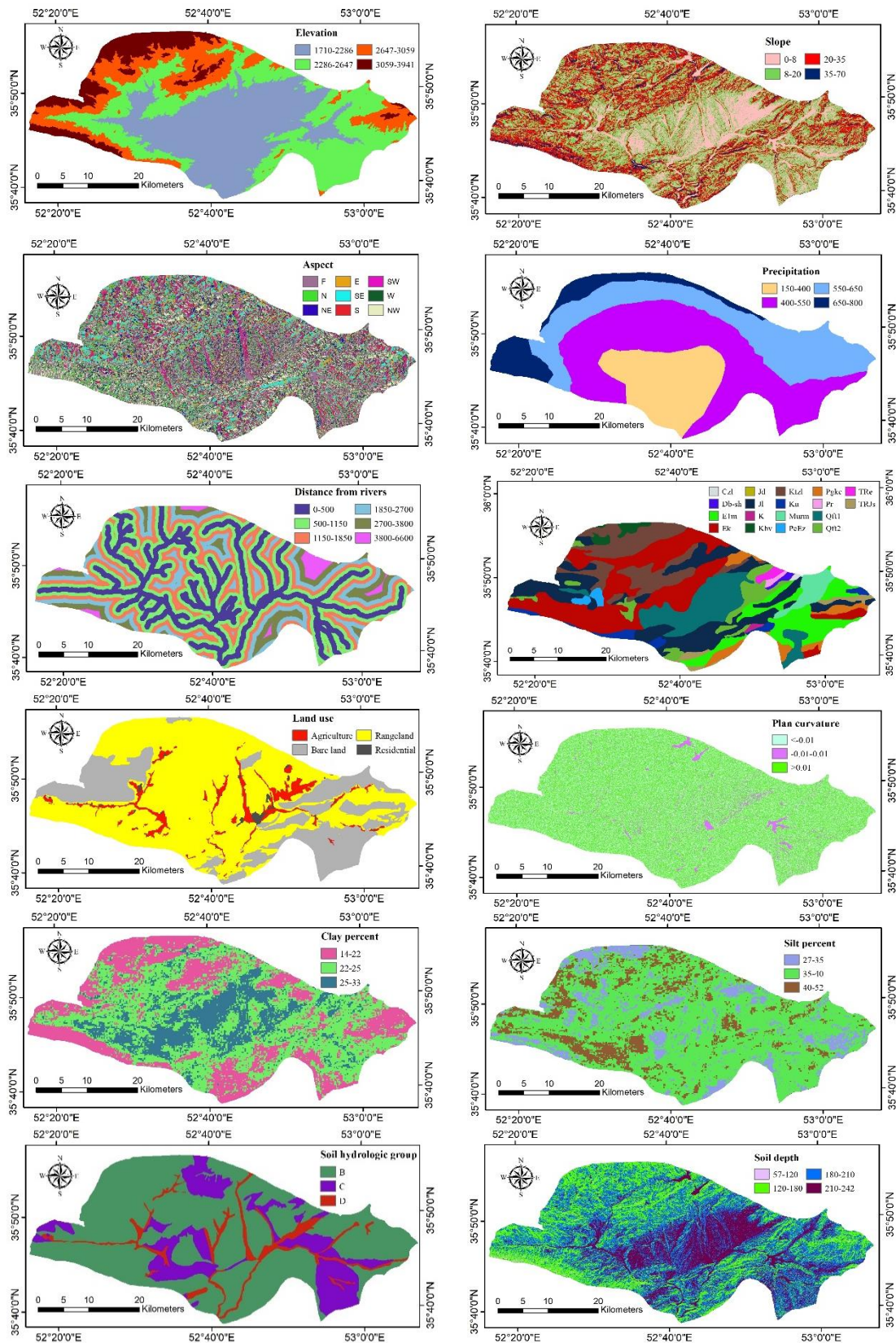
**عوامل مؤثر بر ایجاد رخساره هزاردره: عوامل مختلفی در وقوع فرسایش و ایجاد رخساره هزاردره نقش دارند که میزان اهمیت هر یک از عوامل در مناطق مختلف متفاوت است. در این پژوهش عوامل مؤثر با توجه به موجودیت داده‌ها و توجه به مرور منابع و به‌ویژه پژوهش‌های انجام شده در ایران انتخاب شد.**

ابتدا با استفاده از نقاط و خطوط ارتفاعی موجود در نقشه‌های توپوگرافی تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شد. نقشه‌های جهت شیب، درجه شیب، انحناء سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و طبقات ارتفاع با استفاده از نقشه DEM در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS با اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شد.

نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه و رقومی شد. نقشه شبکه آبراه‌ها و جاده‌ها از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰

درجه، عمق خاک بر حسب سانتی‌متر، میزان سیلت و رس بر حسب درصد است.

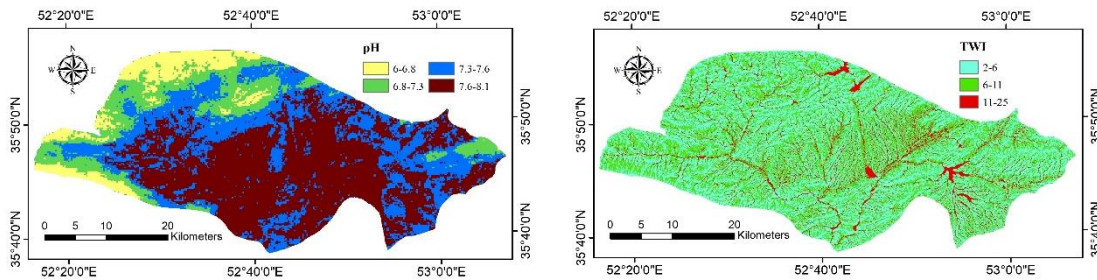
می‌دهد. در شکل ۳، واحد ارتفاع و فاصله از رودخانه بر حسب متر، بارندگی بر حسب میلی‌متر، شیب بر حسب



شکل ۳- نقشه‌های عوامل مؤثر در حوزه آبخیز فیروزکوه

Fig. 3. Conditioning factors maps in the Firozkuh Watershed





ادامه شکل ۳

Fig. 3. Continued

خوب (۰/۸-۰/۹)، خوب (۰/۷-۰/۸)، متوسط (۰/۷-۰/۸) و ضعیف (۰/۶-۰/۵) طبقه‌بندی می‌شود (Rasyid et al., 2016).

### نتایج و بحث

در اولین مرحله پراکنش رخساره‌های هزاردره در طبقات مختلف بررسی و بر اساس رابطه (۱) وزن‌ها به دست آمد. بررسی ارتباط هزاردره و طبقات ارتفاع نشان داد که بیش‌ترین پراکنش آنها در طبقه ۱۷۱۰ تا ۲۲۸۶ متر بوده و وزن نسبت فراوانی آن ۱/۴۵۴ به‌دست آمده است. به‌طور کلی ارتفاع از جمله عوامل مهم بر وقوع فرسایش بوده و در مطالعات دیگری از جمله Nhu et al. (2020) و Cama et al. (2020) به نقش مهم عامل ارتفاع بر وقوع فرسایش اشاره شده است.

ارتفاع بر فرایندهای هیدرولوژیکی خاک مؤثر بوده و از این طریق نیز در وقوع فرسایش نقش دارند. درجه حرارت، نوع بارش، میزان بارش و نوع کاربری اراضی تحت تأثیر تغییرات ارتفاع بوده و ارتفاع به این شکل نیز بر وقوع فرسایش مؤثر است (Mohammady et al., 2022). همچنین بررسی طبقات بارش نشان داد میزان بارش کم‌تر از ۵۵۰ بیش‌ترین وزن را داشته‌اند. بیش‌ترین وزن نسبت فراوانی مربوط به طبقه بارش ۴۰۰ تا ۵۵۰ بوده و برابر با ۱/۳۲۷ به‌دست آمد.

بارش و ارتفاع مستقیم با هم در ارتباط بوده و در ارتفاع بیش‌تر بارش نیز بیش‌تر بوده است. به‌دلیل افزایش پوشش گیاهی در بارش بیش‌تر معمولاً رخساره‌های فرسایشی کم‌تری مشاهده شده است که با توجه به نقش پوشش گیاهی در کنترل فرسایش امری طبیعی است. در بررسی طبقات شیب مشخص شد، بیش‌ترین وزن نسبت فراوانی مربوط به شیب بیش‌تر از ۳۵ و برابر با ۱/۳۰۳ است. رخساره هزاردره معمولاً در

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره: برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه از مدل نسبت فراوانی استفاده شد. نسبت فراوانی یک ارزیابی آماری بوده که به خوبی ارتباط متغیر وابسته و متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) را نشان می‌دهد. طبق رابطه ۱، می‌توان وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر را محاسبه کرد.

$$FR = \frac{Ac/Acf}{Pc/Pcf} = \frac{Cp}{CFp} \quad (1)$$

که در آن، Ac تعداد رخساره‌های هزاردره رخ داده در یک طبقه، Acf تعداد کل هزاردره‌های منطقه، Pc مساحت طبقه مورد نظر و Pcf مساحت کل منطقه است (Amponsah et al., 2023).

در مرحله بعد، پس از محاسبه وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر طبق رابطه (۱)، وزن‌ها در نقشه‌ها وارد می‌شود. درنهایت، همه نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و وزن نهایی در هر طبقه نقشه محاسبه می‌شود (Mohammady et al., 2012).

**ارزیابی دقت نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره:** به‌منظور ارزیابی دقت نقشه، از تعداد کل رخساره‌های هزاردره یک سوم آن در تهیه نقشه استفاده نشده و برای ارزیابی دقت استفاده می‌شود (Mohammady and Davudirad, 2024). برای ارزیابی دقت از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. این منحنی یک نمایش ترسیمی از موازنه بین میزان خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است (Nefeslioglu et al., 2008).

میزان سطح زیر منحنی بیانگر دقت مدل است، به طوری که هرچه سطح زیر منحنی بیش‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است و مقدار آن از ۰/۵ تا یک متغیر است. میزان سطح زیرمنحنی به‌صورت عالی (۰/۹-۱)، خیلی

کاربری اراضی نقش زیادی در وقوع و میزان فرسایش داشته و محققین دیگری از جمله Mekonnen et al., (2016) و Arabameri et al., (2019) و Mosavi et al., (2022) کاربری اراضی را به عنوان عاملی مهم در میزان فرسایش معرفی کردند. بررسی نقشه انحناء سطح نشان داد شیب‌های محذب و مقعر به ترتیب وزن‌های ۱/۰۴۴ و ۱/۰۱۲ داشته و وزن بیش‌تری نسبت به شیب‌های یکنواخت دارند. درصد سیلت و درصد رس با استفاده از نمونه‌های خاک در آزمایشگاه مشخص شد. بیش‌ترین وزن طبقه درصد رس مربوط به طبقه ۲۵ تا ۳۳ درصد و برابر با ۱/۳۴۹ بود. بین طبقات سیلت نیز بیش‌ترین وزن مربوط به طبقه ۲۷ تا ۳۵ و برابر با ۱/۰۶۵ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد، هرچه میزان سیلت کاهش و میزان رس افزایش یافته، حساسیت به تشکیل رخساره هزار دره نیز افزایش یافته است. رس‌های موجود در منطقه دارای املاح فراوان بوده و طبیعی است هرچه میزان رس با املاح فراوان بیش‌تر باشد، حساسیت به فرسایش افزایش می‌یابد. Azareh et al., (2019) نیز وجود رس در خاک را عامل مهمی در وقوع فرسایش در مناطق نیمه‌خشک ایران معرفی نمودند. بررسی دیگر ویژگی‌های خاک نشان داد گروه هیدرولوژیک C، عمق ۵۷ تا ۱۲۰ سانتی‌متر و اسیدیته ۷/۶ تا ۸/۱ به ترتیب با وزن‌های ۱/۲۰۷، ۱/۵۱۳ و ۱/۵۹۷ بیش‌ترین وزن را در بین طبقات این نقشه‌ها داشته است. در بین طبقات شاخص رطوبت توپوگرافی نیز طبقه ۶ تا ۱۱ بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص داده است.

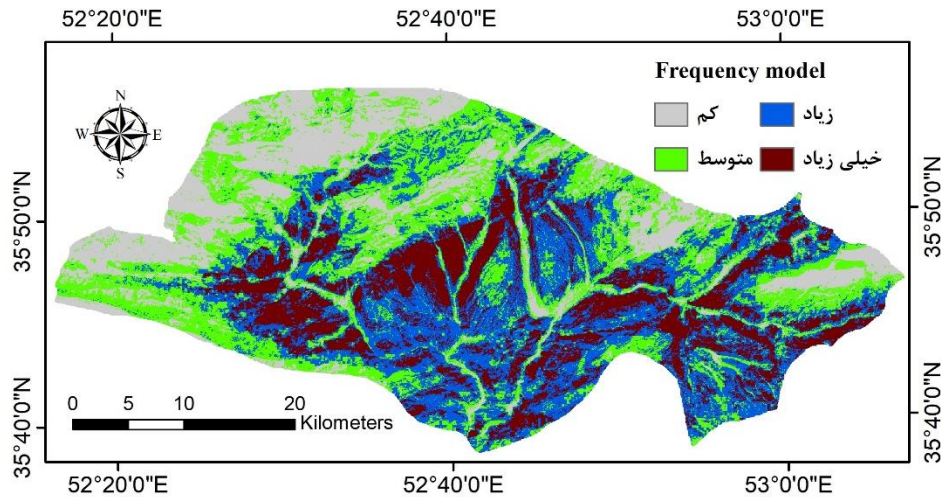
برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری رخساره فرسایشی هزاردره وزن‌های به دست آمده برای هر طبقه از نقشه عوامل مؤثر در نقشه وارد شد. سپس نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت به دست آمد. در نهایت، بر اساس روش شکستی طبیعی منحنی توزیع وزن‌ها، نقشه حساسیت به چهار طبقه تقسیم شد که در شکل ۴، نشان داده شده است (Mohammady et al., 2019).

شیب زیاد مشاهده می‌شود و در واقع هزاردره را رخساره شاخص شیب‌های بالا می‌دانند (Ranga et al., 2016). شیب زیاد موجب افزایش سرعت رواناب و در نتیجه برداشت بیش‌تر ذرات رسوبی می‌شود (Hembram et al., 2018). محققین دیگری نیز به نقش زیاد شیب در وقوع فرسایش اشاره کرده‌اند.

Clark and Rendell, (2006) فرسایش در قسمتی از ایتالیا را بررسی کرده و نتایج نشان داد رابطه مستقیمی بین شیب و میزان فرسایش وجود دارد. Guo et al., (2023) نیز در پژوهش خود شیب را به عنوان مهم‌ترین عامل توپوگرافی مؤثر بر وقوع فرسایش در بخشی از چین معرفی کردند. بررسی نقشه جهت جغرافیایی منطقه نشان داد، جهت شمال غرب و غرب با نسبت فراوانی ۱/۳۵۷ و ۱/۳۵۱ بیش‌ترین میزان هزاردره را داشته است.

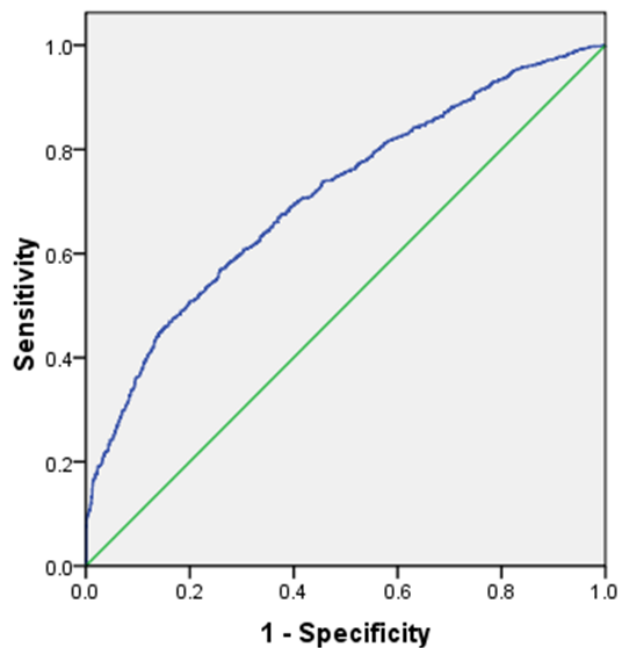
جهت شیب نقش مستقیم در دریافت تابش خورشیدی، میزان بارش و در نتیجه رطوبت داشته و به این شکل بر وقوع فرسایش مؤثر است. جهت‌های شمالی و غربی بارش بیشتر و تابش کمتری دریافت کرده و به دلیل وجود رطوبت بیشتر، انحلال و در نتیجه فرسایش در این جهت‌ها بیشتر خواهد بود (Wang et al., 2017). ارتباط وقوع هزاردره‌ها و شبکه آبراهه‌ای نشان داد، بیش‌ترین میزان این رخساره در فاصله کم‌تر از ۱۱۵۰ تشکیل شده است. شبکه آبراهه باعث تجمع بیش‌تر رواناب و به‌ویژه رواناب سطحی شده و فرسایش را افزایش می‌دهد.

در پژوهش Tien Bui et al., (2019) در بخشی از استان کردستان نیز شبکه زهکشی به عنوان یک عامل مهم در وقوع فرسایش معرفی شد. بیش‌ترین میزان هزاردره‌ها در سانداهای مارنی، آهکی و شیل‌ها رخ داده است که نقش زمین‌شناسی در وقوع این پدیده را نشان می‌دهد. Azareh et al., (2019) نیز بر نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی بر وقوع فرسایش که می‌تواند در توزیع اندازه مختلف ذرات موجود در خاک مرتبط باشد، تأکید کردند. بررسی ارتباط کاربری اراضی و هزاردره‌ها نشان داد، بیش‌ترین وزن نسبت فراوانی مربوط به کاربری مرتع و زمین‌های بایر به ترتیب برابر با ۱/۱۱۱ و ۰/۹۵۵ است.



شکل ۴- نقشه حساسیت فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه  
**Fig. 4.** Badland susceptibility map of Firozkuh Watershed

برای ارزیابی دقت مدل از سطح زیرمنحنی ROC استفاده شد. میزان سطح زیرمنحنی برای مدل نسبت فراوانی ۰/۷۱ به دست آمد که مدل را در طبقه خوب قرار می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵- منحنی تشخیص عملکرد نسبی برای مدل نسبت فراوانی  
**Fig. 5.** ROC curve of Frequency Ratio model

مدل نسبت فراوانی به دلیل ارائه دقت قابل قبول و همچنین سادگی روش کار در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال Asmare (2023)، از مدل نسبت فراوانی و AHP برای تحلیل خطر زمین‌لغزش در شمال غربی اتیوپی استفاده نموده و هر دو مدل را برای بررسی حساسیت زمین‌لغزش مناسب معرفی کردند. (Singh et al., 2023)

به طور کلی مدل نسبت فراوانی با وجود سادگی، به دلیل ایجاد ارتباط منطقی بین هزاردره‌ها و عوامل مؤثر بر آن نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند. مدل نسبت فراوانی به عنوان یکی از روش‌های قابل قبول برای بررسی ارتباط عوامل مؤثر و وقوع یک پدیده طبیعی شناخته می‌شود (Kannan et al., 2013).

### نتیجه‌گیری

به‌دلیل شرایط توپوگرافی، اقلیمی و زمین‌شناسی رخساره فرسایشی هزاردره یک پدیده غالب در حوزه آبخیز فیروزکوه است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی حساسیت‌پذیری حوزه آبخیز فیروزکوه به فرسایش هزاردره با استفاده از مدل نسبت فراوانی بود.

معمولاً زمانی که امکان ثبت رخساره‌ها و تهیه نقشه پراکنش وجود داشته باشد، مدل‌های دومتغیره مانند نسبت فراوانی کارایی خوبی داشته و به همین دلیل این مدل انتخاب شد. وزن طبقات مربوط به هر یک از عوامل مؤثر با استفاده از مدل نسبت فراوانی و بر اساس میزان حضور هزاردره‌ها در هر طبقه محاسبه شد. وزن‌ها با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره به‌دست آمد. برای ارزیابی دقت نقشه تهیه شده از منحنی ROC و سطح زیر این منحنی استفاده شد.

ارزیابی دقت نشان داد، مدل نسبت فراوانی یک مدل مناسب برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در این حوزه آبخیز است. مساحت هر یک از طبقات حساسیت‌پذیری محاسبه شد و نتایج نشان داد حدود ۵۰ درصد منطقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد به وقوع فرسایش هزاردره دارد. این درصد از مساحت بیانگر مستعد بودن منطقه به فرسایش هزاردره بوده و اهمیت پژوهش، این رخساره را نمایان می‌سازد. قبل از هر اقدام مدیریتی و کنترلی در منطقه نیاز است که مناطق با حساسیت و خطر بیشتر شناسایی شده و تمرکز فعالیت‌ها در این قسمت‌ها باشد.

با توجه به این شرایط توجه به این پدیده و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری آن برای کمک به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران در منطقه امری ضروری است. بدون شک شناسایی مناطق حساس به رخساره هزاردره، ابزار مفیدی در مدیریت منطقه و جلوگیری از تشدید این پدیده در منطقه خواهد بود. پیشنهاد می‌شود، مدل‌های دیگر نیز در منطقه استفاده شده و بهترین مدل برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری رخساره هزاردره در منطقه انتخاب شود.

همچنین، توصیه می‌شود، برای انجام هرگونه دست‌کاری در طبیعت و اقدامات توسعه‌ای به نقشه حساسیت‌پذیری این منطقه مراجعه شده تا از تحریک و تشدید این پدیده در منطقه جلوگیری شود.

نسبت فراوانی را یک مدل مناسب برای پیش‌بینی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در بخشی از هند بیان کردند. Zhang et al., (2024) نیز برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش از چند روش مختلف در بخشی از چین استفاده کرده و در نهایت، مدل نسبت فراوانی به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش معرفی شد.

Mohammady et al., (2024) از مدل نسبت فراوانی برای تهیه نقشه خطر فرورانش زمین در دشت سمنان استفاده نمودند. ارزیابی نتایج دقت مدل نشان داد، روش نسبت فراوانی برای بررسی خطر فرورانش زمین دقت قابل قبولی دارد. Arshad et al., (2020) برای بررسی مناطق مناسب تغذیه آب‌های زیرزمینی از روش نسبت فراوانی و مدل مبتنی بر نظرات کارشناسی در پاکستان استفاده کردند.

نتایج پژوهش ایشان نیز بیانگر دقت بالای مدل نسبت فراوانی بود. Sarkar and Mondal, (2020) نقشه خطر وقوع سیلاب را با استفاده از مدل نسبت فراوانی تهیه کرده و دقت این مدل را قابل قبول بیان کردند. Saleh e al., (2022) مدل نسبت فراوانی را مدلی مناسب برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری تند سیل‌ها معرفی نمودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل نسبت فراوانی در مطالعه بسیاری از پدیده‌های طبیعی استفاده شده و دقت قابل قبولی را ارائه کرده است که با نتایج این پژوهش نیز مطابقت دارد.

در محیط GIS مساحت مربوط به هر یک از طبقات حساسیت نیز محاسبه شد. مساحت طبقات با حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌ترتیب برابر با ۲۹۷، ۴۱۹، ۴۴۵ و ۲۸۲ کیلومتر مربع به‌دست آمد. مساحت طبقات نشان می‌دهد حدود ۵۰ درصد از مساحت منطقه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. این نتایج نشان می‌دهد به‌طور کلی منطقه پتانسیل زیادی برای وقوع و گسترش فرسایش و به‌ویژه رخساره فرسایشی هزاردره دارد. ویژگی‌های اقلیمی مانند بارش‌های فصلی شدید، سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش مانند مارن و شیل، توپوگرافی پیچیده و شیب‌های تند از عوامل اصلی وقوع این پدیده در حوزه آبخیز فیروزکوه است.

## تشکر و قدردانی

مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی بوده و این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی (پژوهانه) دانشگاه سمنان با شماره طرح ۱۴۰۲۴ ط/۱۴۰۳/۲۲۶ انجام شده است.

## تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

## منابع مورد استفاده

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P., 2019. Using the USLE: chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 7,203-225
- Amponsah, P.O., Forson, E.D., Sungzie, P.S., Akosuah Loh, Y.S., 2023. Groundwater prospectivity modeling over the Akatsi Districts in the Volta Region of Ghana using the frequency ratio technique. *Model. Earth Sys. Environ.* 9,937-955.
- Arabameri, A., Cerda, A., Rodrigo-Comino, J., Pradhan, B., Sohrabi, M., Blaschke, T., Tien, B.D., 2019. Proposing a novel predictive technique for gully erosion susceptibility mapping in arid and semiarid regions (Iran). *Remote Sens.* 11, 2577.
- Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., Dilawar, A., 2020. Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a gis-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: a case study from an agro-urban region of pakistan. *Geosci. Front.* 11(5),1805-1819
- Asmare, D., 2023. Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia. *Sci. African* 19, e01470.
- Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H., Ahmad, B., 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Sci. Total Environ.* 655,684-696
- Bisht, S., Rawat, K.S., Singh, S.K., 2024. Earth observation data and GIS based landslide susceptibility analysis through frequency ratio model in lesser Himalayan region, India. *Quarter. Sci. Advanc.* 13, 100141.
- Botero-Acosta, A., Chu, M.L., Guzman, J.A., Starks, P.J., Moriasi, D.N., 2017. Riparian erosion vulnerability model based on environmental features. *J. Environ. Manag.* 203,592-602
- Cama, M., Schillaci, C., Kropacek, J., Hochschild, V., Bosino, A., Marker, M., 2020. A probabilistic assessment of soil erosion susceptibility in a head catchment of the jemma basin. *Ethiop. Highl. Geosci.* 10(7), 248.
- Cantarino, I., Carrion, M.A., Martínez-Ibáñez, V., Gielen, E., 2023. Improving landslide susceptibility assessment through frequency ratio and classification methods-case study of Valencia region (Spain). *Appl. Sci.* 13 (8), 5146.
- Chakraborty, R., Chandra Pal, S., 2023. Modeling soil erosion susceptibility using GIS - based different machine learning algorithms in monsoon dominated diversified landscape in India. *Model. Earth Sys. Environ.* 9,2927-2942
- Chen, Y., Chen, W., Janizadeh, S., Bhunia, G.S., Bera, A., Pham, Q.B., Linh, N.T.T., Balogun, A., Wang, X., 2022. Deep learning and boosting framework for piping erosion susceptibility modeling: spatial evaluation of agricultural areas in the semi-arid region. *Geocarto. Int.* 37(16),1-28.
- Clarke, M.L., Rendell, H.M., 2006. Process-form relationships in Southern Italian badlands: Erosion rates and implications for landform evolution. *Earth Sur. Process. Landform.* 31, 15-29.
- Das, P., Saha, T.K., Mandal, I., Debanshi, S., Pal, S., 2023. Evolution of rills and gullies in lateritic badland region of Indian Rarh tract. *J. Earth Sys. Sci.* 132, 7
- Fadul, H.M., Salih, A.A., Imad-eldin, A.A., Inanaga, S., 1999. Use of remote sensing to map gully erosion along the Atbara River, Sudan. *Int. J. Applied Earth Observ. Geoinform.* 1(3),175-180.
- Gabriele, M., Brumana, R., Previtali, M., Cazzani, A., 2023. A combined GIS and remote sensing approach for monitoring climate change-related land degradation to support landscape preservation and planning tools: the Basilicata case study. *Applied Geomatics.* 15, 497-532
- Gallart, F., Sole, A., Puigdefàbregas, J., La´zaro, R., 2002. Badland systems in the Mediterranean. In: Bull LJ, Kirkby MJ (eds) *Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. Wiley, London. pp 299-326
- Ghosh, S., Bhattacharya, K., 2012. Multivariate erosion risk assessment of lateritic badlands of Birbhum (West Bengal, India): a case study. *J. Earth Syst. Sci.* 121 (6),1441-1454

- Guo, Z., Guo, F., Zhang, U., He, J., Li, G., Yang, Y., Zhang, X., 2023. A python system for regional landslide susceptibility assessment by integrating machine learning models and its application. *Heliyon*. 9, e21542.
- Hembram, K., Paul, G.C., Saha, S., 2018. Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: a comparison of information value and logistic regression models. *Model Earth Syst. Environ*. 5, 689-708
- Hoekstra, A.Y., Wiedmann, T.O., 2014. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Sci*. 344(6188), 1114-1117
- Imumorin, P., Azam, S., 2011. Effect of precipitation on the geological development of badlands in arid regions. *Bull. Eng. Geol. Environ*. 70, 223-229
- Kannan, M., Saranathan, E., Anabalagan, R., 2013. Landslide vulnerability mapping using frequency ratio model: a geospatial approach in Bodi-Bodimettu Ghat section, Theni district, Tamil Nadu, India. *Arabian J. Geosci*. 6(8), 2901-2913.
- Lei, X., Chen, W., Avand, M., Janizadeh, S., Kariminejad, N., Shahabi, H., Costache, R., Shahbi, H., Shirzadi, A., Mosavi, A., 2020. GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. *Remote Sens*. 12(15), 2478.
- Liao, X., Carin, L., 2009. Migratory logistic regression for learning concept drift between two data sets with application to UXO sensing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 47, 1454-1466
- Mekonnen, M., Keesstra, S.D., Baartman, J.E.M., Stroosnijder, L., Maroulis, J., 2016. Reducing sediment connectivity through manmade and natural sediment sinks in the Minizr catchment. Northwest Ethiopia. *Land Degrad. Develop*. 28, 708-717.
- Mohammady, M., 2024. Land subsidence susceptibility assessment in semnan plain. *Iran-Watershed Manage. And Sci. Engin*. 14(63), 84-91 (in Persian).
- Mohammady, M., Davudirad, A., 2024. Gully Erosion susceptibility assessment using different machine learning algorithms: a case study of Shazand Watershed in Iran. *Environ. Model. Assess*. 29, 249-261.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer and weights-of-evidence models. *J. Asian Earth Sci*. 61, 221-236.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Amiri, M., 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): a comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. *Nat. Hazards*. 99,951-971
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., 2022. Badland erosion mapping and effective factors on its occurrence using random forest model. *Computers Earth Environ. Sci*. 42, 577-583.
- Moretti, S., Rodolfi, G., 2000. A typical "calanchi" landscape on the Eastern Apennine margin (Atri, Central Italy): geomorphological features and evolution. *Catena*. 40, 217-228
- Mosavi, A., Golshan, M., Janizadeh, S., Chobin, B., Melesse, A.M., Dineva, A.A., 2022. Ensemble models of GLM, FDA, MARS, and RF for flood and erosion susceptibility mapping: a priority assessment of sub-basins. *Geocarto Int*. 37 (9), 2541-2560.
- Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J., 2019. Badland dynamics in the context of global change. Elsevier, Amsterdam. pp 277-313.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz, S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphol*. 94, 401-418.
- Nhu, V., Janizadeh, S., Avand, M., Chen, W., Farzin, M., Omidvar, E., Shirzadi, A., Shabani, H., Clague, J.J., Jaffari, A., Mansoorypoor, F., Pham, B.T., Ahmad, B.B., Lee, S., 2020. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison of computational ensemble data mining models. *Appl. Sci*. 10(6), 2039.
- Ranga, V., Poesen, J., Rompaey, A.V., Mohapatra, S.N., Pani, P., 2016. Detection and analysis of badlands dynamics in the Chambal river valley (India), during the last 40 (1971-2010) years. *Environ. Earth Sci*. 75, 183
- Rasyid, A.R., Bhandary, N.P., Yatabe, R., 2016. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain. *Indonesia Geoenviron. Disasters*. 3, 19.
- Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., Liu, J., Zhu, A., 2018. Assessing deforestation susceptibility to forest ecosystem in Rudraprayag district, India using fragmentation approach and frequency ratio model. *Sci. Total Environ*. 627, 1264-1275.
- Saleh, A., Yuzir, A., Sabtu, N., 2022. Flash flood susceptibility mapping of sungai pinang catchment using frequency ratio. *Sains. Malaysiana*. 51(1), 51-65.
- Sarkar, D., Mondal, P., 2020. Flood vulnerability mapping using frequency ratio (fr) model: a case study on kulik river basin, indobangladesh barind region. *Appl. Water Sci*. 10,1-13.

- Singh, P., Sur, U., Kumar Rai, P., Singh, S.K., 2023. Landslide susceptibility prediction using frequency ratio model: a case study of Uttarakhand, Himalaya (India). *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 89, 600-612
- Tien Bui, D., Shirzadi, A., Shabani, H., Chapi, K., Omidvar, E., Pham, B.T., Talebpour Asl, D., Khaledian, H., Pradhan, B., Panahi, M., Ahmad, B.B., Rahmani, H., Crof, G., Lee, S., 2019. A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). *Sensors* 19(11), 2444
- van Wijk, D., Teurlinx, S., Brederveld, R.J., 2022. Smart nutrient retention networks: a novel approach for nutrient conservation through water quality management. *Inland Waters* 12, 138-153.
- Wang, D., Fan, H., Fan, X., 2017. Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the black soil region of northeast China. *Environ. Monitor. Assess.* 189, 508.
- Zhang, A., Zhao, X.W., Zhao, X.Y., Zheng, X.Z., Zeng, M., Huang, X., Wu, P., Jiang, T., Wang, S.C., He, J., Li, Y.Y., 2024. Comparative study of different machine learning models in landslide susceptibility assessment: a case study of Conghua District, Guangzhou, China. *China Geology* 7, 104-115.