



Spatial Prediction of Gully Erosion Using TanDEM-X data an Maximum Entropy Model (A case study: Alamarvdasht watershed, in South of Fars Province)

Shima vosooghy¹, Reza zakerinejad^{2✉}, Mojgan Entezary³

1. Department of Geomorphology, Department of Natural Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran. E-mail: vosooghy11@gmail.com

2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Natural Geography, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran. E-mail: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Natural Geography, Department of Geomorphology, Department of Natural Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran. E-mail: entezary54@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received : 16 July 2023

Revised : 10 September 2023

Accepted : 18 December 2023

Published : 18 February 2025

Keywords:

Gully erosion,

TanDEM,

Alamarvdasht,

Maxent Model

Gully erosion is one of the most dangerous types of water erosion that destroys land and disrupts the balance of biological resources and the environment. In this study, the effective factors in gully erosion, prediction and zoning of gully erosion were investigated using the maximum entropy model in Alamarvdasht watershed in Fars province. First, the location of the ditches was prepared through field surveys, aerial photographs and using Google Earth software images, and then the digital layer of the ditches was prepared in point form in the GIS software environment, and in the next step, the basin's physiographic indicators was prepared from in ARC GIS software. In this research, a soil texture map was prepared in GIS software with field operations in the study area and soil sampling and testing, and a land use map and vegetation density was prepared using Landsat satellite images, and then each of the indicators was The ditches were added in the GIS environment. To implement the maximum entropy model, 70% of the data were used for model training and 30% for model testing. In this study, the effect of each other indicators was determined using the Jack Knife test, and finally the most effective indicators were introduced. In order to validate the model, the direction of zoning of gully erosion in the studied area was evaluated using curve (ROC) and area under the curve (AUC). The results of this research showed that climate index, slope, geology, land use, direction of slope and height are the most influential indicators in creating ditch erosion and the AUC=0.997 is at an excellent level.

Cite this article: vosooghy, Sh., zakerinejad, Reza., & Entezary, Mojgan. (2025). Spatial Prediction of Gully Erosion Using TanDEM-X data an Maximum Entropy Model (A case study: Alamarvdasht watershed, in South of Fars Province). *Journal of Geography and Planning*, 28 (90), 391-409.

<http://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169>



© The Author(s).

Publisher: University of Tabriz.

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169>

Introduction

Soil erosion is a global problem that seriously threatens water and soil resources. Among water, wind and glacial erosions, water erosion causes extensive damage every year around the world. Water erosion is divided into four groups according to the importance and method of formation, including splash erosion, sheet, rill and gully erosion. One of the most important types of water erosion is gully erosion which is a common phenomenon in the climate of arid and semi-arid regions, which affects large areas with different morphological, soil and climatic conditions. In fact, this type of erosion is of special importance due to the production of sediment and soil loss, as well as extensive damage to land, roads and structures. Therefore, to prevent the rapid growth of gullies or to minimize the damages caused by them, it is very important to know the morphology of a gully and how it is formed and the reasons for its growth. In fact, by identifying areas prone to gully erosion and identifying the factors affecting it, the risk of this erosion can be reduced. A large part of the southeastern regions of Fars province due to special topographic and geological conditions, have been affected by this type of water erosion. The main purpose of this study is to prepare a gully erosion susceptibility map using satellite data and using Maxent model to evaluate the ability of this model to predict gully erosion prone areas south of Fars province and from the functions of Lamard city and also to investigate the impact of each factor in this is the type of soil loss.

Data and Method

The study area is located in the Alamarvdasht watershed, in South of Fars Province in the Zagros Mountains (ZM) (51, 52' till 28, 53' E and 25, 27'-42, 27' N) and covering ca. 121100ha. In this research, we followed the subsequently mentioned working steps to predict the gully erosion susceptible: In the first step the locations of characteristic gullies were digitized using Google Earth (GE) images, aerial photos and fieldwork. Subsequently, we converted the polygons into equally spaced points, which are congruent with the raster cell centroids.

ii) In the second step we prepared the predictor variables that are driving the erosion processes. These continuous predictor variables include; Physiographic indices including; Physiographic indices including, elevation, topographic wetness index (TWI), distance from the river, Distance from the road, Aspect, slope, Climate, hillshade, Stream Power Index (SPI), were prepared in ARC GIS. Before applying the indices, the DEM was preprocessed with low pass filtering to extract artefacts and errors, like local noise and terraces using ArcGIS 10.8 (ESRI, 2010). Then, the DEM was hydrologically corrected eliminating sinks using the algorithm proposed by Planchon & Darboux (2001). The other applied indices in this research are including, geological maps, land use, morphology, soil texture, were prepared. In the last stage, after preparing all the effective indices (Independence layers) in the gully erosion of the region, the maximum entropy model was implemented.

Results and Discussion

The results of the applied model showed that more than 80% of the region located in the central and southeastern parts are in the high risk category. While low risk areas are located in the northern, eastern and western regions of the region. The numerical value of the index of the area under the curve (AUC) in this study is equal to 0.997, which indicates that the prediction of the model in the zoning of trench erosion areas is very high, or in other words, it can be said that the model is Goodness can distinguish different zones of gully erosion risk from each other. The results of this model showed that climate index has the most influence and importance, which is the most ditches in dry areas and the least erosion in semi-arid areas. The reason for this can be the lack of rainfall throughout the year as well as the torrential rains that occur in the fall and in the months of December and January, which can cause the surface soil of the region to be washed away and cause severe erosion. It is worth mentioning that the rainfall in the region has a direct impact on the climate of the region, as well as the erosion of the region and the increase of ditches

Conclusion

Gully erosion is common geomorphological problems in arid and semi-arid regions; therefore, it is essential to develop methods to predict it with simple but highly accurate models. In this research, the spatial prediction of gully erosion in the Alamarvdasht watershed in South Fars province was carried out by means of a stochastic model and a detailed terrain analysis as well as additional environmental variables. The validation of the Maxent model shows that the model prediction for gully is outstanding. Percentage of the important variables for prediction of gully erosion indicates that the most influential parameters on gully erosion in the study area are respectively Climate (39.6%), Slope (14.2%), Geology (12.5%), Land use (11.9%), Aspect (10%), DEM (6.5%)

respectively and the least effective parameters are NDVI(0.2%), Hillshade(0.1%), TWI(0.1%), SPI(0.1%) The simplicity and the relative low data requirements of the applied method allows an effective method also in other region.

پیش بینی فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و مدل های تغییر اقلیمی BCC-CSM2-MR برای سال های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز علامرودشت)

شیمای وثوقی^۱، رضا ذاکری نژاد^۲، مژگان انتظاری^۳

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: Email:vosooghy11@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه جغرافیای طبیعی، رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir
۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، رشته ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: entezary54@yahoo.com

اطلاعات مقاله چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، فرسایش خندقی، BCC-CSM2-MR، علامرودشت، مدل حداکثر آنتروپی

فرسایش خندقی یکی از مخاطره آمیز ترین انواع فرسایش آبی است که موجب تخریب اراضی و برهم خوردن تعادل منابع زیستی و محیط زیست می شود. تغییرات اقلیمی بر ویژگی های حوضه های آبخیز تأثیراتی به جا می گذارد که به نوبه خود به تغییر در فرسایش و رسوب حوضه منجر می شود. هدف این مطالعه تعیین عوامل موثر در فرسایش خندقی، پیش بینی و پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی می باشد. همچنین با تاکید بر نقش عامل فرساینده باران، با استفاده از داده های خروجی مدل BCC-CSM2-MR، گزارش ششم، سناریو ۱۲۶ به برآورد و پیش یابی تغییرات فرسایش خاک در حوضه آبخیز علامرودشت پرداخته شد. و در ادامه مدل حداکثر آنتروپی محاسبه و مدل برای سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ به منظور نیل به اهداف ارائه شده اجرا شد. ابتدا موقعیت خندق ها از طریق بررسی های میدانی، عکس های هوایی و با استفاده از تصاویر نرم افزار گوگل ارث تهیه گردید و سپس در محیط نرم افزار GIS لایه رقمی خندق ها نیز به صورت نقطه ای تهیه گردید، در مرحله بعدی شاخص های فیزیوگرافی حوضه در نرم افزار ARC GIS تهیه شد. در این تحقیق با عملیات میدانی در منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری از خاک و انجام آزمایش، نقشه بافت خاک در نرم افزار GIS و در ادامه نقشه کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست تهیه گردید و سپس هریک از شاخص ها در محیط GIS اضافه گردید. در این مطالعه با استفاده از آزمون جک نایف میزان تأثیر هر یک از شاخص ها بر دیگر شاخص ها مشخص شده که در نهایت تأثیرگذارترین شاخص ها معرفی شد. جهت اعتبار سنجی مدل پهنه بندی فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه از منحنی (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) استفاده شد. همچنین برای برآورد اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش منطقه ابتدا یک نقشه ماهانه با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و سپس یک نقشه متوسط ماهانه تهیه گردید که در این نقشه $AUC=0.833$ و همچنین چهار نقشه برای چهار فصل سال تهیه گردید نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که در فصل پاییز فرسایش بسیار شدیدتر از فصل های دیگر است که با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز و در ماه های آذر و دی بارندگی بسیار شدید و به صورت سیلابی رخ می دهد نتایج مدل با اطلاعات منطقه همخوانی دارد و این نشان دهنده دقت بالای مدل حداکثر آنتروپی است. همچنین شاخص های اقلیم، شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، جهت شیب و ارتفاع تأثیرگذارترین شاخص ها در ایجاد فرسایش خندقی است و میزان $AUC=0.997$ برای آموزش و اجرای مدل در سطح عالی است.

استناد: وثوقی، شیمای؛ ذاکری نژاد، رضا؛ و انتظاری، مژگان (۱۴۰۳). پیش بینی فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و مدل های تغییر اقلیمی BCC-CSM2-MR برای سال های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز علامرودشت). *جغرافیا و برنامه ریزی*، ۲۸ (۹۰)، ۳۹۱-۴۰۹.

<http://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

فرسایش خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سرزمین و بیابان زایی در بسیاری از مناطق خصوصاً نواحی خشک و نیمه خشک می‌باش (Masoudi & Zakerinejad 2011; Zakerinejad & Masoudi, 2020). این نوع از هدر رفت خاک، فرآیند پیچیده‌ای است که از اثر متقابل خاک، اقلیم، توپوگرافی، پوشش سطحی و کاربری زمین حاصل می‌شود (زارع و همکاران، ۱۳۹۵). از میان فرسایش‌های آبی، بادی و یخچالی، فرسایش ناشی از آب هر ساله خسارات گسترده‌ای را در سراسر جهان وارد می‌کند. فرسایش آبی با توجه به اهمیت و نحوه شکل‌گیری به چهار گروه شامل فرسایش پاشمانی، آبراهه‌ای، شیاری و آبکندی (خندقی) تقسیم می‌شود (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۴) که فرسایش آبکندی (گالی زایی) پدیده‌ای معمول در آب و هوای مناطق مختلف خصوصاً نواحی خشک و نیمه خشک است که مناطق وسیعی با شرایط مورفولوژیکی، خاک شناسی و آب و هوایی متفاوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zakerinejad & Mearker, 2014; غلامی و همکاران، ۱۳۹۶). فرسایش آبی یکی از مهمترین نشانه‌های برهنگی محیطی است و نوع تشدید شده آن در محیط‌های نیمه خشک به صورت شیارهای متراکم و خندق‌های عمیق خودنمایی می‌کند (بیاتی خطیبی، ۱۳۹۰) در واقع این نوع فرسایش هر چند مساحت کمتری نسبت به سایر اشکال فرسایش آبی را در بر می‌گیرد ولی به دلیل تولید رسوب بیشتر و از دست رفتن خاک موجب خسارات فراوان به اراضی، راه‌ها و سازه‌های عمرانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Poesen et al, 2003; Valentin et al, 2016 نیک‌پور و همکاران، ۱۳۹۵) از این رو برای جلوگیری از رشد سریع خندق‌ها یا به حداقل رساندن خسارت ناشی از آنها با استفاده از پهنه بندی نقشه خطر و شناسایی عوامل مؤثر بر آن می‌توان خطر وقوع این فرسایش را کاهش داد (طهماسبی پور و همکاران، ۱۳۹۴؛ ذاکری نژاد، ۱۳۹۹) لذا لزوم بررسی و مطالعه این فرسایش و دلیل ایجاد و تعیین عوامل مؤثر، ضروری است (بشارتی و همکاران، ۱۳۹۷).

مبانی نظری

در بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی و زمین لغزش با استفاده از روش‌هایی از جمله تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مدل فازی استفاده شده که کارایی این مدل‌ها را در پهنه بندی این نوع فرسایش‌ها نشان می‌دهد (Dhianaufal et al, 2018; Zakerinejad et al., 2021; Zhu et al, 2014; حبیبی، ۱۳۹۶) ولی اخیراً در تحقیقی که با استفاده مدل حداکثر آنتروپی^۱ برای اولین بار جهت تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی و به کارگیری شاخص‌های توپوگرافی در حوضه آبخیز مزایجان استان فارس انجام گرفت، که نتایج پژوهش بیانگر دقت بالای این مدل در پهنه بندی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی را نشان داد و مزیتی که این مدل در ارائه نمودن صحت پیش‌بینی برای ارزیابی نقشه تولید شده را دارد (Zakerinejad & Maerker, 2014). در مطالعه‌ای دیگر که توسط ابراهیم و همکاران در سال (۲۰۱۸) انجام گردید، به بررسی توان مدل‌های وزن شواهد^۲ و نسبت فراوانی^۳ جهت پیش‌بینی مکانی حساسیت به فرسایش خندقی و توصیف شرایط حساسیت در حوضه سنگان کلات صورت گرفت که نتایج نشان داد، نقشه حساسیت به فرسایش تولید شده توسط مدل نسبت فراوانی (AUC-۸۶/۳۲) در پیش‌بینی نسبت به مدل وزن شواهد (AUC-۷۳/۴۹) عملکرد بهتری در پیش‌بینی داشته است. استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک نیز در تهیه نقشه خطر این نوع از فرسایش آبی صورت گرفته از جمله مطالعه‌ای که در منطقه صلوات آباد استان کردستان انجام شد که در این پژوهش از متغیرهایی همچون لیتولوژی، کاربری ارضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی مشتمل بر شیب، جهت دامنه، شکل دامنه، شاخص قدرت رود و شاخص رطوبت توپوگرافی استفاده کرده‌اند. نتایج

¹ Maxent

² WOFE

³ FR

حاصل این تحقیق نشان داده که مساحت زیر منحنی (AUC-۷۹) است، که نشان دهنده تطبیق خوب مدل جهت پیش بینی نقاط حساس به فرسایش خندقی در منطقه است (Ismailie et al, 2014). در مطالعه‌ای دیگر که در دشت قهاوند همدان صورت گرفت پهنه‌بندی فرسایش بادی براساس مدل IRIFR.E.A انجام گرفت که ابتدا هفت واحد کاری ژئومورفولوژی براساس ویژگی های زمین‌شناسی، خاکشناسی، پوشش گیاهی و آب و هواشناسی کاربری اراضی تعیین گردید سپس عوامل ۹ گانه موثر در فرسایش بادی بر پایه مدل مذکور در هفت واحد کاری ژئومورفولوژی ارزش‌گذاری و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین امتیاز مربوط به تغییر کاربری اراضی و پهنه های نمکی ریز دانه یا پف کرده می باشد و کمترین امتیاز مربوط به اراضی روستا بوده است. همچنین نتایج نشان داد که ۷/۰۴ منطقه در کلاس فرسایشی کم و ۲۳/۵۹ درصد در کلاس فرسایشی متوسط و ۶۹/۳۵ درصد در کلاس فرسایشی شدید و خیلی شدید قرار دارد (ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۶). هر یک از تحقیقات ذکر شده از عوامل و شاخص های فراوانی در پهنه بندی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی استفاده شده ولی شاخص های توپوگرافی منطقه از عوامل تأثیرگذار در ایجاد این نوع از فرسایش آبی است، که در هر منطقه با توجه به ویژگی های فیزیکی منطقه منحصر به فرد عمل می کند. این پارامتر در واقع به صورت غیرمستقیم بر دیگر شاخصها و یا معیارها تأثیرگذار است (Nazari Samani et al, 2009; Zakerinejad et al, 2018; Zakerinejad & Maerker 2014) در مطالعه ای که در این راستا به ارزیابی نقش شاخص های توپوگرافی و استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه الوند در استان کرمانشاه پرداخته شد، نتایج این تحقیق نشان داد است که مؤثرترین شاخص در ایجاد فرسایش خندقی مربوط به شاخص ارتفاع، فاصله عمودی از سطح کانال و تجمع جریان است. همچنین شاخص سطح زیر منحنی جهت اعتبار سنجی مدل ۸۹/۹٪ بوده که سطح خوب نتایج را نشان داده است (پیروزی نژاد، ۱۳۹۶)، همچنین در یک مطالعه جدید که به بررسی نقشه حساسیت فرسایش خندقی حوضه سمیرم در جنوب استان اصفهان با استفاده از شاخص های توپوگرافی مؤثر و با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی انجام شد نشان داد که بیشترین سهم مشارکت در مدل مذکور به ترتیب مربوط به شاخص قدرت فرساینده‌گی (۴۰/۳٪) شاخص ارتفاع (۲۲/۷٪) و شاخص همگرایی (۱۸٪) است و همچنین شاخص قدرت جریان با توجه شرایط فیزیکی شبکه آبراهه و گسترش تراکم بالایی انشعابات باعث شده است نسبت به دیگر شاخص ها در ایجاد فرسایش خندقی اهمیت بیشتری در این منطقه داشته است (ذاکری نژاد، ۱۳۹۹). در مطالعه ای که به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش و هدررفت خاک حوضه آبخیز میناب پرداخته شد از داده های خروجی دو مدل BCC-CSM2-MR و CanESM5. گزارش پنجم، سناریو های ۲/۶، ۴/۵، ۸/۵ و مدل RUSLE محاسبه و مدل برای سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ اجرا شد در این پژوهش از داده های واقعی و معیار های RMSE و MAE به ارزیابی خطای مدل ها و سناریوها پرداخته شد نتایج نشان داد که میانگین لایه فرساینده‌گی باران از ۴۱/۵۷ در سال ۲۰۱۰ به ۵۲/۰۱ در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است و خروجی دو مدل نیز از افزایش میزان فرساینده‌گی بارش در سال ۲۰۴۰ حکایت داشت (میرزاده کوهشاهی و همکاران، ۱۴۰۱). در مطالعه‌ای جدید به توزیع فضایی فرسایش آبی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در جنوب استان اصفهان پرداخته شد در این مدل از لایه‌های زیست‌محیطی سنگ‌شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، بارش، شاخص پوشش گیاهی با تفاوت نرمال شده استفاده گردید. پیش‌بینی فضایی حساسیت‌ها برای فرسایش رودخانه‌ای، خندقی و بدلند نشان داد که در مجموع بیش از ۴۰ درصد از منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فرآیندهای فرسایش آبی ۴/۸ درصد فرسایش رودخانه‌ای، ۲۳/۴ درصد فرسایش خندقی و ۱۷/۹ درصد فرسایش بدلند قرار دارد (Zakerinejad et al, 2021). در مطالعه جدید دیگری به ارزیابی آسیب‌پذیری فرسایش خندقی، برآورد از دست دادن خاک لس و ارزیابی مورفولوژی خندق‌ها در بخش کراتونی شرق هند پرداخته شد این مطالعه در زمین‌های لاتریتی حوضه روپای حاشیه فلات شرقی هند، که در آن فرسایش آبی یک نگرانی جدی است، انجام گرفت. در این پژوهش از مدل فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی^۱ همراه با فناوری

^۱ AHP

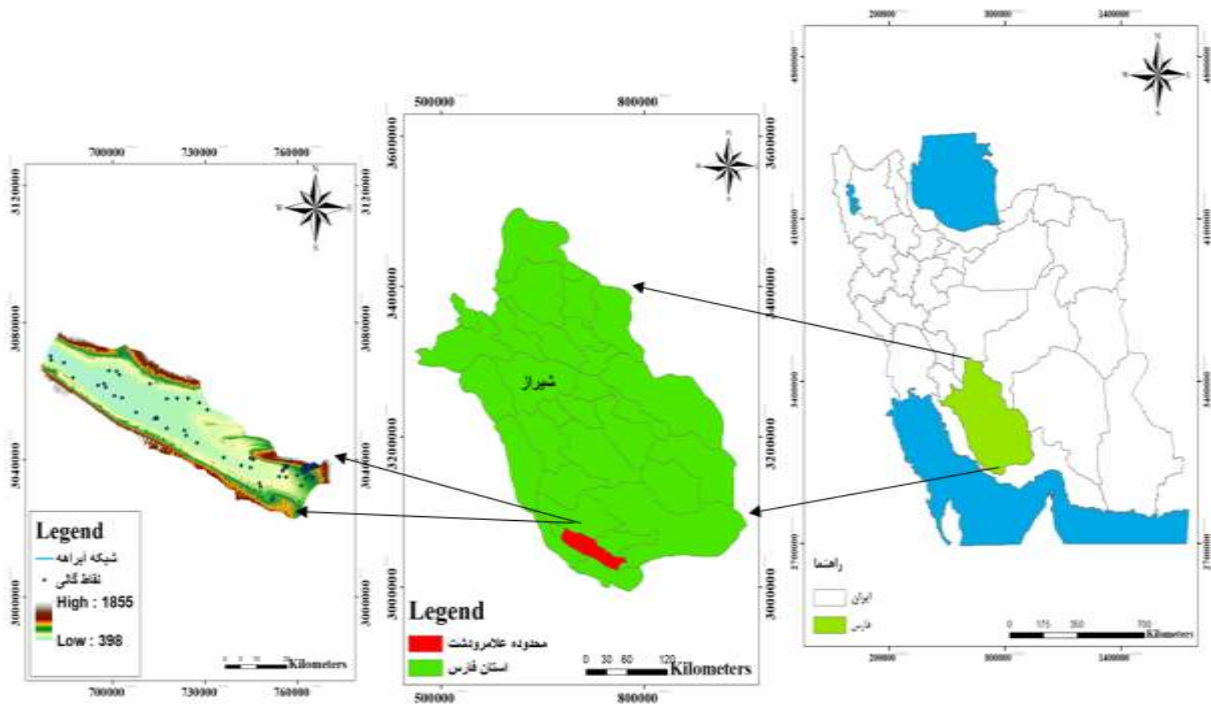
مکانی با در نظر گرفتن سیزده عامل بیوفیزیکی استفاده گردید. نتایج نشان داد که حدود ۴۹ درصد از مساحت حوضه مربوط به منطقه آسیب پذیری فرسایش خندقی بالا تا بسیار زیاد و به دنبال آن منطقه با خطر متوسط ۳۱٫۶۴ درصد است. همچنین در این پژوهش مدل معادله جهانی تلفات خاک^۱ تجدید نظر شده با فناوری مکانی نشان داد که میانگین تلفات تخمینی خاک حوضه از ۱۵ تا ۴۳۱ تن در هکتار در ۱ سال متغیر است حدود ۲۹ درصد از منطقه مورد مطالعه خطر فرسایش خاک بالا تا بسیار زیاد (۵۷) تا بیشتر از ۱۴۷ تن در هکتار) و ۶۸ درصد از منطقه سطح پایینی از خطر فرسایش خاک را تحمل می‌کند (کمتر از ۱۵ تن در هکتار در ۱ سال) همچنین مطالعه مورفولوژی خندق‌ها عمق خندق‌ها را از ۱ تا ۵ متر نشان داد (Modak et al, 2022).

با توجه به اینکه بخش وسیعی از مناطق جنوب استان فارس به دلیل شرایط خاص اقلیمی، توپوگرافی و زمین‌شناسی، تحت تأثیر این نوع از فرسایش آبی قرار گرفته‌اند، هدف اصلی این پژوهش نیز تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای خصوصاً مدل رقومی ارتفاعی با دقت بالا همچنین به کارگیری مدل مکسنت جهت ارزیابی توانایی این مدل در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی جنوب استان فارس (حوضه آبخیز علامرودشت) و همچنین بررسی میزان تأثیر هریک از عوامل تأثیرگذار در این نوع فرسایش است. این مطالعه اولین تحقیق در زمینه کاربرد مدل آماری حداکثر آنتروپی در مناطق جنوبی ایران با تأکید بر اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش منطقه است و به عنوان یک روش جدید جهت تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس است.

داده‌ها و روش‌ها

محدوده علامرودشت در شهرستان لامرد در مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه و ۷۲ ثانیه تا ۲۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۶۱ ثانیه طول شرقی و ۲۵ درجه و ۲۷ دقیقه و ۱۵ ثانیه تا ۴۲ درجه و ۲۷ دقیقه و ۹۲ ثانیه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه تا مرکز شهرستان شهر لامرد ۳۰ کیلومتر فاصله داشته و فاصله آن تا شیراز مرکز استان بالغ بر ۳۶۰ کیلومتر است تمامی راه‌های دسترسی به منطقه آسفالتی می‌باشد ضلع شمالی محدوده را رودخانه فصلی علامرودشت تشکیل می‌دهد که جهت شرق به غرب دارد و در قسمتهای مختلف دارای عرض‌های متغیر است. منطقه مورد مطالعه دارای ۱۲۱۱۰۰ هکتار مساحت است که اراضی جنوب شرق تا جنوب غرب رودخانه علامرودشت را تشکیل می‌دهد و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۴۳۰ متر است. مرتفع‌ترین نقطه بخش مورد مطالعه با ۱۸۱۹ متر ارتفاع در کوه نر در جنوب منطقه و پست‌ترین نقطه محدوده مورد مطالعه نیز با ارتفاع ۳۶۴ متر در شمال غرب دشت واقع گردیده است. جمعیت بخش علامرودشت حدود ۱۵۰۶۶ نفر است. این بخش شامل دو دهستان علامرودشت و خیرگو، یک مرکز شهری (شهر علامرودشت) است و دارای ۴۸ آبادی است که تعداد ۳۳ آبادی آن بالای بیست خانوار و تعداد ۱۵ آبادی آن هم کمتر از بیست خانوار جمعیت دارد. میانگین بارندگی سالانه این بخش ۲۶۸ میلی‌لیتر و میانگین دمای سالانه ۲۴٫۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. محدوده مورد مطالعه از دو واحد ژئومورفولوژی به نام‌های کوهستان و دشت‌سر تشکیل شده است. (شکل ۱ و ۲)

¹ RUSLE



شکل ۱: نقشه موقعیت و نقاط گالی های منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: نمونه ای از فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، هدف پیش بینی فرسایش خندقی حوضه آبریز علارودشت با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی یا به اختصار مکسنت است و همچنین پیش بینی اثر تغییرات اقلیمی با استفاده از داده های بارش مستخرج از مدل ها و سناریوهای مختلف اقلیمی است. داده های اقلیمی مربوط به دوره زمانی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) است. مدل حداکثر آنتروپی یکی از فناوری های ماشین یادگیری است که قابلیت پیش بینی مکانی بالایی در زمینه های مختلف علوم محیطی دارد (Philips et al, 2006). مدل حداکثر آنتروپی براساس اصل آنتروپی شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به دست می آید (ذاکری نژاد، ۱۳۹۹). برای ارزیابی عوامل زیست محیطی مؤثر در فرسایش خندقی، از توزیع مکانی خندقها استفاده می شود و با استفاده از آزمون آجک نیف اهمیت هریک از لایه های زیست محیطی در ایجاد فرسایش خندقی را بررسی می کند. همچنین برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص زیر منحنی (AUC) برای منحنی

¹ Maximum Entropy Model

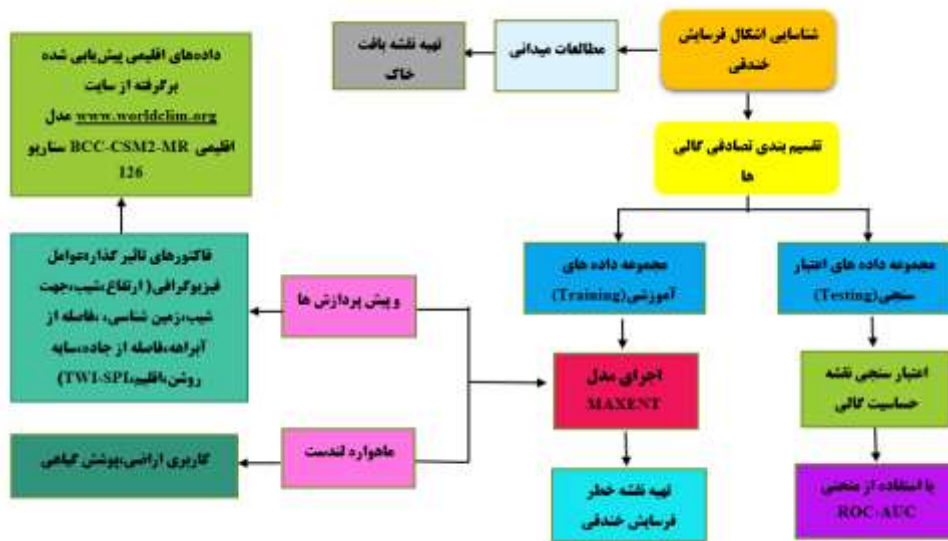
² MLTS

³ jackknife

ROC استفاده شد. چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۹۰٪ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار عالی در نظر گرفته می‌شود (Hosmer & Lemeshow, 2000). در شکل ۲ مراحل انجام روش تحقیق آورده شده است. در این پژوهش مدل حداکثر آنتروپی در دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ برای یک دوره ماهانه و یک دوره فصلی اجرا شد تا تغییرات فرسایش در حوضه علامرودشت مشخص شود. جهت اجرای مدل مورد استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون مدل استفاده شده است. ابتدا موقعیت خندقها از طریق بررسی‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای و عکسهای هوایی با استفاده از نرم افزار گوگل ارث ثبت گردیده و سپس نقشه‌های فیزیوگرافی ارتفاع، شیب، جهت شیب، توپوگرافی، بافت خاک، همگرایی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، زمین شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، شاخص بارش استاندارد؛ شاخص رطوبت توپوگرافی؛ در نرم افزار ARC GIS 10.8 تهیه شد. قبل از تهیه شاخص‌های توپوگرافی مورد نظر خطاهای هیدرولوژیکی موجود در مدل رقومی ارتفاع در محیط SAGA-GIS 9.0.1 حذف گردید و نقشه پارامترهای پوشش گیاهی و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۱ در نرم افزار ARC GIS 10.8 تهیه گردید. نقشه شاخص‌های خاکشناسی (بافت خاک) که از نمونه‌های جمع‌آوری شده از خاک سطحی منطقه صورت گرفت به روش هیدرومتری در آزمایشگاه آب و خاک دانشگاه اصفهان و زمین شناسی (سازمان زمین شناسی کشور، ۱:۱۰۰۰۰۰) در محیط نرم افزار ARC GIS 10.8 تهیه گردید (جدول ۲ و شکل ۳ و ۴). داده‌های بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی داخل و اطراف حوضه از وبسایت‌های مختلف اخذ داده www.worldclim.org استخراج شد. برای سالهای ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ از مدل تغییر اقلیم BCC-CSM2-MR براساس گزارش ششم در سناریو ۱۲۶ استفاده شد. داده‌ها و پیش‌یابی‌های این مدل در سایت www.worldclim.org برای کل جهان قابل دسترس است. در این پژوهش، داده‌های بارش پیش‌یابی شده‌ی این مدل در سناریو ۲/۶ و با دقت ۲/۵ دقیقه، برای ماه‌های مختلف سال دریافت شد. فرمت اولیه داده‌ها Netcdf است. برای تبدیل به رستر نیز از نرم‌افزار (ARC GIS 10.8) استفاده گردید. با در دسترس بودن لایه‌های رستری بارش این داده‌ها برای فصل‌های مختلف نیز تقسیم بندی گردید و در نهایت یک نقشه ماهانه و چهار نقشه فصلی تهیه شد در تمامی نقشه‌ها از سناریو ۱۲۶ استفاده گردید. (شکل ۵) اساس انتخاب فاکتورهای مورد بررسی مطالعات گوناگون دیگر پژوهشگران که درباره فرسایش خندقی در نقاط متفاوت جهان صورت گرفته می‌باشد (MEhiorobo & Audu, 2012; Maerker et al, 2015; Qin et al, 2011; Rahimifar et al, 2011; Rahmati et al, 2017; Shit et al, 2013). در ادامه این تحقیق با وارد کردن لایه‌های ذکر شده با فرمت ASCII به عنوان متغیر مستقل و نقاط فرسایش خندقی به عنوان متغیر وابسته در نرم افزار مسکن، مدل مربوطه اجرا گردید.

¹ SPI

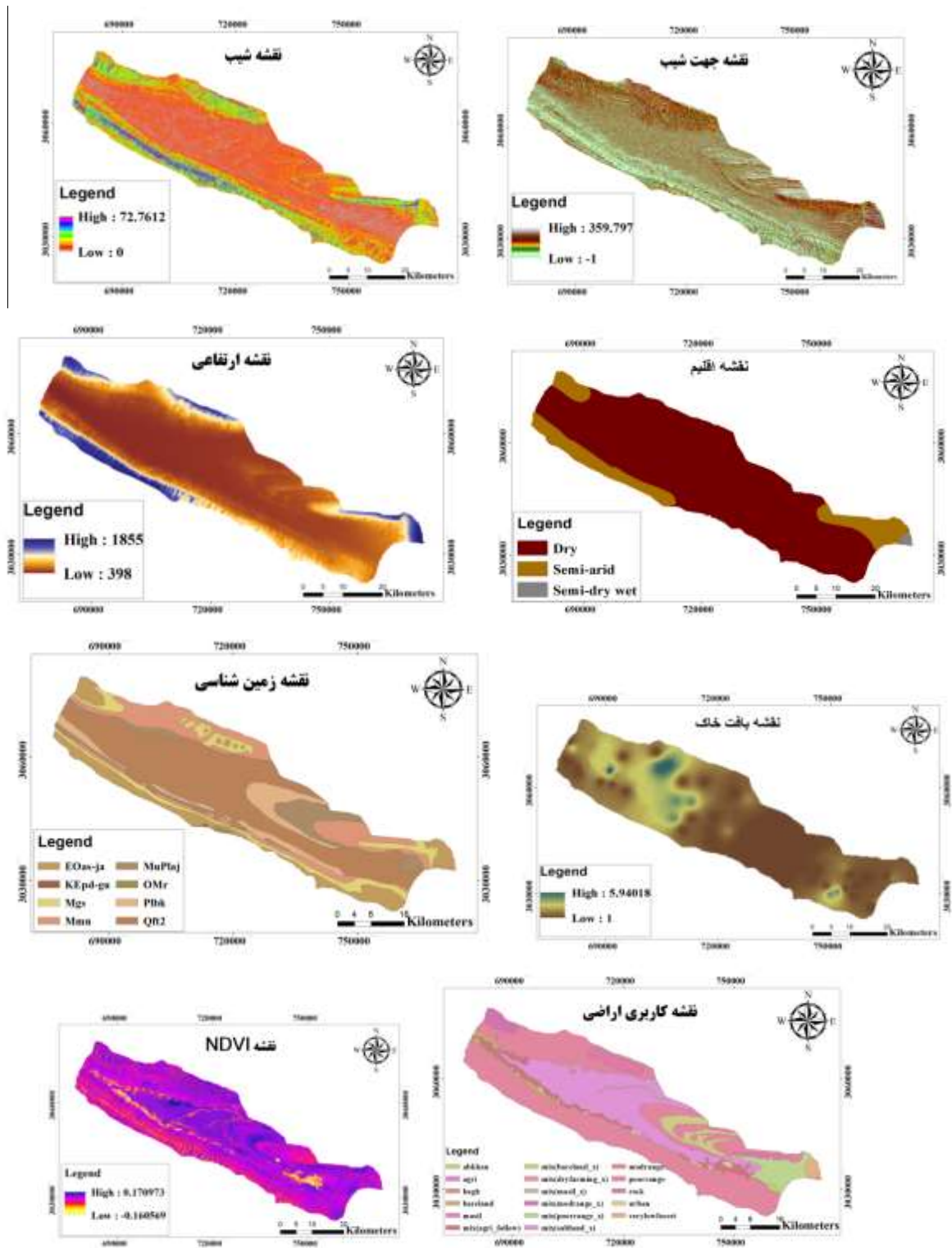
² TWI

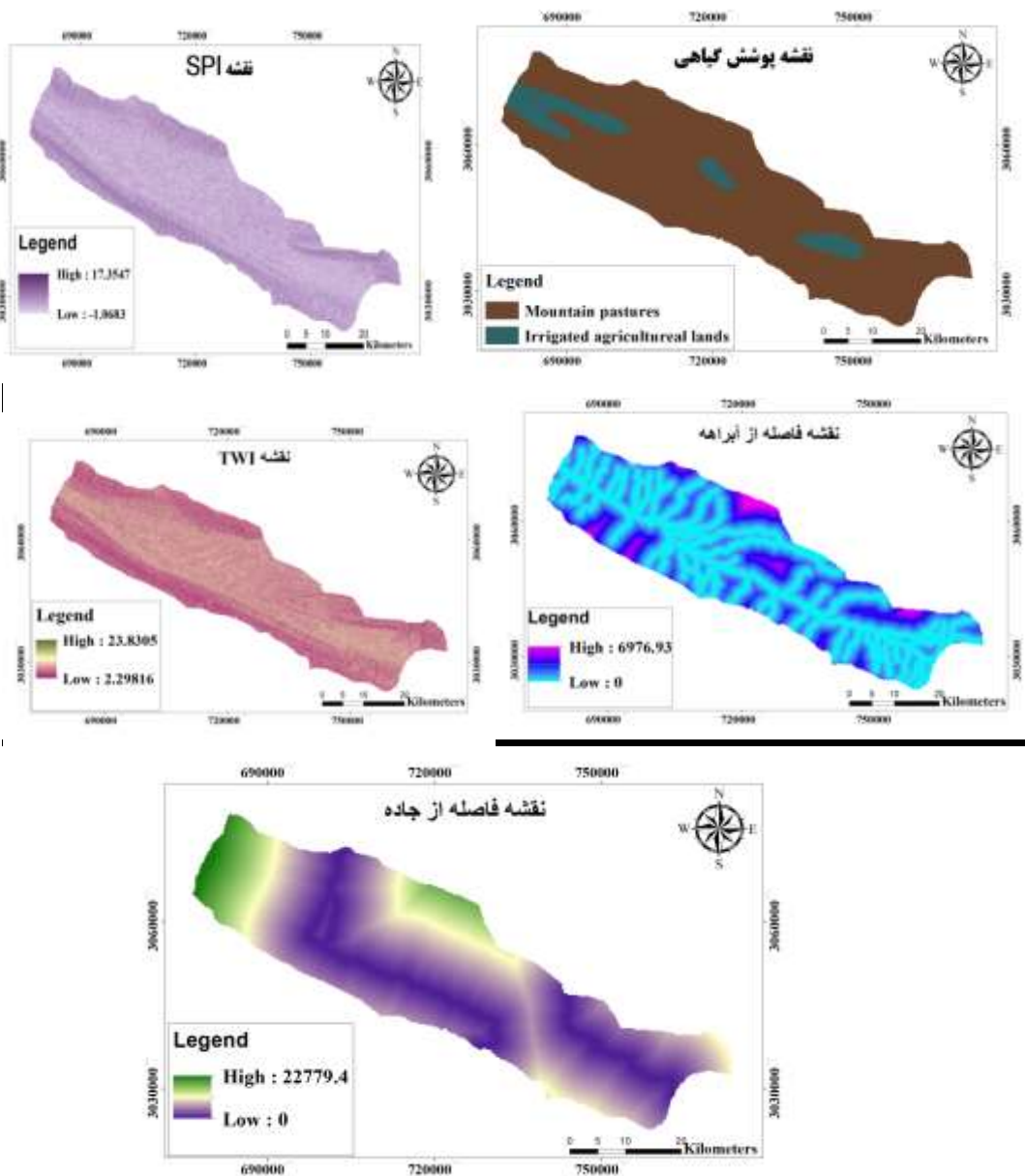


شکل ۳: فلوچارت روش تحقیق

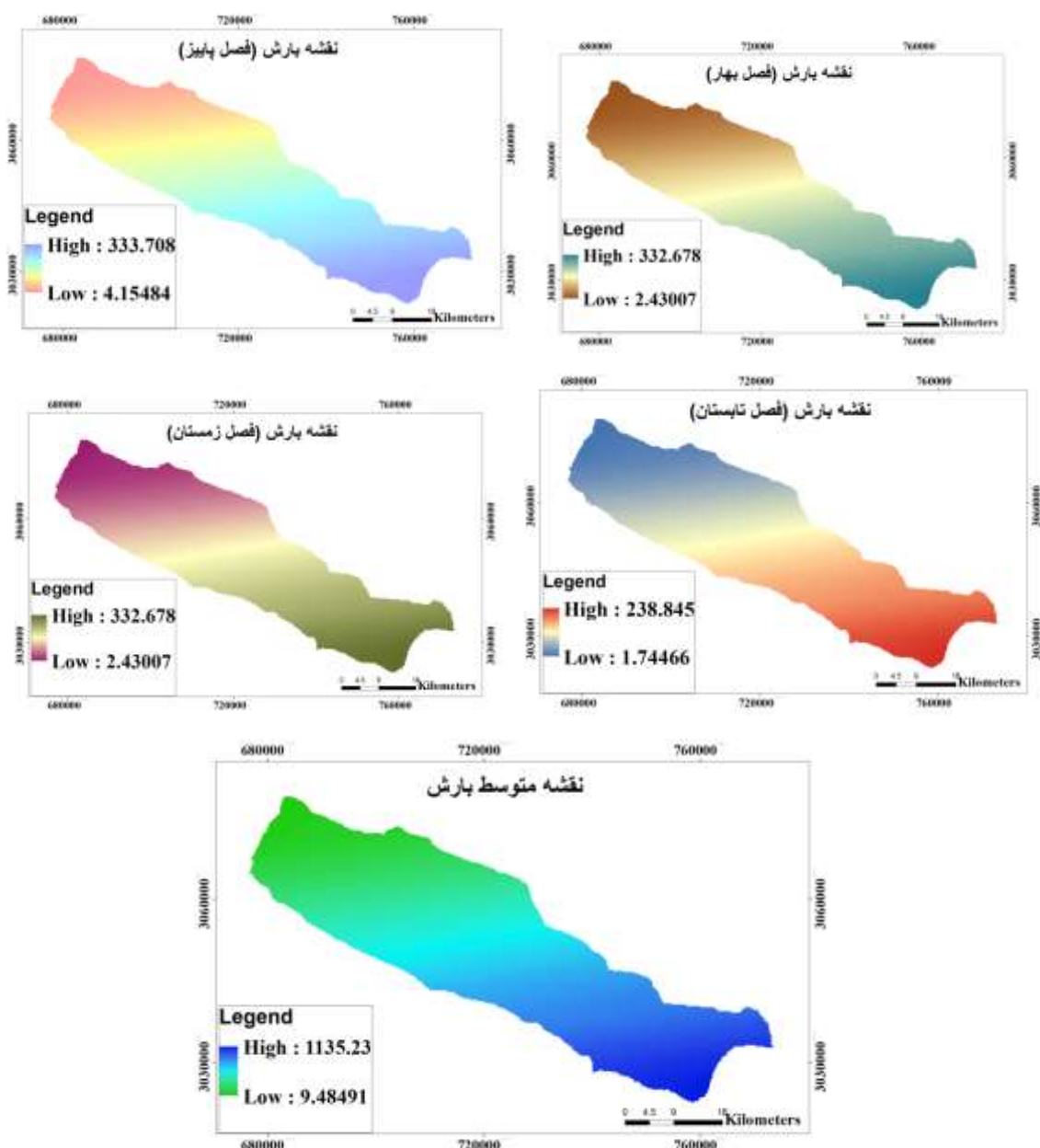
جدول ۱: معیارهای تاثیر گذار بر فرسایش خندقی حوضه علامرودشت

ردیف	معیارها	روش مورد استفاده
۱	شیب	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۲	جهت شیب	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۳	ارتفاع	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۴	پوشش گیاهی	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۵	کاربری اراضی	لند ست ۸ تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۶	بافت خاک	براساس یافته های جمع آوری شده از بازدید میدانی، تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۷	زمین شناسی	نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی، تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۸	فاصله از آبراهه	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۹	اقلیم	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۱۰	فاصله از جاده	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۱۱	SPI	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۱۲	TWI	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS10.8
۱۳	NDVI	تهیه شده در نرم افزار ARC GIS 10.8
۱۴	داده های بارش	تهیه شده از سایت www.worldclim.org





شکل ۴: نقشه های پارامترهای مورد ارزیابی در مدل حداکثر آنتروپی

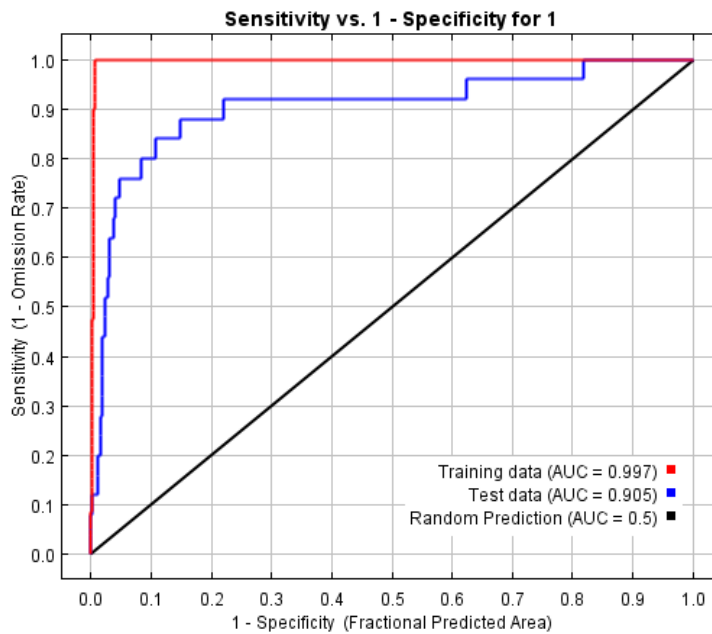


شکل ۵: نقشه‌های پیش‌بینی سناریوهای اقلیمی مورد ارزیابی در مدل حداکثر آنتروپی (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

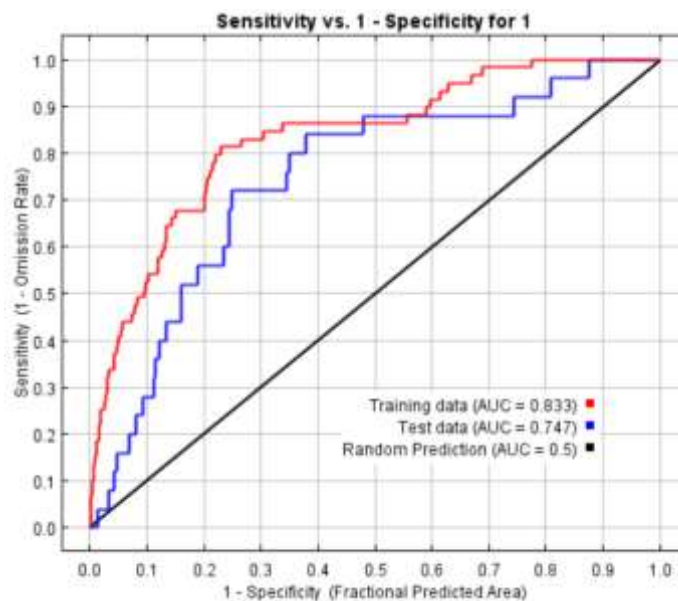
بحث و بررسی:

در این تحقیق بعد از تهیه تمامی شاخص‌های تأثیرگذار و تبدیل آنها به فرمت رستری به عنوان متغیرهای مستقل و نقاط خندقی تهیه شده که دارای مختصات طول و عرض جغرافیایی بوده و داده‌های بارش استخراج شده از سایت www.worldclim.org به عنوان متغیر مستقل در مدل مکسنت وارد شده و در نهایت با اجرای مدل نقشه نهایی حساسیت به فرسایش خندقی تهیه گردید. همچنین با وارد کردن نقشه متوسط بارندگی و نقشه مربوط به چهار فصل سال منطقه مورد مطالعه یک نقشه میانگین و چهار نقشه مربوط به چهار فصل سال پیش‌بینی فرسایش خندقی تهیه گردید و برای اعتبار سنجی مدل همان طور که در قسمت روش تحقیق ذکر گردید، ۷۰ درصد نقاط خندقی به عنوان آموزشی (تعلیمی) و ۳۰ درصد باقیمانده جهت اعتبار سنجی (آزمایشی) مدل استفاده گردید. در شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای سطح زیر منحنی (AUC) آورده شده است. این منحنی‌ها، شامل نمودارهایی هستند که بر روی محور X ها، معیار معینی برای پارامترهای مورد بررسی را دارا هستند و روی

محور Yها، میزان احتمال پیش‌بینی شده که توسط خروجی منطقی تعیین شده‌اند را نمایش می‌دهند. روند رو به بالا در منحنی، مشخص‌کننده رابطه مثبت و حرکت رو به پایین نشان‌دهنده رابطه منفی است. روند این نمودارها در واقع، مشخص‌کننده میزان رابطه پارامتر با احتمال مورد بررسی است. مقدار سطح زیر منحنی مدل برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ به ترتیب برای نمونه‌های تعلیمی و آزمایشی ۸۳٪ و ۷۴٪ می‌باشد و مقدار سطح زیر منحنی مدل برای سال ۲۰۲۰ به ترتیب برای نمونه‌های تعلیمی و آزمایشی ۹۹٪ و ۹۰٪ است که نشان‌دهنده سطح عالی نتایج است که قدرت تشخیص مدل بسیار بالا نشان می‌دهد (Lemeshow & Hosmer, 2000) همچنین بیانگر آن است که مدل به خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر فرسایش خندقی را از یکدیگر تفکیک کند.



شکل ۶: منحنی بررسی اعتبار مدل خطر فرسایش خندقی حوضه آبریز علامرودشت (۲۰۲۰)



شکل ۷: منحنی پیش‌بینی اعتبار سناریوهای اقلیمی مدل خطر فرسایش خندقی حوضه آبریز علامرودشت (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

در این پژوهش برای تعیین میزان تأثیر هر متغیر بر میزان فرسایش خندقی در منطقه از دو روش درصد مشارکت هر متغیر با استفاده از خروجی مکسنت و آزمون جک نایف استفاده شده است. این آزمون اهمیت هر یک از شاخص‌ها را به عنوان متغیر وابسته در ایجاد فرسایش خندقی ارزیابی کرده است. ابتدا باید سهم نسبی هر یک از شاخصها در مدل مکسنت مشخص شود و از آنجا که مدل مکسنت متغیرها را وابسته به یکدیگر می‌داند و باید تأثیر هر شاخص بر شاخص دیگر مشخص شود، به همین دلیل بر اساس الگوی مدل‌های متغیرهای جایگزینی تصادفی در هر مرحله از تکرار به صورت خودکار به ارزش هر یک از پارامترها میانگین تأثیرات در سایر پارامترها اضافه خواهد شد و جایگزین ارزش قبلی خود خواهد شد. به ترتیب علاوه بر میزان تأثیر هر پارامتر، اهمیت جایگزینی یا تأثیر وجود این شاخص یا پارامتر در دیگر پارامترها نیز بررسی خواهد شد. درصد مشارکت در مدل نشان دهنده آن است که بیشترین پارامترهای تأثیرگذار بر فرسایش خندقی منطقه به ترتیب اقلیم (۰/۴۸،۹) ، شیب (۰/۱۴،۲)، زمین شناسی (۰/۱۲،۵) ، جهت شیب (۰/۱۰) ، ارتفاع (۰/۰۶،۵) ، فاصله از آبراهه (۰/۰۳،۲) ، و کمترین پارامترهای تأثیر گذار به ترتیب پوشش گیاهی (۰/۰۱،۱) ، فاصله از جاده (۰/۰۰،۵) ، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (۰/۰۰،۲) ، شاخص رطوبت توپوگرافی (۰/۰۰،۱) و شاخص بارش استاندارد (۰/۰۰،۱) هستند. در جدول ۲ میزان تأثیر و اهمیت هر یک از پارامترها مشخص شده است. در شکل شماره ۷ نیز نتایج آزمون جک نایف را نشان می‌دهد که شاخص‌های اقلیم، شیب ، زمین شناسی، کاربری اراضی، جهت شیب و ارتفاع به ترتیب دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. همچنین در شکل شماره ۸ نیز نتایج آزمون جک نایف برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نشان داده شده که در آن شاخص‌های اقلیم، شیب ، زمین شناسی، کاربری اراضی، جهت شیب و ارتفاع به ترتیب دارای اهمیت بیشتری می‌باشند که در ادامه به معرفی دامنه‌های تأثیرگذار چهار شاخص با درصد مشارکت بالا پرداخته می‌شود.

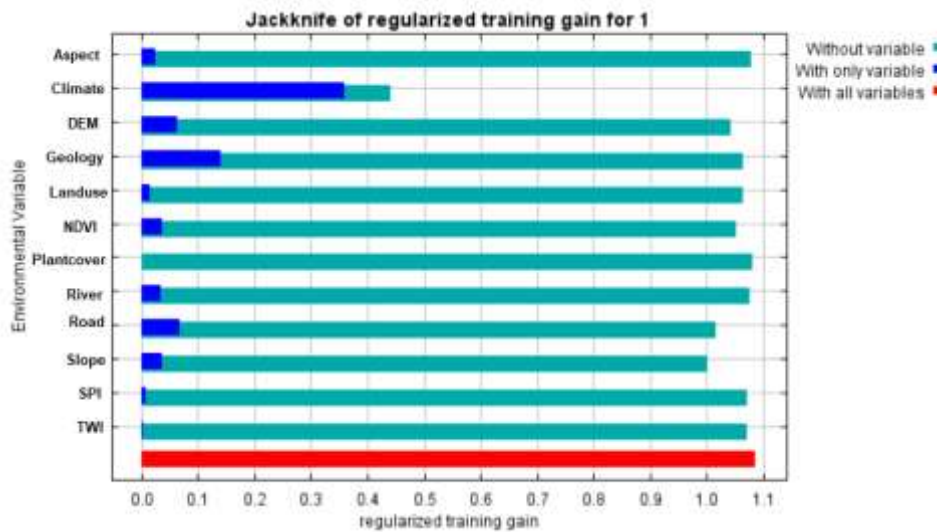
جدول ۲: میزان مشارکت هر یک از شاخصها فرسایش خندقی حوضه آبریز علامرودشت

شاخص‌ها	درصد مشارکت
اقلیم	۴۸/۹
شیب	۱۴/۲
زمین شناسی	۱۲/۵
کاربری اراضی	۱۱/۹
جهت شیب	۱۰
ارتفاع	۶/۵
فاصله از آبراهه	۳/۲
پوشش گیاهی	۱/۱
فاصله از جاده	۰/۵
NDVI	۰/۲
TWI	۰/۱
SPI	۰/۱

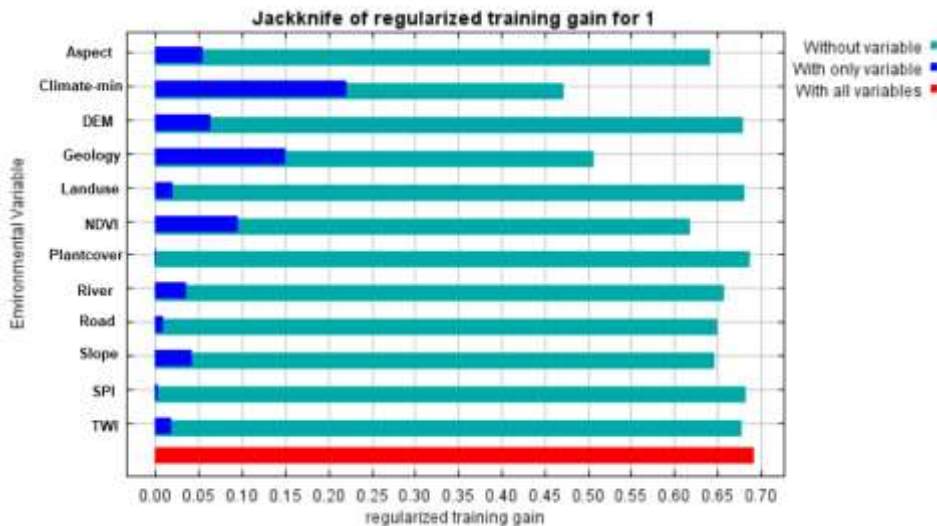
¹ NDVI

² TWI

³ SPI



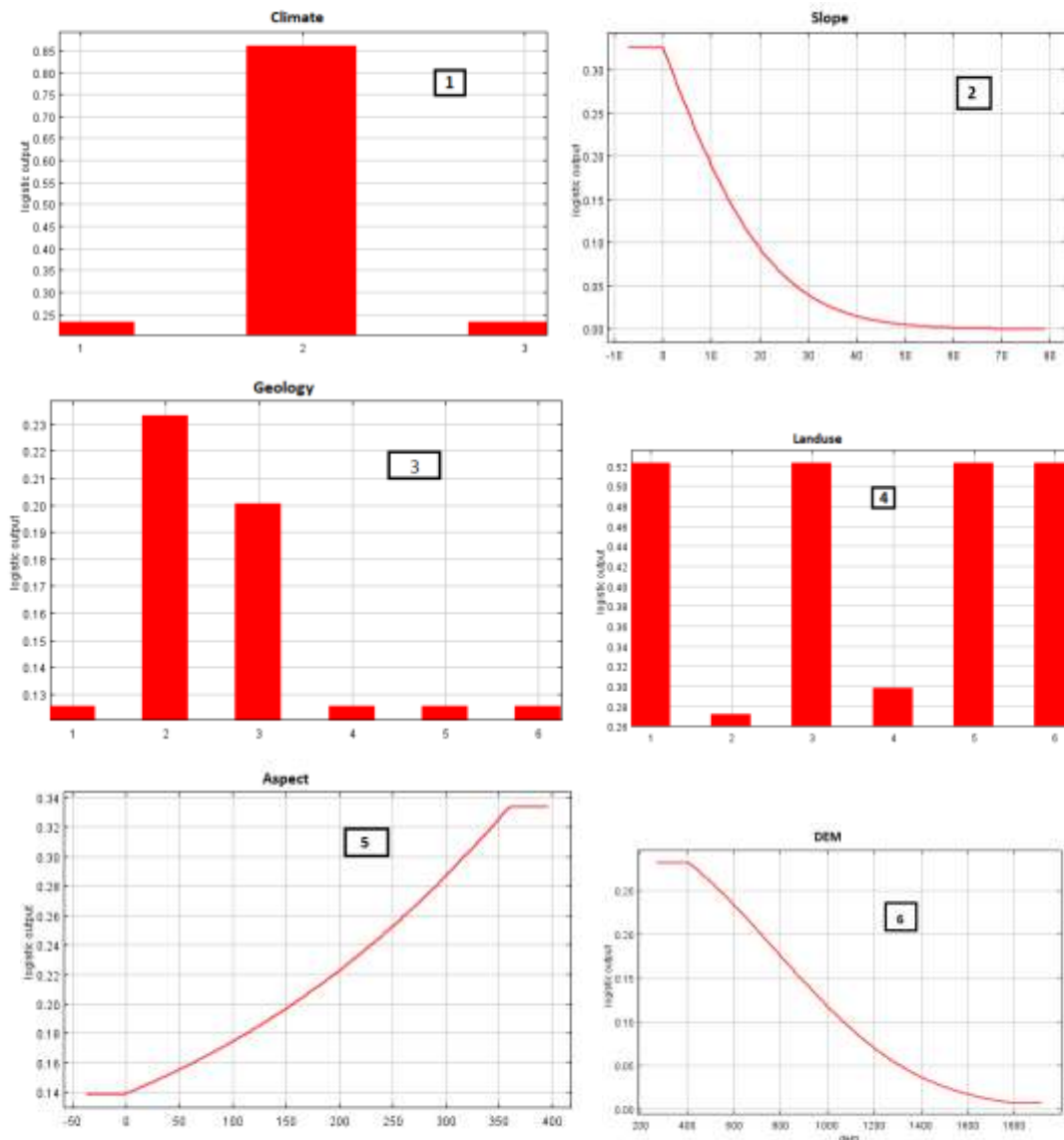
شکل ۷: نتایج آزمون جک نایف برای بررسی میزان نقش هریک از شاخص های مورد استفاده در این پژوهش (۲۰۲۰)



شکل ۸: نتایج پیش بینی آزمون جک نایف (سناریوهای اقلیمی) برای بررسی میزان نقش هریک از شاخص های مورد استفاده در این پژوهش (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

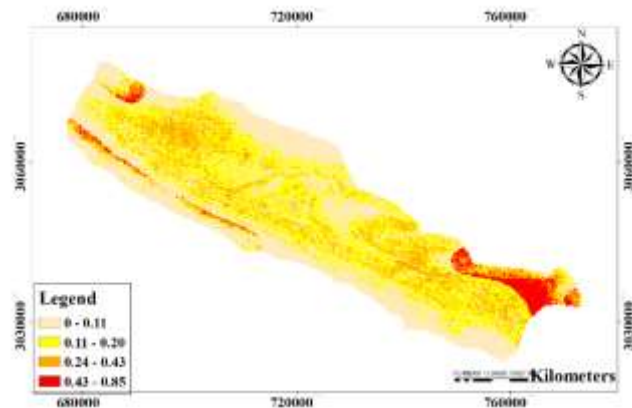
با توجه به نمودار شکل ۹ نتایج حاصل از درصد مشارکت و آزمون جک نایف شاخص اقلیم تأثیرگذارترین شاخص شناخته شده است که منحنی پاسخ بیانگر این است، که بیشترین اقلیم تأثیر گذار مناطق خشک بوده و کمترین اقلیم تأثیر گذار مناطق نیمه خشک است. شاخص شیب دومین میزان بالای مشارکت و اثرگذاری را در پهنه بندی نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه را دارد، که با توجه به نمودار مربوطه کمترین شیب بیشترین تأثیر را داشته و نمودار روند نزولی داشته است و هرچقدر شیب بیشتر شده است تأثیر عامل شیب نیز کاهش یافته است. شاخص زمین شناسی نیز که به عنوان سومین شاخص تأثیرگذار بر پهنه بندی فرسایش خندقی است نشان می دهد که بیشترین فرسایش خندقی مربوط به رسوبات آبرفتی (Qft2) و بعد از آن مربوط به سازند گچساران: مارن، انیدریت و نمک (Mgs) و کمترین فرسایش مربوط به سازند بختیاری: کنگلومرا و ماسه سنگ (Pibk)، سازند رازک: مارن سیلتی و سنگ آهک سیلتی (OMr)، سازند آسماری: سنگ آهک (OMas-ja) و سازنده پابده: شیل و آهک رسی (EKpdgu) می باشد. شاخص کاربری اراضی به عنوان چهارمین پارامتر تأثیر گذار نشاندهنده این است که بیشترین کاربری تأثیرگذار بر فرسایش خندقی منطقه مربوط به کاربری نمکزارها و مراتع ضعیف و کشاورزی بوده است. کمترین کاربری تأثیرگذار مربوط به سنگزارها بوده است. عامل بعدی تأثیر گذار بر فرسایش خندقی جهت شیب است که منحنی پاسخ بیانگر این است که جهت شیب تأثیر مستقیم بر فرسایش داشته

و در قسمت های جنوب شرقی و مرکز حوضه بیشترین فرسایش مشاهده می‌شود. عامل بعدی تاثیر گذار ارتفاع است که منحنی پاسخ نشان می‌دهد که کمترین ارتفاع (۳۶۴ متر) بیشترین تأثیر را داشته و نمودار روند نزولی داشته است و هرچقدر ارتفاع بیشتر شده است، تأثیر عامل ارتفاع نیز کاهش یافته است.

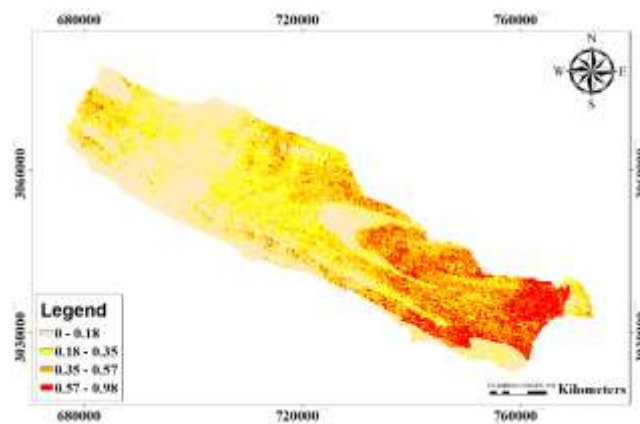


شکل ۹: منحنی پاسخ شش شاخص با بیشترین اثر گذاری شامل: اقلیم (۱)، شیب (۲)، زمین شناسی (۳)، کاربری اراضی (۴)، جهت شیب (۵)، ارتفاع (۶) در فرسایش خندقی حوضه آبریز علامرودشت

در شکل ۱۰ نقشه پهنه بندی حوضه آبخیز علامرودشت که با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و شاخص های تأثیرگذار در تهیه حساسیت به فرسایش خندقی آورده شده که بیانگر این است که فرسایش منطقه بیشتر در قسمت جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه و مقداری هم در شمال منطقه گسترش یافته است اما در شکل ۱۱ که نقشه پیش‌یابی پهنه بندی مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ حوضه آبخیز علامرودشت ارائه شده نشان‌دهنده گسترش بیش از اندازه فرسایش در قسمت جنوب شرقی و قسمت‌های مرکزی منطقه می‌باشد که این روند افزایش بسیار شدید فرسایش در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نقشه‌ها با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و استفاده از شاخص های تأثیرگذار در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی تهیه شده است.



شکل ۱۰: نقشه نهایی پهنه بندی فرسایش خندقی حوضه آبخیز علامرودشت (۲۰۲۰)



شکل ۱۱: نقشه پیش بینی پهنه بندی فرسایش خندقی حوضه آبخیز علامرودشت (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

نتیجه گیری

با توجه به شرایط کنونی کشور که بخش وسیعی از آن دارای شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک بوده و دارای پوشش گیاهی ضعیفی است که نسبت به شرایط فرسایشی خصوصاً فرسایش خندقی حساس است، لذا ارزیابی و تهیه نقشه پهنه بندی خطر در زیر حوضه های آن می تواند در برنامه ریزی های لازم در جهت حفاظت از مناطق مستعد فرسایش مؤثر باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی^۱ پیش بینی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس مدلسازی شد. و همچنین به ارزیابی سناریوهای اقلیمی و تاثیر آن بر فرسایش منطقه پرداخته شد. نقاط آموزشی در این مدل که شامل مناطق فرسایش آبکندی می باشند با استفاده از تصاویر ماهواره ای و بازدیدهای میدانی تهیه شد. برای مدلسازی احتمال فرسایش خندقی، از شاخص های تأثیرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی که عبارتند از اقلیم، شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی، فاصله از جاده، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ و شاخص بارش استاندارد^۳ به عنوان متغیرهای مستقل در پیش بینی مناطق حساس فرسایش خندقی استفاده گردید. نتایج حاصل از مدلسازی نشان داد که بخش های مرکزی و جنوب شرقی در طبقه پر خطر قرار دارند. در حالی که نواحی کم خطر

^۱ Maxent

^۲ NDVI

^۳ TWI

^۴ SPI

در نواحی شمالی، شرقی و غربی منطقه قرار دارد. در تمامی نقشه‌هایی پیش‌پای‌هم که سناریوهای اقلیمی در آنها دخیل بوده‌اند و همچنین در نقشه‌هایی که برای چهار فصل سال تهیه گردید نشان می‌دهند که فرسایش برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ بسیار شدیدتر از زمان حال است و بیشترین فرسایش‌ها در جنوب تا قسمت مرکز منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود همچنین نقشه‌هایی که برای چهار فصل سال تهیه گردیده نشان‌دهنده این است که در فصل پاییز فرسایش بسیار شدیدتر از سه فصل دیگر است و این با مطالعات و بیوگرافی منطقه کاملاً همخوانی دارد. و این روند افزایشی با نتایج (Gupta and Kumar, 2017) همخوانی دارد. بر طبق نتایج حاصل شده، تحلیل داده‌های بارش افزایش عامل فرساینده‌گی باران را در آینده نزدیک (۲۰۴۰) نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج (عظیمی سردری و همکاران، ۱۳۹۸) مطابقت دارد. با توجه به اهمیت لایه فرساینده‌گی باران در مبحث فرسایش آبی در حوضه علامرودشت (ابوالوردی و همکاران، ۱۳۹۰) به طور خاص به نظر می‌رسد در صورت ثابت ماندن سایر عوامل تاثیرگذار بر فرسایش، در آینده نزدیک شاهد افزایش فرسایش و هدررفت خاک در حوضه علامرودشت خواهیم بود. ارزش عددی شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای نقشه نهایی مکسنت برای سال ۲۰۲۰ در این مطالعه برابر با ۰/۹۹۷ به دست آمده است و ارزش عددی شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای (۲۰۲۰-۲۰۴۰) برابر با ۰/۸۳۳ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که پیش‌بینی مدل در پهنه بندی مناطق فرسایش خندقی بسیار بالا بوده و یا به بیان دیگر می‌توان گفت که مدل به خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر فرسایش خندقی را از یکدیگر تفکیک کند. همچنین در نقشه نهایی سال ۲۰۲۰ مقدار نهایی فرسایش ۰/۸۵ به دست آمده ولی در نقشه نهایی مدل برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ این رقم ۰/۹۸ به دست آمده که این ارقام نشان‌دهنده شدت فرسایش برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ است. نتایج این مدل نشان داد که بیشترین تأثیر و اهمیت را شاخص اقلیم دارد، که بیشترین خندق‌ها در مناطق خشک و کمترین فرسایش در مناطق نیمه خشک است. دلیل این امر می‌تواند کمبود بارش در طول سال و همچنین بارش‌های سیلابی باشد که در فصل پاییز و در ماه‌های آذر و دی رخ می‌دهد که این عامل می‌تواند باعث شسته شدن خاک سطحی منطقه و فرسایش شدید گردد. شایان ذکر است که بارش منطقه تأثیر مستقیم بر اقلیم منطقه و همچنین فرسایش منطقه و افزایش خندق‌ها داشته است. بعد از شاخص اقلیم شاخص شیب بیشترین تأثیر و اهمیت را دارد که نشان می‌دهد کمترین شیب بیشترین تأثیر را داشته که نتایج این پژوهش با نتایج سایر پژوهشگران که نشان داده‌اند که با کاهش ارتفاع و شیب درصد پراکنش خندقها افزایش می‌یابد همخوانی دارد (Sheet et al; 2013, Zakerinejad & Mearker; 2014, Rahmati et al; 2016). بعد از شاخص شیب شاخص زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را داشته و نشان می‌دهد که رسوبات آبرفتی بیشترین اثر را بر فرسایش خندقی گذاشته است. بعد از شاخص زمین‌شناسی شاخص کاربری اراضی بیشترین تأثیر و اهمیت را دارد که بیشترین کاربری‌های تأثیرگذار بر احتمال خطر فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه مربوط به کاربری‌های مراتع ضعیف (نمکزارها)، و مناطق کشاورزی بوده است. همچنین در نتیجه تغییر کاربری و استفاده بیش از حد از زمین معمولاً افزایش رواناب و در نتیجه توسعه ابعاد فرسایش خندقی است که در اراضی کشاورزی با عملیات کشاورزی و تردد ماشین‌آلات نیز تشدید می‌یابد. به طور کلی نتایج نشان داد که شاخص‌های فیزیوگرافی (توپوگرافی) استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های انسانی (کاربری اراضی) در فرسایش خندقی حوضه مورد مطالعه نقش مهمی در رخداد فرسایش آبکندی دارند که نتایج سایر پژوهشگران نیز این امر را تایید می‌کند (ذاکری نژاد و همکاران، ۱۴۰۱). لازم به ذکر است در این پژوهش برای تهیه شاخص کاربری اراضی از داده‌های ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. انتظار می‌رود، با توجه به حساسیت بالای منطقه به فرسایش آبکندی استفاده از نتایج این تحقیق بتواند در مدیریت بهتر و اولویت مناطق با حساسیت بالا جهت کارهای حفاظتی آب و خاک مورد توجه برنامه‌ریزان قرار گیرد.

منابع

- ایلدرمی علیرضا؛ مرادی مینا. (۱۳۹۶). ارزیابی شدت فرسایش بادی با بهره گیری از مدل IRIFR.E.A (بررسی موردی: دشت قهاوند همدان)، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۱(۶۰)، ۳۵-۵۲.
- ابوالوردی زهرا؛ صوفی مجید؛ نجابت مسعود. (۱۳۹۰). بررسی عوامل موثر در برآورد حجم آبکند در منطقه علامرودشت شهرستان لامرد در استان فارس، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک
- بشارتی بشیر؛ عابدینی موسی؛ اصغری صیاد. (۱۳۹۷). بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر ایجاد و توسعه فرسایش خندقی در حوضه آبخیز شور چای، نشریه تحقیقات جغرافیایی، ۳۳(۲): ۲۰-۲۲۲
- بیاتی خطیبی مریم. (۱۳۹۰). ارزیابی و پیش بینی خطر فرسایش خاک در حوضه سراسکندر چای با استفاده از مدل USLE و GIS، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، ۱۹ (۵۴): ۸۱-۶۱.
- پیروزی نژاد سجاد. «پیش بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده های سنجش از دور و مدل Maxent در حوضه الوند»، کارشناسی ارشد رشته آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (۱۳۹۶).
- حبیبی علیرضا. (۱۳۹۶). پهنه بندی فرسایش خندقی برای شناسایی روستاهای در معرض خطر با استفاده از مدل فازی در حوضه رودخانه گرگر شوستر، فصلنامه جغرافیایی سرزمین علمی - پژوهشی، ۱۴ (۵۳): ۳۷-۵۲.
- زارع سهیلا؛ سلطانی گردفرامری سمیه؛ تازه مهدی. (۱۳۹۵). مقایسه روش های زمین آمار در پهنه بندی شاخص فرسایش باران (مطالعه موردی: استان فارس)، نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۳ (۶۸): ۱۵۷-۱۷۷
- طهماسبی پور ناصر؛ رحمتی امید؛ قربانی نژاد سمیرا. (۱۳۹۴). پیش بینی حساسیت به فرسایش آبکندی منطقه سمیره براساس مدل عامل قطعیت و تعیین اهمیت عوامل موثر بر آن، نشریه اکوهیدرولوژی، ۳(۱): ۸۳-۹۳.
- عرب عامری علیرضا؛ رضایی خلیل؛ یمانی مجتبی؛ شیرانی کوروش. (۱۳۹۴). بهینه سازی نقشه حساسیت نسبت به فرسایش آبکندی با استفاده از روش های تلفیقی آماری داده محور (مطالعه موردی: حوضه طرود- نجارآباد)، فصلنامه پژوهش های دانش زمین، ۱۰(۱): ۳۸-۱۸
- عظیمی سردری محمدرضا؛ بذرافشان ام البنین؛ پاناگوپولوس توماس؛ رفیعی سارودئی الهام. (۱۳۹۸). ارزیابی حال و آینده مقدار فرسایش خاک در حوضه آبخیز سد استقلال میناب با بهره گیری از مدل RUSLE-3D و سناریوهای تغییر اقلیم، مجله مدیریت بیابان، ۷(۱۴): ۱۳۲-۱۱۹
- غلامی محمد؛ احمدی مهدی؛ محمودی مهران. (۱۳۹۶). تحلیل محدودیت های ژئومورفولوژیکی در گسترش کالبدی شهر با تاکید بر فرسایش خندقی (مطالعه موردی: شهر مَهر در جنوب استان فارس)، مجله مخاطرات طبیعی، ۶ (۱۲): ۱۲۴-۱۰۵.
- میرزاده کوهشاهی فرزانه؛ اکبریان محمد؛ خورانی اسدالله. (۱۴۰۱). مجله پژوهش های فرسایش محیطی، ۵۰ (۲): ۸۱-۶۳
- نیک پور نورالله؛ فتوحی صمد؛ نگارش حسین؛ سیستانی مسعود. (۱۳۹۵). مورفومتری فرسایش آبکندی و عوامل موثر بر ایجاد و گسترش آن (حوضه ی دشت چم فاضل در جنوب غرب استان ایلام)، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات زیست محیطی، ۴ (۱): ۹۷-۱۱
- ذاکری نژاد رضا. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان)، نشریه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱ (۳): ۲۴-۲۱.
- ذاکری نژاد رضا؛ الوندی پریش. (۱۴۰۱). پیش بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده های TanDEM-x و مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خسویه)، مجله پژوهش های فرسایش محیطی، ۴۹(۱): ۱۱۳-۹۶

- Ildarmi Alireza; Moradi Mina. (2017). Assessment of wind erosion intensity using the IRIFR.E.A model (Case study: Ghahavand Plain, Hamadan), *Scientific Journal of Geography and Planning*, 21(60), 52-35. [In persian]
- Abuvalvardi Zahra; Sofi Majid; Nejabet Masoud. (2011). Investigation of effective factors in estimating gully volume in the Allamroodasht region of Lamerd County in Fars Province, Fifth National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management. [In persian]
- Besharti Bashir; Abedini Musa; Asghari Sayyad. (2018). Investigation and analysis of effective factors on the creation and development of gully erosion in the Shoor Chay watershed, *Geographical Research Journal*, 33(2): 20-222. [In persian]
- Bayati Khatibi Maryam. (2011). Assessment and prediction of soil erosion risk in the Sarasikandar Chay basin using USLE and GIS model, *Scientific Journal of Geography and Planning*, 19 (54): 61-81. [In persian]
- Piroozenejad Sajjad. "Prediction of gully erosion using remote sensing data and Maxent model in Alvand basin", Master's degree in watershed management, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, (2017). [In persian]
- Habibi Alireza. (2017). Zoning of gully erosion to identify villages at risk using a fuzzy model in the Gargar Shushtar River basin, *Geographic Quarterly of Scientific and Research Land*, 14 (53): 37-52. [In persian]
- Zare Soheila; Soltani Gerdfaramarzi Somayeh; Taze Mehdi. (2016). Comparison of geostatistical methods in zoning of rain erosion index (case study: Fars province), *Scientific Journal of Geography and Planning*, 23 (68): 157-177. [In persian]
- Tahmasebipour Naser; Rahmati Omid; Ghorbani Nejad Samira. (2015). Prediction of gulley erosion sensitivity in Samireh region based on the certainty factor model and determining the importance of factors affecting it, *Journal of Ecohydrology*, 3(1): 83-93. [In persian]
- Arab Ameri Alireza; Rezaei Khalil; Yamani Mojtaba; Shirani Kouros. (2015). Optimization of gulley erosion sensitivity map using data-driven statistical integrated methods (case study: Toroud-Najjarabad basin), *Quarterly Journal of Earth Science Research*, 10(1): 18-38. [In persian]
- Azimi Sardari Mohammadreza; Bazrafshan Um-al-Benin; Panagopoulos Thomas; Rafiei Sarodei Elham. (2019). Current and future assessment of soil erosion in the Minab Esteghal Dam watershed using the RUSLE-3D model and climate change scenarios, *Journal of Desert Management*, 7(14): 132-119. [In persian]
- Gholami Mohammad; Ahmadi Mehdi; Mahmoudi Mehran. (2017). Analysis of geomorphological constraints on the physical expansion of the city with emphasis on ditch erosion (Case study: Mohr city in the south of Fars province), *Journal of Natural Hazards*, 6(12): 124-105. [In persian]
- Mirzadeh Koohshahi Farzaneh; Akbarian Mohammad; Khurani Asadollah. (2014). *Journal of Environmental Erosion Research*, 50(2): 81-63. [In persian]
- Nikpour Noorollah; Fatouhi Samad; Negaresh Hossein; Sistani Masoud. (2016). Gully erosion morphometry and factors affecting its formation and expansion (Cham Fazel plain basin in southwestern Ilam province), *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 4 (1): 97-11. [In persian]
- Zakeri Nejad Reza. (2019). Evaluation of digital elevation models for preparing gully erosion potential maps using the Maxent model and geographic information system (Case study: Semirom watershed, southern Isfahan province), *Journal of Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 11 (3): 21-24. [In persian]
- Zakeri Nejad Reza; Alvandi Paryush. (2014). Gully erosion prediction using TanDEM-x data and maximum entropy model (Case study: Khasuyeh watershed), *Journal of Environmental Erosion Research*, 49 (1): 113-96. [In persian]
- Arabameri, A., Cerda, A., Tiefenbacher, J.P. (2019). Spatial pattern analysis and prediction of gully erosion using novel hybrid model of entropy-weight of evidence. *Water*. 11(6): 1129.
- Conforti, M, Aucelli, P., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural hazards*, 56(3): 881-898.

- Dhianaufal, D., Kristyanto, T. H. W., Indra, T. L., & Syahputra, R. (2018). Fuzzy Logic Method for Landslide Susceptibility Mapping in Volcanic Sediment Area in Western Bogor, Proceedings of the 3rd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2017 (ISCPMS2017) AIP Conf.
- Ebrahim, M., Abalghasem, A., Ahmadi, M., Asadi, A. (2018). Comparison of Gully Erosion Susceptibility Mapping Using Weight of Evidence and Frequency Ratio Models at Sanganeh Kalat Basin. (4)32: 105-126.
- Gupta, S., & S. Kumar., (2017). Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model- A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape. Journal of Earth System Science, 126(3), 1-20.
- Hosmer D.W., Lemeshow, S. (2000) Applied Logistic Regression, 2nd ed. Wiley, New York 392 pp.
- Modak, P., Mandal, M., Ghosh, B. (2022) Gully erosion vulnerability modelling, estimation of soil loss and assessment of gully morphology: a study from cratonic part of eastern India, Journal of Environmental Science And Pollution Research, 9(34): 85-99
- Nazari Samani, A., Ahmadi H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J., Malekian, A. (2009). Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). Journal of Asian Earth Sciences, 35(2): 180-189.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190: 231-259.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten G., Valentin C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. CATENA, 50(2): 91-133.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Noormohamadi, F. (2016), Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. Natural Hazards, 82(2), 1231-1258.
- Shit, P, K, Paira, R., Bhunia, G, Maiti, R. (2015). Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India. Modeling Earth Systems and Environment, 1(1-2), 2.129.
- Valentin, C, Poesen, J, Li Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. CATENA, 63(2): 132-153.
- Masoudi M., Zakerinejad R (2011). A new model for assessment of erosion using desertification model of IMDPA in Mazayjan plain, Fars province, Iran. Ecol Environ Conserv 17(3): 489-594.
- Zakerinejad, R, Maerker, M. (2014). Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 37(1): 67- 76.
- Zakerinejad R, Maerker M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. Natural Hazards, 79(1): 25-50.
- Zakerinejad, R., Omran, A., Hochschild, V., Maerker, M. (2018). Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling. Geografia Fisica Edinamica Quaternaria, 41(2): 95-104.
- Zakerienjad R, Masoud M (2020). Quantitative mapping of desertification risk using modified MEDALUS model: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. AUC Geographica 54(2), 232-239.
- Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, y., & Zhu, T. (2014). An expertknowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic, Geomorphology, 7, pp: 128-138.
- Zakerinejad, R, Christian, S, Volker, H, Michael, M, (2021). Spatial Disterbution Of Water Erosion Using Stochastic Modeling In The Southern Isfahan Province, Iran, Geogr FIS DIN QUAT 44 (2): 203- 216.