



Investigating the Potential of Erosion-Prone Areas with ICONA Models, Support Vector Machine, Chaid and Random Forest (Case Study: Gonabad Basin)

Mohammadali Zanganeh Asadi ^a, Mahnaz Naemitabar ^{b*}, Rahman Zandi ^c

^a Associate Professor in Geomorphology, Hakim Sabzevari University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Sabzevar, Iran

^b PhD Student in Geomorphology, Hakim Sabzevari University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Sabzevar, Iran

^c Assistant Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: 2 June 2021

Revised: 25 July 2021

Accepted: 14 August 2021

Abstract

Experimental models for estimating erosion have been developed for a specific area and their calibration is necessary for use in conditions other than their own location. Examining the accuracy of experimental models for estimating erosion can lead to better estimates of sediment load and thus better design of soil and water protection operations. Therefore, it is necessary to identify high-risk areas of erosion to control and reduce erosion and sediment production. The study aimed to investigate the accuracy and capability of ICONA, support vector machine, Chaid and random forest models in estimating erosion. First, digital layers of variables affecting erosion including slope, geological formation, land use, soil, height, slope direction, surface curvature, waterway network density, distance from the waterway, fault density, distance from the fault, and topographic moisture index (Twi) were prepared. To compare different models, statistical indices of correlation coefficient (R) and absolute magnitude of error (MAE) were used. The results showed that among the mentioned models, the support vector machine model, ICONA and random forest with M7, M9 and M12 pattern had the highest accuracy with correlation coefficient of 0.899, 0.845, and 0.921 and the lowest mean absolute value. It has error MAE = 0.711, MAE = 0.721, and MAE = 0.628. According to the study of effective factors in soil erosion model, it is concluded that the parameters of the slope, geological formation, land use, soil, distance from the waterway, and topographic moisture index (Twi) are more sensitive to erosion and the factors affecting erosion in these areas are more active. Most of the study area is part of a very high to high erosion class that these classes are mainly located in the center of the area. Most areas at high to severe erosion risk are located in the sloping topographic unit.

Keywords: Soil Erosion, Gonabad Basin, Experimental Models, Statistical Indicators, Correlation Coefficient

*. Corresponding author: Mahnaz Naemitabar E-mail: mahnaznaemi70@gmail.com Tel: + 989113690648

How to cite this Article: Zanganeh Asadi, M., Naemi Tabar, M., Zandi, R. (2021). 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), 99-120.

doi: 10.22067/geoeh.2021.71162.1080



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant with open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 10, Issue 4 - Number 40, Winter 2022

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.71162.1080>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰، صص ۹۳-۱۱۲

مقاله پژوهشی

بررسی پتانسیل مناطق مستعد فرسایش با مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل

تصادفی (مطالعه موردی: حوضه گناباد)

محمدعلی زنگنه اسدی - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

مهناز ناعمی تبار^۱ - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

رحمان زندی - استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۵/۲۳

چکیده

مدل‌های تجربی برآورد فرسایش برای یک منطقه خاص تهیه شده‌اند و واسنجی آن‌ها برای استفاده در شرایطی غیر از محل تهیه آن‌ها ضروری است. بررسی دقت مدل‌های تجربی برای تخمین فرسایش می‌تواند منجر به برآوردهای بهتر از بار رسوبی و در نتیجه طراحی بهتر عملیات حفاظت خاک و آب گردد. لذا شناسایی مناطق پرخطر فرسایش جهت کنترل و کاهش فرسایش و تولید رسوب ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی دقت و قابلیت مدل‌های^۲ ICONA ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی در تخمین فرسایش است. ابتدا لایه‌های رقمی متغیرهای مؤثر در فرسایش شامل شیب، سازند زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک، ارتفاع، جهت شیب، انحنا سطح، تراکم شبکه آبراهه، فاصله از آبراهه، تراکم گسل، فاصله از گسل و شاخص رطوبت توپوگرافی (Twi) تهیه گردید. در این پژوهش به منظور مقایسه مدل‌های مختلف از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R) و قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شده است. بررسی نتایج نشان دادند که از میان مدل‌های نام برده مدل ماشین بردار پشتیبان، ICONA و جنگل تصادفی با الگوی M7، M9 و M12 بیشترین دقت را با ضریب همبستگی (۰/۸۹۹)، (۰/۸۴۵) و

Email: mahnaznaemi70@gmail.com

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۳۶۹۰۶۴۸

2 Institute Conservation Of Nature

نحوه ارجاع به این مقاله:

زنگنه اسدی، محمدعلی؛ ناعمی تبار، مهناز؛ 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.

<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.71162.1080>

صص ۹۳-۱۱۲. (۴)۱۰

(۰/۹۲۱) و کمترین میانگین قدر مطلق خطا ($MAE = 0.711$)، ($MAE = 0.721$) و ($MAE = 0.628$) دارد. 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. بخش اعظم منطقه مورد مطالعه، جزو طبقه فرسایشی خیلی زیاد تا زیاد قرار دارد که به‌طور عمده این کلاس‌ها در مرکز منطقه قرار گرفته‌اند. بیشترین مناطق تحت خطر فرسایش بالا تا شدید، در واحد توپوگرافی با شیب زیاد واقع شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، حوضه گناباد، مدل‌های تجربی، شاخص‌های آماری، ضریب همبستگی.

۱- مقدمه

فرسایش خاک یکی از عوامل مهم تخریب خاک در دنیا است که اثرات منفی شدیدی روی خاک‌ها دارد. این فرآیند اثرات غیرقابل بازگشتی در طول زمان بر روی خاک‌ها باقی می‌گذارد (خسروی اقدم و همکاران، ۱۳۹۸). ایران از نظر وسعت و شدت فرسایش خاک در میان کشورهای بسیار آسیب دیده جهان قرار دارد (کرمی و همکاران، ۱۳۹۸). انسان بر فرآیندهای فرسایش طبیعی تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش و مشاهده قابل توجه میزان فرسایش خاک در مناظر می‌شود (بورلی و همکاران^۱، ۲۰۲۱). 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. علاوه بر این، خاک به شیوه‌های مختلف در معرض خطرات بیشتری از جمله فعالیت‌های نامناسب کشاورزی، قطع درختان جنگلی، چرای بیش از حد، آتش‌سوزی جنگل و فعالیت‌های ساخت‌وساز قرار گرفته است (خالقی و همکاران، ۱۳۹۹). نرخ 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 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 حوزه آبخیز کمک کند (مزبانی و همکاران، ۱۴۰۰). استفاده از مدل‌های فرسایشی، رویکردی بهینه در زمینه بررسی فرسایش، تولید رسوب و شناسایی مناطق بحرانی محسوب می‌شود (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۷). در مدل‌های مختلف فرسایش خاک، شاخص‌های متفاوتی برای فرسایش‌پذیری توسعه داده شده است. استفاده از مدل‌های فرسایشی، رویکردی بهینه در زمینه بررسی فرسایش، تولید رسوب و شناسایی مناطق بحرانی محسوب می‌شود. مدل‌های فرسایشی می‌توانند به‌عنوان ابزارهای

1 Borrelli et al

2 Moche et al

پیش‌بینی برای ارزیابی هدر رفت خاک، برنامه‌ریزی حفاظت، موجودی فرسایش خاک و برنامه‌ریزی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای درک فرایندهای فرسایش و تأثیر آن‌ها مورد استفاده قرار گیرند (موشه و همکاران^۲، ۲۰۱۳). در این راستا مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور انجام گرفته که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. کریستو و همکاران^۱ (۲۰۱۴) بر اساس ویژگی‌های زمین فضایی مدل‌های برآورد فرسایش، آن‌ها را طبقه‌بندی نمودند و نتیجه گرفتند که برای دست کاری مقیاس جهت افزایش کارایی مدل تخمین فرسایش، دو نظریه فضایی سلسله مراتبی و فراکتال برای بهره‌برداری بیشتر در آینده پیشنهاد می‌شود. ترن تی ترن تی فونگ و همکاران^۳ (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی فرسایش خاک بالا دست حوضه رود بو در ویتنام مرکزی، بریک و همکاران^۴ (۲۰۱۶) برای برآورد بار رسوب در حوضه کالایا در شمال کشور مراکش، دورو و همکاران^۵ (۲۰۱۸) برای پیش‌بینی جریان رودخانه و بار رسوب حوضه آنکارا در ترکیه از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج مطالعات نشان دادند این مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و برآورد بار رسوب می‌تواند در حوضه‌ای با ویژگی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. یمانی و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله‌ای تحت عنوان کارایی آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریک در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک به این نتایج دست یافتند که مدل VIKOR دارای دقت پیش‌بینی بالاتری به روش فاکتور ترکیب است. آرشاد اشرف^۶ (۲۰۲۰) در پژوهشی تحت عنوان مدل‌سازی خطر فرسایش خاک در شرایط مختلف کاربری اراضی و بارندگی در حوضه رودخانه سان به این نتایج دست یافت که عوامل تأثیرگذار منجر به نرخ فرسایش بالاتر تحت سناریوهای متغیر تغییر محیطی است. شدت فرسایش در حدود ۱۵ تن در هکتار در سال در خاک آزاد و ۱۰/۳ تن در هکتار در سال در اراضی کشاورزی پیش‌بینی شده است. کومار و همکاران^۶ (۲۰۱۹) در پژوهشی تحت عنوان بررسی مقایسه‌ای مدل‌های مختلف فرسایش خاک و عملکرد رسوب در حوضه چاتیسگر هند به این نتایج دست یافتند که مدل RUSLE برای فرسایش خاک و مدل MUSLE برای عملکرد رسوب قابل اطمینان‌تر است. با در نظر گرفتن لزوم مطالعه فرسایش و تخمین مقادیر هدر رفت خاک توسط عوامل تأثیرگذار فرساینده‌گی و فرسایش‌پذیری، این پژوهش سعی دارد تا با استفاده از مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی مقادیر پارامترهای مؤثر در فرسایش خاک را برآورد نماید و در پایان با تلفیق لایه‌های رقومی عوامل مؤثر در نقشه پهنه‌بندی فرسایشی تهیه شود؛ بنابراین فرضیات پژوهش حاضر تأکید بیشتر بر تخمین مقادیر هدر رفت خاک، تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش جهت تعیین میزان فرسایش‌پذیری خاک است.

1 Christos et al

2 Tran Thi Phoung et al

3 Briak et al

4 Duru et al

5 Arshad Ashraf

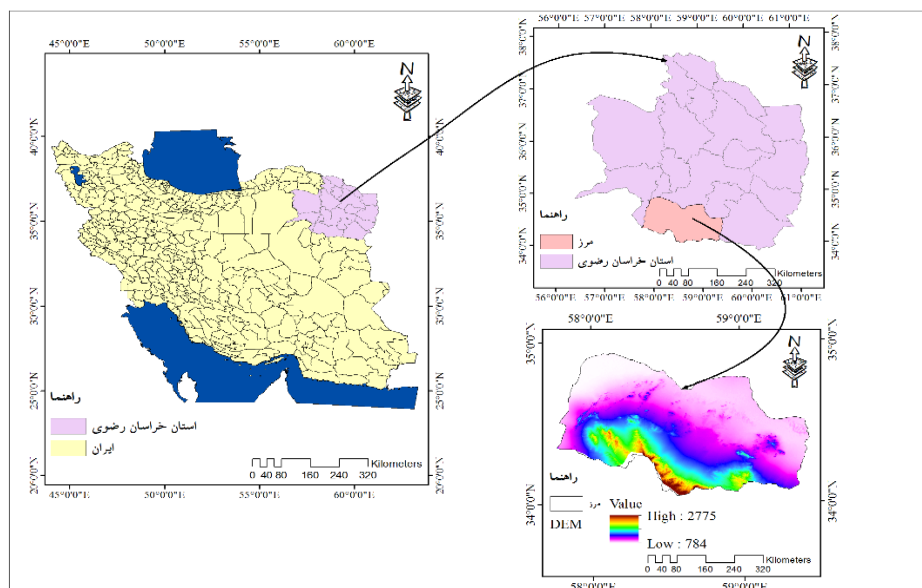
6 Kumar et al

۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر برای ارزیابی فرسایش خاک حوضه از چهار مدل ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی استفاده گردید و بین نتایج این مدل‌ها در برآورد فرسایش خاک مقایسه انجام گرفت. داده‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب و انحنای سطح از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲۰ متر، داده‌های تراکم شبکه آبراهه، فاصله از آبراهه، تراکم گسل و فاصله از گسل از نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰، نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰، کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM⁺ (۲۰۲۰-۲۰۱۱) با دقت مکانی ۱۵ متر، سازندهای لیتولوژی از نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰، خاک از نقشه خاک شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ استخراج شدند. به منظور نمره دهی به عوامل فرسایش در این چهار مدل از لایه‌های اطلاعاتی شیب، سازندهای زمین شناسی، کاربری اراضی، خاک، ارتفاع، جهت شیب، انحنای سطح، تراکم شبکه آبراهه، فاصله از آبراهه، تراکم گسل، فاصله از گسل و رطوبت توپوگرافی (Twi) استفاده گردید.

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان گناباد در جنوب استان خراسان رضوی و در محدوده طول جغرافیایی ۵۸ درجه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه قرار دارد. مساحت این شهرستان ۵۹۰۲ کیلومتر مربع است. این شهرستان در اقلیم خشک و نیمه‌خشک حاشیه کویر قرار دارد (شکل ۱). واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ‌های آذر آواری همانند ایگنمبریت، آگلومرا، توف اسیدی، سنگ‌های آتشفشانی شامل ریولیت، داسیت و تراکیت (سنوزوئیک) و رخساره‌های شیل و ماسه سنگ شمشک (ژوراسیک میانی) است. از نظر ساختاری، ناحیه مورد نظر، با توجه به تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی - ساختاری عمده ایران در شمال شرقی خرده قاره ایران مرکزی قرار دارد. سازند شمشک (ژوراسیک میانی) بیشترین گسترش را در سطح منطقه دارد. ساختمان‌های زمین‌شناسی متنوع مانند چین‌های برگشته، چین‌های خوابیده، گسل‌های راست لغز و راندگی در ناحیه یافت می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه

۲-۲- روش انجام پژوهش

۱-۲-۲ مدل ICONA

مدل مذکور توسط انجمن علمی حفاظت از طبیعت اسپانیا ارائه شده است. این مدل در کشورهای اروپایی و بسیاری از مناطق مدیترانه‌ای قابل استفاده بوده و در میان بسیاری از راه‌های مؤثر بر پیش‌بینی فرسایش با استفاده از GIS و RS، شبیه‌سازی این مدل در کشورهای اروپایی، مناطق مدیترانه‌ای و سایر مناطق با شرایط اقلیمی مشابه پذیرفته شده است (آی کونا؛ ۱۹۹۱). این مدل شامل هفت مرحله است. مرحله یک: لایه شیب، مرحله دو: لایه سازندهای زمین‌شناسی، مرحله سه: فرسایش‌پذیری خاک، مرحله چهار: لایه کاربری اراضی، مرحله پنج: پوشش گیاهی، مرحله شش: لایه حفاظت خاک و لایه هفتم: لایه فرسایش آبی است. در ابتدا نقشه شیب و نقشه زمین‌شناسی تهیه می‌گردد و در ادامه از همپوشانی لایه شیب و زمین‌شناسی، لایه فرسایش‌پذیری خاک تهیه می‌شود. در مراحل بعدی نقشه کاربری و پوشش گیاهی تهیه می‌شود و با همپوشانی لایه کاربری اراضی و پوشش گیاهی نقشه حفاظت خاک به دست می‌آید. سپس لایه فرسایش‌پذیری خاک و لایه حفاظت خاک همپوشانی شده و نقشه خطر فرسایش‌پذیری به دست می‌آید.

۲-۲-۲- مدل ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مقید است که از اصول استقرای کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌شود. در یک مدل رگرسیونی SVM لازم است وابستگی تابع متغیر وابسته (y) به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل (x) تخمین زده شود. فرض بر این است که مانند دیگر مسائل رگرسیونی، رابطه بدین متغیرهای وابسته و مستقل توسط یک تابع معین f به علاوه یک مقدار اضافی نویز^۱ مشخص می‌شود.

$$y = f(x) + \text{noise} \quad \text{رابطه ۱:}$$

موضوع اصلی پیدا کردن فرم تابع f است که بتواند به صورت صحیح موارد جدیدی را که SVM تا کنون تجربه نکرده است پیش‌بینی کند. در روش \mathcal{E} -SVM از توابع هسته‌ای (کرنل) به منظور جداسازی صفحات و بهینه‌سازی فواصل موجود بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی استفاده می‌شود اما در مدل V -SVM از روش برنامه‌ریزی غیر خطی برای کاهش خطای پیش‌بینی استفاده می‌شود (سیاسر و همکاران: ۱۳۹۸). در این مطالعه مدل \mathcal{E} -SVM به دلیل کاربرد گسترده آن در مسائل رگرسیونی استفاده گردید. برای این مدل تابع خطا به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$C = \sum_{i=1}^N \xi_i * + c \sum_{i=1}^N \xi_i * + \frac{1}{1} w^T w \quad \text{رابطه ۲:}$$

تابع خطای فوق لازم است با توجه به محدودیت‌های زیر حداقل گردد:

$$\phi(X_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$W^T$$

$$y_i - W^T \phi(X_i) + b \leq \varepsilon + \xi_i \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$\xi_i * \xi_i * \geq 0 \quad \text{رابطه ۵:}$$

روابط c ثابت گنجایش، w بردار ضریب، W^T ترانزاده بردار ضرایب، $\xi_i * \xi_i *$ ضرایب کمبود، b ضریب ثابت، N الگوی آموزش مدل، ϕ تابع کرنل است.

ماشین‌های بردار پشتیبان برای حل مسائل غیرخطی، ابعاد مسئله را از طریق توابع کرنل تغییر می‌دهند. انتخاب کرنل برای SVM به حجم داده‌های آموزشی و ابعاد بردار ویژگی بستگی دارد؛ به عبارت دیگر، باید با توجه به این پارامترها تابع کرنلی را انتخاب نمود که توانایی آموزش برای ورودی‌های مسئله را داشته باشد. در عمل کرنل خطی به کار برده می‌شود. در جدول (۱) معادلات برخی از کرنل‌های رایج ارائه شد:

جدول ۱- توابع کرنل رایج در ماشین‌های بردار پشتیبان (کیزی و همکاران: ۲۰۱۵)

نوع تابع	تابع کرنل
خطی	$K(X_i, X_j) = x_i^T \cdot X_j$

در نهایت، تابع تصمیم رگرسیون بردار پشتیبان غیرخطی به صورت رابطه ۶ خواهد بود که کنترل کننده میزان نوسان تابع گوسی همچنین کنترل کننده نتایج پیش‌بینی و تعمیم دهنده مدل SVM است.

$$f(x_i) = \sum_{i=1}^1 (-\partial_i - \partial_i *) k(X_i, X_j) + b \quad \text{رابطه ۶:}$$

۲-۲-۳- مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی بر خلاف مدل‌های کلاسیک چون رگرسیون که تنها بر پایه یک مدل تکیه دارند با استفاده از صدها و هزاران درخت از اطلاعات بیشتری در داده‌ها استفاده می‌کند تا بتوان استنباط بهتری از متغیرها داشت. این روش یک تکنیک مدل ناپارامتری^۲ و متعلق به خانواده روش‌های دسته‌جمعی است. این الگوریتم از جمله دسته‌بندی‌هایی است که متد Bagging را به کار می‌گیرد. در طی فرآیند ساخت درخت در هر شاخه، از بین تمام M متغیر مستقل به صورت تصادفی m متغیر برای تقسیم شدن انتخاب می‌شود. برای حالت رگرسیونی نسبت $\frac{m}{M}$ برابر با یک سوم است و برای کلاسه‌بندی برابر با $m = \sqrt{M}$ پیشنهاد شده است. روش درخت رگرسیون جنگل تصادفی به‌ویژه هنگامی که تعداد مشاهدات در مقایسه با تعداد پیش‌بینی کننده‌ها نسبتاً کم باشد یک روش پیش‌بینی کارآمد است (پهلوان و همکاران: ۲۰۱۴). محاسبات مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار Matlab2018 انجام شد. به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین خط برازش یافته توسط این روش در احتمالات متفاوت، متغیر اندازه گره که نشان دهنده تعداد برگ‌ها در هر شاخه است با آزمون و خطا تعیین شد.

۲-۲-۴- الگوریتم CHAID

چاید مخفف مجذور مربع شناسایی کننده تعاملات خودکار است. این روش آماری بسیار مؤثر برای بخش‌بندی و رشد درخت، به‌وسیله کاس توسعه یافته است. با استفاده از مفهوم تست آماری به‌عنوان یک معیار، چاید تمام مقادیر صفت پیش‌بینی کننده بالقوه را ارزیابی می‌کند. این الگوریتم مقادیری را که به صورت آماری همگن در نظر گرفته شده‌اند (شباهت) با توجه به متغیر هدف و حفظ تمام مقادیری که ناهمگن (غیرمشابه) هستند، ادغام می‌کند. سپس این الگوریتم بهترین پیش‌بینی کننده را از شاخه در درخت تصمیم انتخاب می‌کند به طوری که هر فرزند گره از یک گروه از ارزش‌های همگون نسبت به صفت انتخاب شده می‌باشند. این فرآیند به صورت بازگشتی تا آنجا که

1 Kisi et al

2 Nonlinear

درخت به طور کامل رشد می کند، ادامه می یابد. آزمون آماری مورداستفاده بستگی به سطح اندازه گیری میدان هدف دارد. اگر صفت هدف پیوسته باشد، یک آزمون F صورت می گیرد. اگر صفت هدف دسته ای باشد، یک آزمون مجذور مربع به کار برده می شود. چایید یک روش باینری نیست و می تواند بیش از دو دسته در هر سطح خاص از درخت ایجاد کند؛ بنابراین گرایش به ساخت درخت نسبت به روش رشد باینری گسترده تر است. این الگوریتم برای تمام انواع متغیرها پاسخگو است و دو متغیر وزنی و فراوانی را می پذیرد. مدل مذکور همچنین مقادیر مفقودی را با یک طبقه بندی معتبر ایجاد می کند (کیزی و همکاران^۱: ۲۰۱۵).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خاک

تراکم شبکه آبراهه: هر چه قدر تراکم شبکه زهکش بیشتر شود، به میزان فرسایش خاک هم اضافه می شود. کمترین میزان فرسایش خاک در پهنه هایی واقع شده اند که تراکم شبکه زهکش کمتر بوده است. تراکم زهکشی رابطه معکوسی با میزان نفوذپذیری دارد. تراکم بالای شبکه زهکشی بیانگر تمرکز آب به صورت رواناب و کاهش نفوذ است. از طرفی می توان گفت که وجود تراکم بالای شبکه زهکشی می تواند نشان دهنده سازندهایی با استعداد ایجاد جریان های متعدد باشد. می توان این طور استنباط نمود که علت فرسایش خاک با درجه زیاد عامل تراکم شبکه زهکش است. بیشترین میزان خطر فرسایش خاک در تراکم زهکش با مقدار تراکم از ۴۷۸۸ متر تا ۷۲۲۳ متری شبکه زهکش رخ داده است (شکل ۲).

خاک: مقاومت خاک نسبت به فرسایش تا اندازه ای به وضعیت پستی و بلندی، درجه شیب و اثر تخریبی انسان ها بستگی دارد؛ اما فرسایش پذیری به عواملی از قبیل بافت خاک، پایداری دانه خاکدانه ها، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذ و مقدار مواد آلی و شیمیایی نیز بستگی دارد (مزبانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۴۷). خاک های آنتی سول در تشکیلات زمین شناسی جدید به ویژه در شیب تند که فرسایش شدید بوده یافت می گردد. خاک های آنتی سول در منطقه موردمطالعه در روی کوه ها و تپه ها به صورت خاک خیلی کم عمق یا کم عمق وجود دارد. این نوع خاک، خاک های با نفوذپذیری زیاد و هرز آب خیلی کم دارای زهکشی طبیعی مناسبی بوده و تراوش پذیری آن ها حتی هنگامی که رطوبت زیاد است و بنابراین پتانسیل تولید رواناب کمی دارند و خاک های با بافت سبک، شنی و دارای سنگریزه و قلوه سنگی عمیق تا خیلی عمیق را شامل می شوند. نفوذپذیری این خاک ها بین ۷/۵ تا ۱۱/۶ سانتی متر در ساعت متغیر است. خاک هیستوسول توسط بادهای خشک باعث ایجاد فرسایش می شود. خاک هایی هستند که روان آب متوسطی تولید می کنند. این خاک ها هنگامی که کاملاً خیس باشند قابلیت نفوذ متوسطی دارند. در این گروه خاک ها می توان خاک های با بافت نسبتاً ریز مانند خاک های شنی لومی خاک های شنی همراه با مقدار کمی رس را نام برد. نفوذپذیری

آن‌ها بین $3/8$ تا $7/5$ سانتی‌متر در ساعت است. خاک اینسپتی سول جزو خاک جوان و خاک مخصوص مناطق خشک است که به شدت تحت تأثیر فرسایش قرار دارد. خاک‌هایی هستند که آب دوی نسبتاً زیادی تولید می‌کنند. قابلیت نفوذ این خاک‌ها هنگامی که کاملاً خیس باشند نسبتاً کم است. اغلب دارای بافت سنگین تا خیلی سنگین می‌باشند؛ مانند خاک‌های مخلوط رس و سیلت و همچنین خاک‌های لوم رس است. در پروفیل برخی از این خاک‌ها یک لایه غیرقابل نفوذ وجود دارد. نفوذپذیری این خاک‌ها بین $1/3$ تا $3/8$ سانتی‌متر در ساعت است. خاک ورتی سول شرایط مناسبی را جهت فرسایش ایجاد می‌کند؛ بنابراین نیازمند فرایند مدیریتی خاص است تا از فرسایش جلوگیری شود. خاک‌هایی هستند که روان آب زیادی تولید می‌کنند و قابلیت نفوذ آن‌ها هنگامی که مرطوب باشند کم است. نفوذپذیری آن‌ها کمتر از $1/3$ سانتی‌متر در ساعت است. این گروه عمدتاً شامل خاک‌های رس با ظرفیت آماس‌پذیری زیاد، خاک‌هایی که عمق آب زیرزمینی در آن‌ها دائماً بالاست. خاک‌هایی که در آن‌ها لایه رس سخت نزدیک سطح خاک است و همچنین خاک‌هایی که عمق بر روی مواد غیرقابل نفوذ می‌باشند. خاک اکسی سول خاک‌های شدیداً هوازده است که در این نوع خاک خطر فرسایش خاک به وسیله آب بیشتر است. خلل و فرج آن کم تا نسبتاً زیاد است. دارای $35-45$ درصد سنگریزه ریزودرشت و قطعات سنگ است و نفوذپذیری آن‌ها کمتر از $3/8$ سانتی‌متر در ساعت است (شکل ۲).

شیب: این عامل بیانگر تأثیر عوامل ناهمواری و شکل زمین در فرسایش خاک است. میزان خاک ازدست‌رفته ناشی از عوامل ناهمواری و شکل زمین نظیر شیب و طول دامنه است. شیب زیاد باعث افزایش سرعت آب رودخانه‌ها و شعبات آن می‌شود که این امر منجر به فرسایش‌پذیری زیاد خاک‌ها و رسوبات می‌شود. بیشترین میزان فرسایش خاک در شیب بیش از 25 درجه رخ داده است (شکل ۲).

زمین‌شناسی: با توجه به اهمیت ویژگی‌های سنگ‌شناسی در فرسایش و تولید رسوب بررسی حساسیت واحد-های سنگ و خاک به فرسایش از اهمیت بالقوه‌ای برخوردار است. سنگ‌ها رفتار متفاوتی در برابر هوازدگی و فرسایش از خود نشان می‌دهند. بیشترین میزان فرسایش در واحدهای زمین‌شناسی سنگ‌های آذرین، شیل و ماسه سنگ مشاهده شده است. علت فرسایش‌پذیری زیاد خاک به دلیل سست بودن رسوبات است؛ اگرچه بیشترین واحد زمین‌شناسی را پهنه‌های رسی تشکیل می‌دهد، ولی به دلیل نفوذپذیری زیاد فرسایش کمتر صورت گرفته است (شکل ۲).

کاربری اراضی: پوشش گیاهی یکی از پارامترهای مؤثر در میزان فرسایش است. با افزایش پوشش گیاهی میزان فرسایش نیز کاهش خواهد یافت. چنانچه منطقه پوشیده از گیاهان انبوه، فعالیت‌های کشاورزی معمول نباشد و سطح آن کمتر مورد تعلیف دام قرار گیرد، نقش عامل فوق در میزان فرسایش خاک و تولید رسوب منفی بوده و از میزان فرسایش خاک و تولید رسوب عوامل دیگر می‌کاهد ولی برعکس چنانچه در بیش از نیمی از سطح یک منطقه، عملیات کشاورزی بدون رعایت اصول حفاظت آب و خاک صورت گیرد یا چرای سنگینی اعمال شود، نقش

عامل فوق در ایجاد فرسایش خاک و تولید رسوب مثبت بوده و باعث فرسایش و تولید رسوب می‌شود. اراضی فاقد پوشش تأثیر زیادی در فرسایش خاک خواهند داشت. چون سطح زمین فاقد هرگونه پوشش گیاهی در برابر عوامل فرسایش آبی و بادی است. با افزایش مساحت اراضی فاقد پوشش گیاهی، زراعت آبی، باغات و اراضی مسکونی فرسایش به علت کاهش نفوذپذیری افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان فرسایش در مراتع فقیر به دلیل نبود پوشش گیاهی رخ داده است (شکل ۲).

ارتفاع: بیشترین میزان فرسایش در ارتفاعات بیشتر از ۲۰۰۰ متر رخ داده است. علت این فرسایش‌پذیری بسیار زیاد تا زیاد به دلیل تأثیر است که ارتفاع برافزایش بارندگی دارد. با افزایش ارتفاع بارندگی بیشتر می‌شود و بارندگی بیشتر به مقدار جریان آب رودخانه‌ها و شعبات آن می‌افزاید، در نتیجه قدرت فرسایش رودخانه‌ها زیادتر می‌شود و خاک‌ها فرسایش می‌یابند. همچنین در ارتفاعات زیاد به دلیل عمل انقباض و انبساطی که در سنگ‌ها و خاک‌ها رخ می‌دهد، باعث خرد شدن و سست شدن این سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود و در نتیجه مواد و مصالح لازم برای حمل توسط رودخانه‌ها فراهم می‌آید (شکل ۲).

جهت شیب: شیب‌های شمالی کمتر در معرض تابش خورشید بوده و در نتیجه گیاهان با رطوبت کافی رشد نموده و تبخیر و تعرق کم می‌شود ولی عمل فرسایش در شیب‌های جنوبی که آفتاب‌گیر است بیشتر دیده می‌شود (شکل ۲).

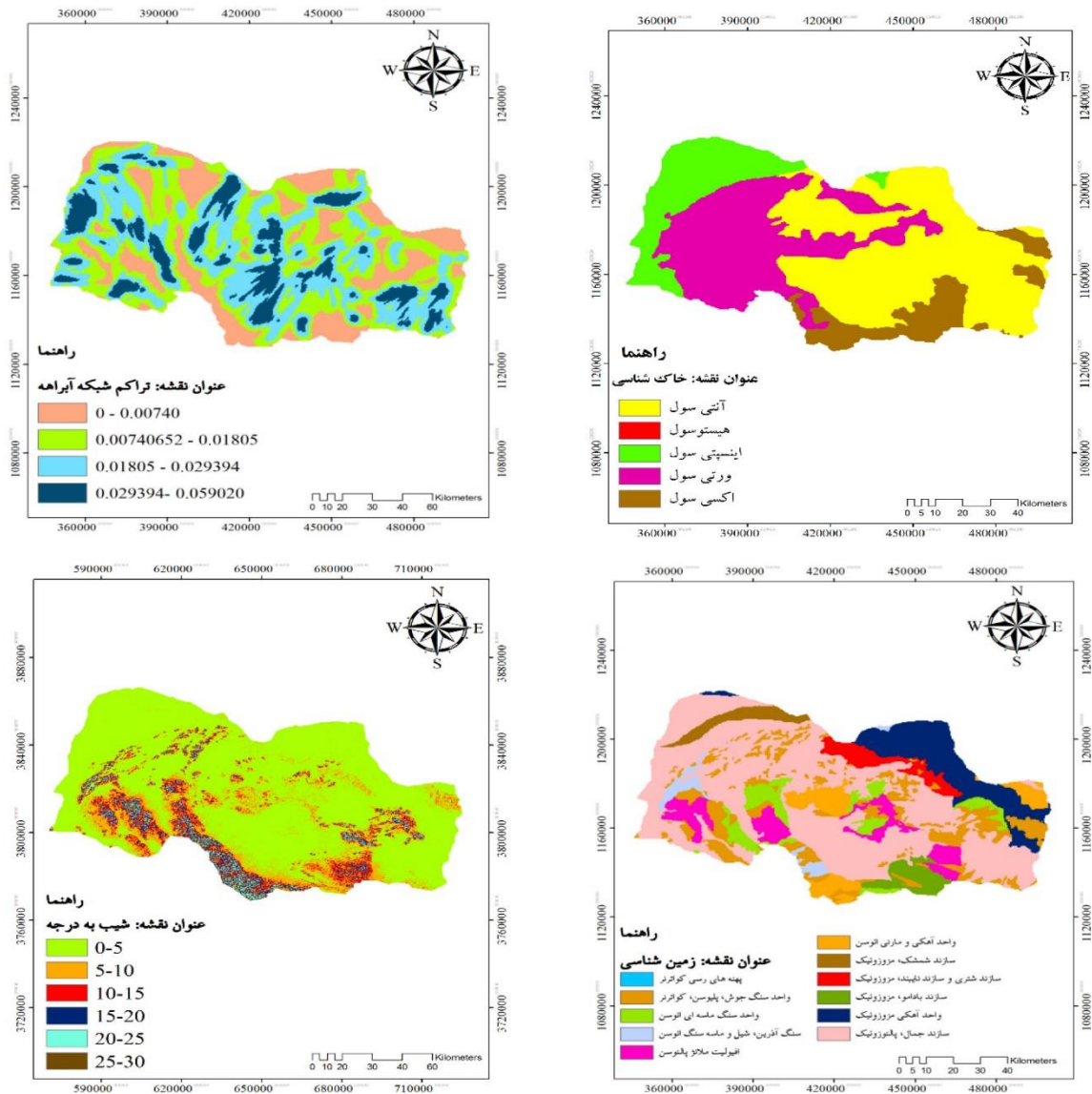
انحنای: انحنا نشان دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارت دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. انحنای پروفیل معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و بنابراین انحنای پروفیل نشان دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. به طوری که مقدار منفی این انحنای سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. دامنه‌های محدب فرسایش بیشتری نسبت به دامنه مقعر و هموار دارد (شکل ۲).

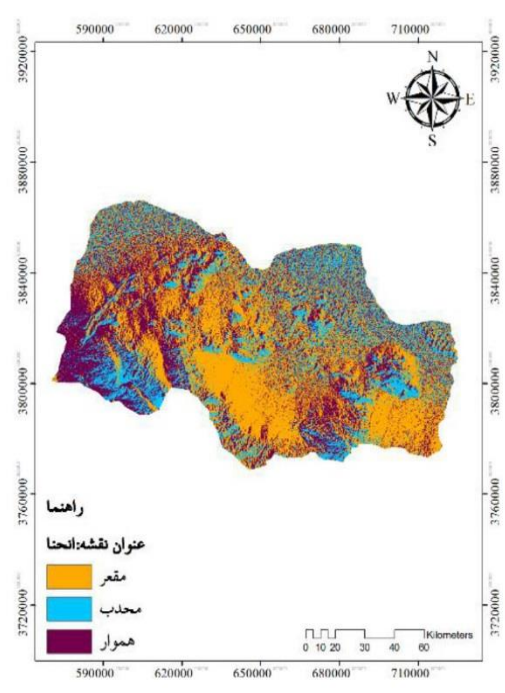
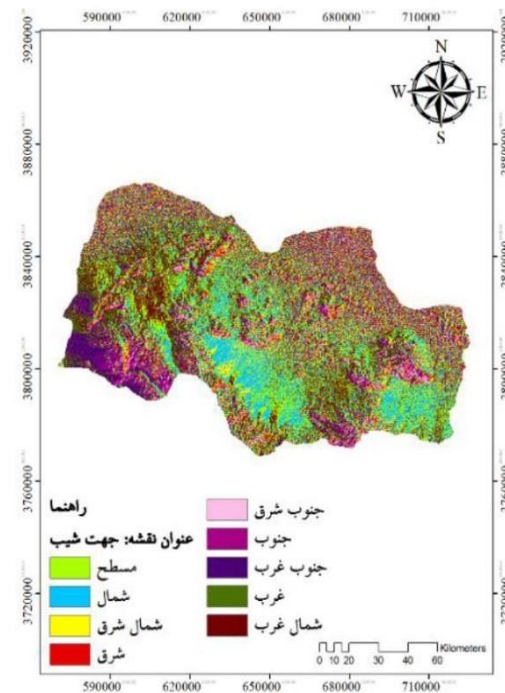
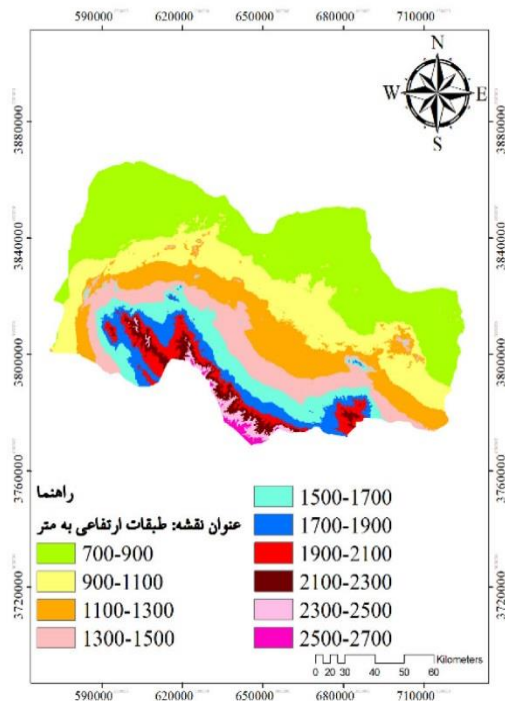
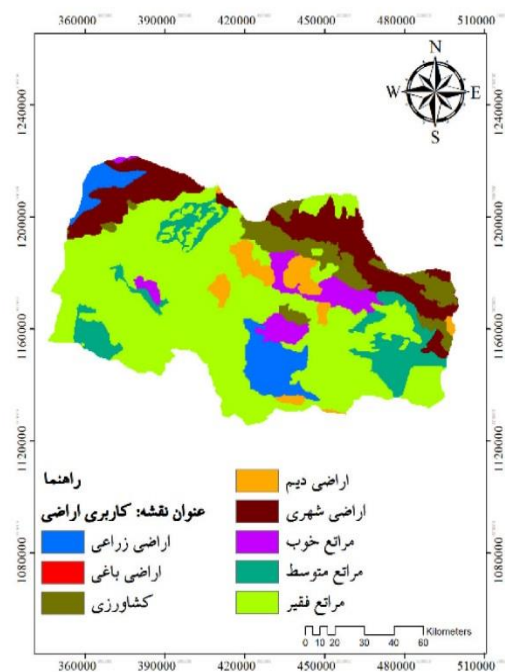
فاصله از آبراهه: منطقه‌ای که در مجاورت آبراهه‌ها قرار دارد به مراتب پتانسیل فرسایش بیشتری نسبت به مناطق دورتر خواهد داشت. لذا هرچه فاصله از آبراهه‌ها کمتر باشد، پتانسیل فرسایش بیشتر خواهد بود. در فاصله ۲۰۰-۴۰۰ متر بیشترین فرسایش رخ داده است (شکل ۲).

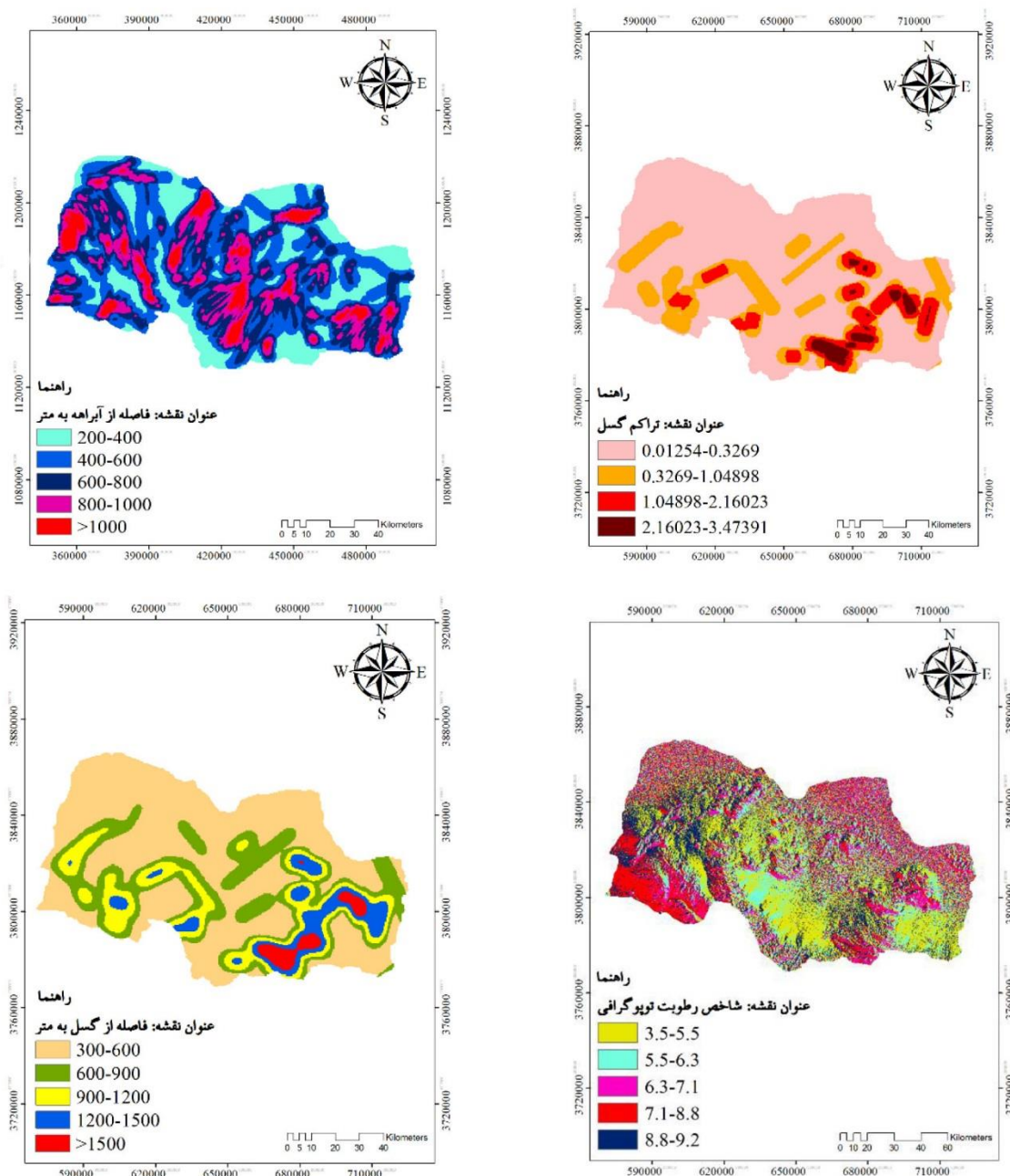
تراکم گسل: میزان تراکم گسل‌ها تأثیر بسزایی بر میزان خردشدگی و فرسایش سنگ‌ها خواهد داشت. بیشترین میزان خطر فرسایش خاک در تراکم گسل با مقدار تراکم از ۳۷۲۱ متر تا ۶۲۷۸ متری تراکم گسل‌ها دیده می‌شود (شکل ۲).

فاصله از گسل: گسل‌ها باعث شکسته و خرد شدن سنگ‌ها می‌شوند. میزان فرسایش خاک در مناطق نزدیک به گسل‌ها بیشتر به وقوع می‌پیوندد. بیشترین میزان فرسایش خاک در فاصله کمتر از ۱۵۰۰ متری رخ داده است (شکل ۲).

شاخص رطوبت توپوگرافی: شاخص رطوبت توپوگرافی به‌عنوان یک عامل مهم در ارزیابی پتانسیل فرسایش شناخته شده است. قدرت فرسایش رواناب از نظر سرعت جریان، پتانسیل تخلیه و ظرفیت حمل رسوب از طریق شاخص رطوبت توپوگرافی به دست می‌آید. بیشترین میزان فرسایش در $9/2-8/8$ به وقوع پیوسته است (شکل ۲).







شکل ۲- بررسی عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خاک

۳-۲- متغیرهای ورودی به مدل‌ها

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل بر اساس معیار خطا، از روش رتبه‌بندی برای داده‌های تست استفاده می‌گردد. بدین معنا که به هر یک از مدل‌ها بر اساس معیارهای ذکر شده رتبه‌ای داده می‌شود و در پایان پس از مقایسه مجموع

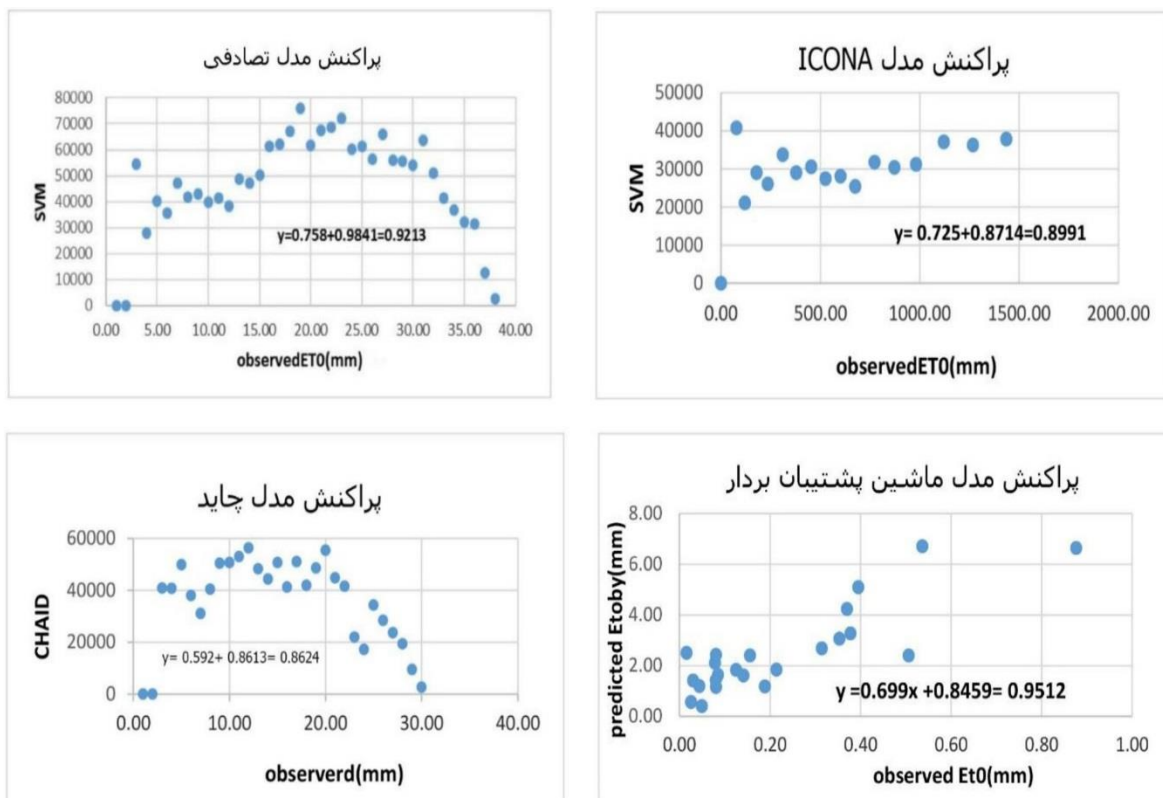
رتبه‌های به دست آمده، مناسب‌ترین مدل برای تخمین بهترین معادله نفوذ انتخاب می‌شود. شیوه رتبه‌بندی این مدل‌ها بدین صورت است که در هر روش، مدلی که کمترین میزان خطای MAE را دارد، پایین‌ترین رتبه، یعنی رتبه ۱ و به مدل‌ها یا ترکیبات ورودی دیگر در هر یک از دسته‌های ورودی بر حسب میزان معیار خطاهای مذکور، رتبه‌های ۲ الی آخر تعلق می‌گیرد؛ اما در مورد معیارهای ضریب همبستگی (R) مدل یا ترکیبی که بیشترین مقدار این معیارها را دارا است، رتبه ۱ اختصاص می‌یابد. همچنین به مدلهایی که میزان معیار خطای آن‌ها یکسان باشند، رتبه یکسان تعلق می‌گیرد. در نهایت پس از انتخاب مدل‌ها یا ترکیبات مناسب هر روش و مقایسه بین آن‌ها، روش برتر در منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌گردد. بررسی مقایسه مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی نشان می‌دهد که می‌توان یک الگوی مشخصی برای منطقه مطالعاتی را با دقت مناسب برای برآورد فرسایش معرفی نمود و باید برای هر مدل، الگوی برتر را معرفی کرد. در نهایت پس از انتخاب مدل‌ها یا ترکیبات مناسب هر روش و مقایسه بین آن‌ها، روش برتر انتخاب می‌گردد. جدول ۲ ضریب همبستگی و خطای سناریوهای مختلف در چهار مدل را نشان می‌دهد. همچنین در این تحقیق تحلیل حساسیت به منظور شناسایی و تعیین درجه اهمیت هر یک از پارامترها در سری داده‌های ورودی بر عملکرد دینامیکی سیستم صورت گرفته است. به منظور آنالیز حساسیت در هر سری داده ورودی یک پارامتر حذف و مدل با همان داده‌های تست، اجرا و مقادیر ضریب همبستگی و خطا تعیین گردید. با حذف هر پارامتر هر چه خطای مدل افزایش بیشتری نشان دهد، بیانگر تأثیر بیشتر آن پارامتر بر فرایند شبیه‌سازی است. جهت انجام تحلیل حساسیت برای سری داده‌های ورودی از مدل‌های SVM-linear، CHAID، RF و ICONA به دلیل دقیق‌تر بودن نتایج آن استفاده شده است.

جدول ۲- ضریب همبستگی و خطای سناریوهای مختلف در مدل ماشین بردار پشتیبان خطی، درخت تصمیم نوع چاید، مدل ICONA و جنگل تصادفی در ایستگاه

سناریو		SVM-Linear	Chaid		Random Forest		ICONA	
M	R	MAE	R	MAE	R	MAE	R	MAE
M1	۰/۹۲۱	۲/۱۵۵	۰/۹۴۹	۲/۳۱۲	۰/۹۲۰	۳/۲۱۱	۰/۸۷۹	۲/۹۹۴
M2	۰/۹۰۱	۱/۳۹۹	۰/۹۷۳	۱/۴۴۵	۰/۹۸۳	۱/۵۵۱	۰/۸۰۶	۳/۳۱۲
M3	۰/۹۶۵	۱/۴۷۱	۰/۹۶۶	۱/۵۲۱	۰/۹۷۷	۱/۶۱۲	۰/۸۷۵	۲/۲۷۱
M4	۰/۹۷۱	۱/۶۵۸	۰/۹۲۵	۱/۲۱۳	۰/۹۹۸	۱/۷۲۱	۰/۹۰۲	۱/۸۰۱
M5	۰/۹۹۹	۱/۵۴۹	۰/۹۵۴	۲/۲۷۱	۰/۹۱۵	۲/۲۰۱	۰/۹۲۱	۲/۷۹۹
M6	۰/۹۶۳	۲/۴۴۴	۰/۹۴۸	۱/۵۶۳	۰/۹۷۰	۳/۲۰۳	۰/۹۷۱	۳/۸۴۵
M7	۰/۸۹۹	۰/۷۱۱	۰/۹۷۹	۱/۷۸۹	۰/۹۲۱	۲/۱۱۱	۰/۷۱۱	۱/۶۵۱
M8	۰/۸۹۶	۱/۷۲۵	۰/۹۸۸	۲/۸۲۱	۰/۹۹۹	۱/۵۲۱	۰/۸۸۹	۱/۹۵۳
M9	۰/۹۷۷	۱/۸۵۰	۰/۹۶۱	۲/۳۵۳	۰/۹۲۳	۳/۱۲۲	۰/۹۰۳	۲/۷۱۱

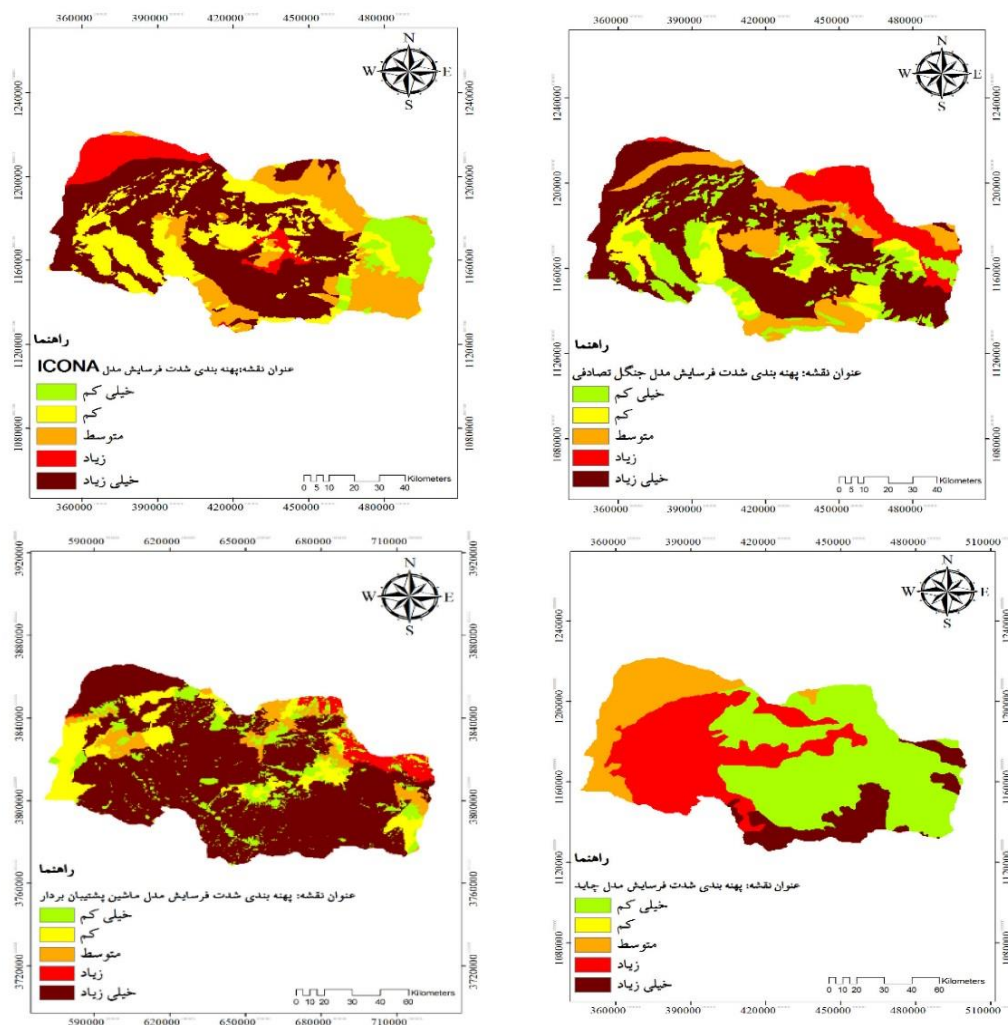
سناریو		SVM-Linear	Chaid		Random Forest		ICONA	
M	R	MAE	R	MAE	R	MAE	R	MAE
M10	۰/۹۶۵	۰/۹۸۷	۰/۸۳۱	۱/۱۷۶	۰/۹۵۰	۱/۵۱۲	۰/۸۴۵	۳/۱۰۳
M11	۰/۹۶۸	۰/۸۵۹	۰/۹۳۳	۱/۸۷۱	۰/۹۳۰	۲/۲۲۳	۰/۹۰۶	۱/۵۰۲
M12	۰/۹۹۹	۱/۲۱۱	۰/۹۸۱	۱/۵۶۳	۰/۹۴۵	۰/۶۲۸	۰/۸۹۸	۱/۷۰۵

در پژوهش حاضر ۱۳ سناریو با ترکیب پارامترهای مختلف به‌عنوان ورودی مدل ایجاد شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مدل ماشین بردار پشتیبان خطی بهترین سناریو M7 با بالاترین ضریب همبستگی ۰/۸۹۹ و کمترین مقدار خطا $MAE=0/711$ ، مدل ICONA بهترین سناریو M9 با بالاترین ضریب همبستگی ۰/۸۴۵ و کمترین مقدار خطا $MAE=0/721$ ، مدل جنگل تصادفی بهترین سناریو M12 با بالاترین ضریب همبستگی ۰/۹۲۱ و کمترین مقدار خطا $MAE=0/628$ ، در مدل درخت تصمیم نوع چاید بهترین سناریو M10 با بالاترین ضریب همبستگی ۰/۸۳۱ و کمترین مقدار خطا $MAE=1/213$ بوده است. در نهایت مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان بهترین الگوها با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا به‌عنوان الگوی برتر شناخته شدند. نتایج آنالیز حساسیت-ها نشان می‌دهد که در مدل ماشین بردار پشتیبان خطی به ترتیب پارامترهای شیب، کاربری اراضی، ارتفاع، تراکم شبکه آبراهه، خاک و در مدل جنگل تصادفی به ترتیب پارامترهای ارتفاع، شیب، زمین شناسی، رطوبت توپوگرافی و کاربری اراضی به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار در مدل شناخته شدند. در مدل درخت تصمیم نوع چاید پارامترهای جهت شیب، خاک، ارتفاع و فاصله از آبراهه و در مدل ICONA پارامترهای انحنا سطح، جهت شیب، تراکم گسل و شیب به‌عنوان مهم‌ترین پارامترها، اهمیت نسبی بالایی در برآورد فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه دارند. شکل (۳) پراکنش داده‌های مشاهداتی و برآورد شده توسط بهترین الگو از هر مدل نشان داده شده است.



شکل ۳- پراکنش داده‌های مشاهداتی هر مدل

نتایج حاصل از ارزیابی فرسایش خاک بر اساس مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی در شکل‌های (۵) آورده شده است. نتایج به دست آمده از ارزیابی فرسایش خاک مشخص شد که در مدل ICONA، ۱۰٪ از سطح منطقه دارای فرسایش خیلی کم، ۱۳٪ فرسایش کم، ۱۸٪ فرسایش متوسط، ۲۰٪ فرسایش زیاد و ۳۹٪ فرسایش خیلی زیاد است. در ماشین بردار پشتیبان، ۱۲٪ از سطح منطقه دارای فرسایش خیلی کم، ۱۵٪ فرسایش کم، ۱۳٪ فرسایش متوسط، ۲۱٪ فرسایش زیاد و ۳۹٪ فرسایش خیلی زیاد است. در مدل چاید ۳۲٪ از سطح منطقه دارای فرسایش خیلی کم، ۸٪ فرسایش کم، ۲۲٪ فرسایش متوسط، ۱۵٪ فرسایش زیاد و ۲۳٪ فرسایش خیلی زیاد است. در مدل جنگل تصادفی ۱۶٪ از سطح منطقه دارای فرسایش خیلی کم، ۱۳٪ فرسایش کم، ۱۹٪ فرسایش متوسط، ۲۱٪ فرسایش زیاد و ۳۱٪ فرسایش خیلی زیاد است (شکل ۴).



شکل ۵- پهنه‌بندی فرسایش خاک بر اساس مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چایید و جنگل تصادفی

۴- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر برای ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز گناباد از ۱۲ شاخص مؤثر در فرسایش خاک شامل شیب، سازند زمین شناسی، کاربری اراضی، خاک، ارتفاع، جهت شیب، انحنا سطح، تراکم شبکه آبراهه، فاصله از آبراهه، تراکم گسل، فاصله از گسل و شاخص رطوبت توپوگرافی (Twi) استفاده گردید. پارامترهای شیب، سازند زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک، فاصله از آبراهه و رطوبت توپوگرافی (Twi) حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش داشته و عوامل مؤثر بر فرسایش در این مناطق فعالیت بیشتری دارند. در منطقه مورد مطالعه، به‌خصوص در اراضی فاقد پوشش گیاهی و اراضی مسکونی، فرسایش خاک نگران‌کننده است. اراضی آبرفتی جوان از نظر خاک دارای شرایط مناسب یا نسبتاً مناسب جهت انجام زراعت هستند. در حوزه مورد مطالعه نیز از این اراضی به‌صورت

زمین‌های زراعی استفاده می‌شود. این اراضی فاقد محدودیت یا دارای محدودیت کم برای استفاده زراعت بوده و باید با انجام عملیات صحیح زراعی از تخریب اراضی جلوگیری کرد. برای رسیدن به این منظور آموزش کشاورزان و برپایی دوره‌های ترویجی ضروری به نظر می‌رسد. خطر دیگری که این اراضی را تهدید می‌کند وجود فرسایش است که با انجام عملیات صحیح خاک‌ورزی در راستای کنترل فرسایش بایستی اقدام نمود. در ارضی کوهستانی مهم‌ترین مسئله وجود رخنمون سنگی و فرسایش آبی ناشی از تخریب پوشش گیاهی و یا استفاده نادرست از اراضی (زراعت دیم) و پستی و بلندی است. با توجه به حساسیت سازندهای حوضه به فرسایش بهترین راه جهت کنترل فرسایش احیاء و تقویت پوشش گیاهی و تبدیل اراضی زراعی دیم به مرتع و یا کشت‌های جایگزین (زراعت‌هایی که عملیات خاک‌ورزی کمتری لازم دارند) است. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از زراعت‌های دیم در تیپ فلات‌ها و تراس-های فوقانی انجام می‌شود و با عنایت به این‌که این رسوبات دارای حساسیت زیادی به فرسایش هستند و بایستی در استفاده از این اراضی مسائل حفاظت خاک را در نظر گرفت. در این اراضی زراعت‌های دیم بایستی به مرتع و یا کشت‌های پایدار تبدیل شده و در مناطق شیبدار که پتانسیل فرسایش بیشتری وجود دارد باید تدابیر لازم اندیشیده شود. مناطق با شیب ۵٪ حداکثر فرسایش‌پذیری مشاهده شده است که تحت کشت دیم قرار داشتند و اراضی فقیر است. افزایش شیب موجب می‌شود سرعت و حرکت هرز آب سطحی زیاد و مدت‌زمان تماس آب با خاک و در نتیجه نفوذ آب در خاک کم شود و همچنین موجب می‌شود که خاک بیشتر و سریع‌تر فرسایش یابد. میزان تراکم گسل‌ها در قسمت‌های شرقی و جنوبی واقع شده‌اند و با افزایش فاصله از گسل فرسایش کمتری به وقوع می‌پیوندد. مقادیر فرسایش از قسمت‌های شرقی تا نیمه جنوبی روند کاهشی داشته و در قسمت‌های شمالی که ارتفاعات و بارش بیشتر است، فرسایش افزایش یافته است. ارتفاعات شمال شرق و شمال غرب به دلیل شیب زیاد بیشترین مقدار فرسایش را دارا می‌باشند. بررسی شبکه آب‌ها در منطقه نشان می‌دهد که شعبه‌های فرعی آب‌ها در مناطق شمالی، پرآب‌تر و دائمی‌تر از شعبه‌های فرعی هستند. این در حالی است که تراکم شبکه آب‌ها در قسمت‌های غربی و جنوبی حوضه، بیشتر از قسمت‌های دیگر آن است که به احتمال ناشی از نفوذناپذیری سنگ‌بستر زمین‌های این مناطق است. در مورد فاصله از رودخانه نیز با افزایش فاصله از رودخانه میزان پتانسیل فرسایش سطحی کاهش می‌یابد هرچقدر آبراهه‌ها به هم فشرده‌تر باشند، فرسایش هم زیادتر بوده است. از آنجاکه بیشتر خاک‌های منطقه آنتی سول است و بافت آن منفصل است و خاک فرسایش‌پذیری بیشتری دارد. شرایط و ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی بیشترین ارتباط را با عامل جهت شیب دارد که نهایتاً بر میزان پتانسیل فرسایش خاک در زمین دارد. بر اساس نتایج بیشترین مقدار فرسایش خاک در قسمت‌های مالی و جنوب غربی رخ داده است. از طریق خروجی مدل‌های ICONA، ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی نقشه‌های حساسیت منطقه به فرسایش خاک تهیه گردید. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از ضریب همبستگی (R) و مقادیر میانگین قدرمطلق خطا (MAE) صورت گرفت. بررسی نتایج مدل‌ها نشان داد که مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، ICONA و جنگل تصادفی با سناریوی M7، M9 و

M12 با بیشترین میزان همبستگی و کمترین خطای میانگین نسبت به مدل چایید به دلیل اینکه اساس آن بر پایه قوانین منطقی بیان شده است از دقت بالایی برخوردار است. مقادیر مثبت سناریوها به معنای عملکرد ضعیف دیگر مدل‌ها نیست بلکه نمودی است که مدل‌سازی فرسایش تحت تأثیر آن است. ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش خاک اطلاعات مفیدی را برای حفظ محیط‌زیست و حفاظت خاک ارائه می‌نماید. برای جلوگیری از تخریب زمین و آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود که عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک اعمال شود. نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک می‌تواند مورد استفاده مهندسين منابع طبیعی و آبخیزداری قرار گیرد؛ زیرا با شناسایی پهنه‌های در معرض فرسایش خاک می‌توان با اقدامات مناسب از خساراتی که این پدیده بر محیط‌زیست، آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی و زمین‌های کشاورزی می‌گذارد، جلوگیری به عمل آورد و آن را کنترل کرد.

کتابنامه

- خالقی، سمیه؛ نصرتی، کاظم؛ عباسپور، رحیم؛ ۱۳۹۹. برآورد فرسایش خاک و انتقال رسوب در حوضه آبخیز بادآور لرستان با استفاده از مدل SWAT. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۳، ۱۸۶-۲۰۲.
- 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. مجله تحقیقات کاربردی خاک. شماره ۷، ۴۳-۳۱.
- رضازاده، محمد سهیل؛ بختیاری، بهرام؛ عباس پور، کریم؛ احمدی، محمد؛ ۱۳۹۷. شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر تفرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل SWAT. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. شماره ۴۱، ۵۱-۴۰.
- سیاسر، هادی؛ هنر، تورج؛ ۱۳۹۸. کاربرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، چایید و جنگل تصادفی در برآورد تبخیر تفرق مرجع روزانه در شمال استان سیستان و بلوچستان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۲، ۳۸۸-۳۷۸.
- قربانی نژاد، سمیرا؛ زینی نند، حسین؛ حقی زاده، علی؛ طهماسبی، ناصر؛ ۱۳۹۸. بررسی کارایی مدل دمپستر- شافر در پتانسیل‌یابی مناطق مستعد فرسایش خاک حوضه آبخیز کاکا رضا در استان لرستان. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. شماره ۹، ۱۱۴-۱۰۰.
- کرمی، فریبا؛ بیاتی خطیبی، مریم؛ ۱۳۹۸. مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE و SWAT. هیدروژئومورفولوژی. شماره ۱۸، ۱۱۵-۱۳۷.
- مزیانی، مهدی؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ حجازی، اسدالله؛ 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. شماره ۳۷، ۶۳-۴۱.
- یمانی، مجتبی؛ عرب عامری، علیرضا؛ ۱۳۹۷. کارایی آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریک در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه منج). جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۲۶، ۲۱-۱.

- 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.
- Ayele G.T, Teshale E.Z, Yu B, Rutherford I.D, Jeong J., 2017. Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin. *Ethiopia. Water* 9: 1-29.
- Borrelli P, Alewell Ch, Alvarez P, Jamil Alexandre A.A, Jantiene B, Cristiano B, Nejc B, Marcella B, Artemi C, Devraj Ch, Songchao Ch, Walter Ch, Anna M, Gizaw Desta G, Detlef D, Nazzareno D, Nikolaos E, Gunay E, Peter F, Michele F, Francesco G, Andreas G, Nigussie H, Bifeng H, Amelie J, Konstantinos K, Kiani-Harchegani M, Ivan Lizaga V, Changjia L, Luigi L, Manuel L, Manuel Esteban L, Michael M, Francis M, Chiyuan M, Matjaž M, Sirio M, Markus M, Victoria N, Laura P, Raquel P, Laura Q, Rahdari M, Renima M, Giovanni F, Jesús R, Sergio S, Samani A, Calogero S, Vasileios S, Hyuck Soo K, Diogo Noses S, Paulo Tarso O, Hongfen T, Resham T, Konstantinos V, Diana V, Jae E, Shuiqing Y, Demetrio Antonio Z, Guangju Z, Panos P., 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment* 780 : 3-16.
- Briak H, Moussadek R, Aboumaria KH, Mrabet R., 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauge watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *International Soil and Water Conservation Research* 4: 177- 185.
- Christos G, Panagos P, Ioannis Z, Gitas., 2014. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth* 7: 229-250.
- Duru U, Arabi M, Whol E., 2018. Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey. *Journal Physical Geography* 39: 264-289.
- Gull S, MA A, Dar A.M., 2017. Prediction of Stream Flow and Sediment Yield of Lolab Watershed Using SWAT Model. *HydrologyCurrent Research* 8: 1-9.
- ICONA. 1991. Plan National de Restauracion hidrologico-forest alpara el Control de la Erosion. Ministries deAgriculture, Pescay Alimentacion, Madrid.
- Kisi O, Kilic Y. 2015. An investigation on generalization ability of artificial neural networks and M5 model tree in modeling reference evapotranspiration. *TheorAppl Climatol*, 1-13.
- Kumar T, jahria DC, Pandey H.K., 2019. Comparative study of different models for soil erosion and sediment yield in Pairi watershed, Chhattisgarh, India. *Journal Geocarto internathinal* 9: 112-124.
- Muche H, Temesgen M, Yimer F., 2013. Soil loss prediction using USLE and MUSLE under conservation tillage integrated with 'fanya juus' in Choke Mountain, Ethiopia. *International Journal of Agricultural Sciences* 3: 046-052.
- Pahlavan Rad M.R, Toomanian N, Khormali F, Brungard C, Komaki C.B, Bogaert P., 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loessderived soils of northern Iran. *Journal of Geoderma* 32: 97-106.
- Thi Phuong Y, Chau V, Trung T, Nguyen B N, Huynh CH., 2014. Modeling Soil Erosion within Small Moutainous Watershed in Central Vietnam Using GIS and SWAT. *Resources and Environment* 4: 139-147.