Modeling the Erosion Potential and Sedimentation rate of the Gorganroud Watershed

Azam Najafi Vafa[a], Seiyed Mossa Hosseini[b*], Mohammad Mehdi Hosseinzadeh[c], Mansour Jafarbeglou[d]

[a] *PhD Candidate in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.*

[b] *Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.*

[c] *Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Shahid Beheshti, Iran.*
[d] *Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.*

Research Full Paper

Article History (Received: 2024/10/1 Accepted: 2024/11/3)

Extended abstract

1-Introduction

The Erosion Potential Model (EPM) is a widely used tool for estimating soil erosion and sediment yield in watersheds. It integrates multiple factors such as geological, topographic, climatic, and land use characteristics to predict erosion intensity and sediment transport. The model considers not only sheet and rill erosion but also gully erosion, wind, and tillage impacts. EPM's advantages include simplicity, low data requirements, and compatibility with Geographic Information Systems (GIS) for visualizing erosion-prone areas. Soil erosion in Iran, particularly in the Golestan River Basin, has been a growing concern due to population growth, land use changes, and poor water and soil management. The Golestan Basin has experienced severe erosion in several sub-basins, leading to increased sedimentation and damage to fertile soil. Previous studies have applied EPM in this region, estimating soil loss and sediment yield. This study aims to evaluate the application of EPM alongside three sediment delivery ratio (SDR) equations in the Golestan River Basin to provide more accurate erosion assessments.

2- Methodology

The study employed a comprehensive set of spatial and hydrometric data for modeling erosion and sedimentation in the Golestan River Basin. Data sources included meteorological, topographic, land use, geological, soil, geomorphological, and hydrometric information. Meteorological data, covering the period from 1981 to 2024, were sourced from the CHIRPS dataset. Topographic data, derived from a 30-meter spatial resolution Digital Elevation Model (DEM), were used to assess the impact of slope and elevation on erosion. Land use maps, based on Sentinel-2 satellite images, tracked changes in vegetation and urban development from 2000 to 2022.

Geological maps, soil maps, and geomorphological data were used to assess factors like soil permeability, texture, and basin morphology. Hydrometric data from 11 stations provided sediment concentration data to validate the model's predictions. The study also applied regression analysis to identify the relationship between variables (e.g., area, perimeter, slope, precipitation) and sediment production.

All data were processed in GIS software, including ArcGIS, Global Mapper, and SAGA GIS, allowing for spatial analysis and the generation of erosion potential maps.

3-Results

The study revealed significant variations in sediment yield across the sub-basins of the Gorganroud watershed, depending on the selected erosion model. For example, the Gavrilovich model predicted higher sediment yields (e.g., 2.465 in the Onq Lghi sub-basin) compared to the Bois and Williams-Brent models,

* Corresponding Author: smhosseini@ut.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

which yielded lower estimates (e.g., 0.15726 in Bois). The differences suggest that the Gavrilovich model is more suitable for regions with steep slopes and severe erosion, while the Bois and Williams-Brent models are more appropriate for flatter, less erosive areas.

Regression analysis identified several key factors influencing sediment production: area, perimeter, river length, slope, curve number, temperature, elevation difference, and rainfall. These variables, particularly slope and rainfall, were found to have a strong correlation with erosion intensity and sediment yield. Areas with steep slopes, high rainfall, and low soil permeability were identified as the most vulnerable to erosion.

4- Discussion & Conclusions

The results demonstrated that the EPM is an effective tool for estimating erosion and sediment yield in the Gorganroud watershed. Climatic factors, especially temperature and precipitation, played a significant role in erosion processes, with intense rainfall events leading to increased surface runoff and sediment transport. The topography of the watershed, particularly its steep gradients, also contributed to higher erosion rates. The average slope of the watershed was 21.39%, with some areas exceeding 40%, leading to significant sediment loss. Key factors like curve number (CN) and elevation differences were found to influence runoff intensity and soil permeability. Areas with high CN values and large elevation differences experienced greater erosion due to higher runoff and soil displacement. Human activities, including overgrazing and land conversion for agriculture, were identified as additional contributors to erosion. The modeling results revealed that most sub-basins experienced extreme erosion intensity (class V), while only a few showed severe erosion (class IV). The model demonstrated a high level of accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of 0.969 and a standard error of 0.022. Validation using hydrometric data and statistical methods like ROC and AUC confirmed the model's reliability in predicting erosion and sediment yield. In conclusion, the EPM model proved to be a valuable tool for identifying areas of high erosion risk and understanding the factors contributing to sediment production. However, the accuracy of the model is highly dependent on the quality of input data. In areas with insufficient data, model predictions may be less reliable. To mitigate erosion and improve sediment conditions in the watershed, the study recommends integrating EPM into land management strategies, such as vegetation restoration and sustainable water resource management. By considering the specific characteristics of each sub-basin and selecting the most appropriate erosion model, policymakers and land managers can better address soil erosion challenges and develop effective strategies for soil conservation in the Golestan River Basin.

4-Keywords: Erosion Potential Model, Gorganroud Watershed, Sediment Delivery Ratio, Performance Characteristic Curve

Cite this article: Najafi Vafa, A., Hosseini, M., Hosseinzadeh, M., Jafarbeglou., M. (2025). Modeling the Erosion Potential and Sedimentation Rate of the Gorganroud Watershed., Iran. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2025; 15 (1) :120-146. http//doi.org /10.61186/jeer.15.1.120

© The Author(s).
DOI: http//doi.org /10.61186/jeer.15.1.120
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

مدل‌سازی پتانسیل فرسایش و نرخ رسوب‌دهی حوضه آبریز گرگانرود

اعظم نجفی وفا: *کاندیدای دریافت دکتری در رشته ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.*
سید موسی حسینی*: *دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.*
محمد مهدی حسین‌زاده: *دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.*
منصور جعفربگلو: *دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳)
DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.1.120

چکیده

حوضه‌آبریزگرگانرود در استان گلستان، به دلیل شرایط خاص توپوگرافی و خاک‌های حساس، یکی از مناطق آسیب‌پذیرکشوردر برابر فرسایش خاک محسوب می‌شود. تعیین پتانسیل فرسایش این حوضه در ارزیابی ریسک فرسایش و برآورد میزان تلفات رسوب اهمیت دارد. در این پژوهش، با استفاده از مدل پتانسیل فرسایش(EPM)، توزیع فضایی پتانسیل فرسایش خاک در ۱۱ زیرحوضه حوضه آبریزگرگانرود مورد ارزیابی قرارگرفت. به‌منظور دستیابی به این هدف، از لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، شیب، ارتفاع، دمای سطح‌زمین، بارش وکاربری اراضی زمین در محیط GIS استفاده شد. در ادامه، نسبت تحویل رسوب در هر زیرحوضه توسط سه روش مرسوم‌گاوریلوویچ، بویس و ویلیامز-برنت محاسبه و رابطه ریاضی بین این نسبت و ویژگی‌های حوضه‌ای مشخص شد. برای اعتبارسنجی نقشه پتانسیل رسوب حوضه، داده‌های متوسط بلندمدت رسوب ویژه ۱۱ ایستگاه هیدرومتری درخروجی زیرحوضه‌های مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۶ محاسبه و نمودار مشخصه عملکرد محاسبه شد. سطح زیر منحنی مشخصه نتایج پتانسیل رسوب بر اساس معادله نسبت تحویل رسوب ویلیامز-برنت،گاوریلوویچ و بویس به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۴۲و ۰/۷۵ بدست آمد. نتایج پژوهش نشان داد که بجز بخش‌های جنوب شرقی حوضه گرگانرود که شامل زیرحوضه‌های پل غزنوی و آق سوقوچمزکه در کلاس شدت فرسایش شدید قرار دارند، سایر زیرحوضه‌ها درکلاس بسیار شدید قرار می‌گیرند. میزان فرسایش ویژه و رسوب ویژه کل حوضه به ترتیب ۷۶۵۶ و ۸۶۲/۲۶ مترمکعب در کیلومترمربع در سال برآورد شد. به منظور ارائه یک رابطه ریاضی نسبت تحویل رسوب برای حوضه آبریز گرگانرود، از فاکتورهای مساحت، محیط، شماره منحنی، طول آبراهه، بارش، دما، اختلاف ارتفاع و شیب متوسط زیرحوضه‌های مورد مطالعه در رگرسیون گام به‌گام استفاده شد. مدل رگرسیونی بدست آمده دارای ضریب تبیین ۰/۹۶۹ و خطای استاندارد ۰/۰۲۲، عملکرد بسیار خوبی در محاسبه مقدار SDR زیرحوضه‌های مور مطالعه نشان داد. متغیرهای شیب حوضه، طول آبراهه، دما و بارش به ترتیب بیشترین تاثیر را در برآورد SDR در حوضه گرگانرود داشتند. روش مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند برای سایر حوضه‌های آبریز به منظور کمی‌سازی نرخ فرسایش کل و میزان رسوب خروجی از حوضه استفاده شود.

واژگان کلیدی: مدل پتانسیل فرسایش، حوضه آبریزگرگانرود، نسبت تحویل رسوب، نمودار مشخصه عملکرد

* **نویسندهٔ مسئول:** smhosseini@ut.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

۱-مقدمه

فرسایش خاک یکی از تهدیدهای اصلی زیست‌محیطی به شمار می‌آید (Amundson et al., 2015) و پیش‌بینی می‌شود که تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی به‌طور قابل توجهی افزایش یابد (Borrelli et al., 2022). این پدیده به‌طور گسترده‌ای در تمام نقاط زمین رخ می‌دهد و به‌عنوان یکی از جدی‌ترین مسائل جهانی شناخته می‌شود. نرخ جهانی فرسایش خاک به‌طور تقریبی ۱۰/۲ تن در هکتار در سال تخمین زده می‌شود (Panagos et al., 2020)، در حالی که نرخ تجدید خاک به‌طور قابل توجهی کمتر از ۰/۶ تن در هکتار در سال برآورد می‌شود (Brannigan et al., 2022).تحقیقات و پروژه‌های مختلف نشان داده‌اند که تغییرات در الگوهای کاربری زمین عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است. افزون بر این، عوامل طبیعی نیز در تغییرات کاربری‌زمین نقش دارند، از جمله سنگ‌شناسی، هیدرولوژی، توپوگرافی، آب و هوا و خاک‌شناسی(Bagherzadeh & Daneshvar, 2010). با وجود تلاش‌های اخیر سازمان ملل متحد، هنوز هیچ برنامه هماهنگ و فراملی برای نظارت بر فرسایش خاک وجود ندارد. در بسیاری از مناطق جهان، نظارت منظم بر فرسایش خاک صورت نمی‌گیرد و به‌جای آن، مدل‌سازی جهانی به‌کار می‌رود. این مدل‌سازی می‌تواند به درک بهتر میزان فرسایش خاک و اثرات آن بر محیط زیست کمک کرده و در طراحی اقدامات حفاظتی وکاهش‌دهنده مؤثر واقع شود (Borelli et al., 2020). در حال حاضر، دانش ما در زمینه دینامیک فرسایش خاک عمدتاً بر اساس مدل‌هایی است که با وجود محدودیت‌هایشان، به‌عنوان ابزارهای مؤثری شناخته می‌شوند و به‌طور گسترده توسط مالکان مختلف برای مدیریت اراضی و دستیابی به اهداف حفاظت از خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chen et al., 2023). مدل‌های فرسایش خاک در مقیاس بزرگ می‌توانند برای شناسایی نواحی مستعد فرسایش در سطح جهانی به‌کار روند و اطلاعات مفیدی را برای بهینه‌سازی اقدامات حفاظتی ارائه دهند (Montgomery et al., 2007). با این حال، باید توجه داشت که بسیاری از مدل‌های فرسایش خاک که امروزه استفاده می‌شوند، در ابتدا برای ارزیابی‌های محدود یا بر اساس داده‌های تجربی خاص توسعه یافته‌اند (Renard, 1997). بنابراین، این مدل‌ها نیاز به ارزیابی و آزمایش دقیق دارند. به‌طور کلی، این مدل‌ها ابزارهای مناسبی برای برآورد میزان رواناب و رسوب در حوضه‌های آبریز هستند. از میان روش‌ها و مدل‌های تجربی ارائه‌شده، شاملFAO، Bureau of Land Management، Erosion Potential Method و Pacific South West Inter Agency Committee ، مدل‌های تجربی EPM و PSIAC بیشتر مورد توجه کارشناسان و محققان قرار گرفته‌اند (Moradi et al., 2015). نام اصلی مدل EPM که امروزه در محیط‌های GIS مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش Gavrilovic است که به نام اسلوبودان گاوریلوویچ نام‌گذاری شده است. گاوریلوویچ این روش پیش‌بینی را در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ بر اساس تحقیقات میدانی در یوگسلاوی سابق توسعه داد (Gavrilovic et al., 2008). مدل EPM با استفاده از داده‌های تجربی میدانی از حوضه آبریز رودخانه موراوا در صربستان، که دارای آب و هوای قاره‌ای با بیشترین و کمترین دما در تابستان و زمستان به ترتیب است، توسعه و کالیبره شد (Gavrilovic, 1988).

طبق گزارش Micki´c Ponjiger و همکاران (۲۰۲۳)، در دهه ۱۹۸۰، نقشه‌های فرسایش برای کشورهای یوگسلاوی سابق به‌کمک قضاوت تخصصی بر اساس داده‌های میدانی و نقشه‌های تولید شده با استفاده از مدل پتانسیل فرسایش (EPM) تهیه شد (Gavrilovic, 1972). این مدل به‌عنوان یکی از مقبول‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های تجربی شناخته شده است و در منطقه بالکان، جنوب و جنوب شرق اروپا، همچنین در خاورمیانه، شمال آفریقا و بخش‌هایی از آمریکای جنوبی کاربرد داشته است. در نتیجه، مدل EPMبه‌ویژه در مناطق مدیترانه‌ای مانند کشورهای یوگسلاوی سابق، شمال آفریقا، ایتالیا و یونان به‌طورگسترده‌ای استفاده شده است

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

(Aleksova et al., 2023). مدل EPM به‌عنوان یک روش نیمه‌کمی ساختاریافته، فرسایش خاک را با بازده رسوب (مانند فرسایش خالص) مرتبط می‌کند و بر اساس مفهوم تحویل رسوب عمل می‌کند(Durán Zuazo et al., 2006). این مدل انواع مختلف فرآیندهای فرسایشی ناشی از آب، از جمله فرسایش ورق، شیار، بین‌رودی و خندقی، و همچنین برخی فرآیندهای دیگر مانند ریزش خاک و فرسایش کرانه را در بر می‌گیرد. با این حال، این مدل قادر به در نظر گرفتن مواد واریزه‌ای که توسط حرکات توده‌ای بزرگ مانند سیلاب‌های واریزه یا زمین‌لغزش‌های عمیق همراه می‌شوند، می‌باشد. بنابراین، مدل EPM محدود به فرسایش ورق و شیار نمی‌شود و در این زمینه تفاوت‌هایی با مدل‌های نوع USLE دارد (Renard, 1995). این مدل در برخی از حوضه‌های‌آبریز ایران مورد آزمایش قرارگرفته و نتایج خروجی آن با مشاهدات میدانی هم‌خوانی دارد. مدلEPM، که بر مبنای فاکتورها عمل می‌کند، به این معنی است که مجموعه‌ای از عوامل، هر یک به‌طور کمی فرآیندها و تعاملات مختلف را ترکیب کرده تا تخمینی کلی از میزان فرسایش خاک ارائه دهد (Gavrilovic, 1988). مدل EPM یک مدل توزیع‌شده پارامتریک برای ارزیابی شدت فرسایش و تخمین رسوب سالانه کل در یک حوضه آبریز است. این مدل به طور کلی چهار عامل اصلی را در نظر می‌گیرد که شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاک، ویژگی‌های توپوگرافی، عوامل اقلیمی (از جمله میانگین بارندگی سالانه و میانگین دمای سالانه) و کاربری زمین می‌شود (Elhag & Bahrawi, 2014). مدل پتانسیل فرسایش (EPM) یکی از مدل‌های پیش‌بینی و برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌هاست که بر اساس عوامل مختلف عمل می‌کند. این مدل با ترکیب عوامل گوناگون که هرکدام فرآیندها و برهم‌کنش‌های مربوط به آن‌ها را کمیت‌سنجی می‌کنند، یک تخمین کلی از دست رفتن خاک را ارائه می‌دهد (Van der Knijff et al., 2000). مدل EPM نه‌تنها میزان تولید فرسایش ناشی از فرسایش ورقه‌ای یا شیاری را پیش‌بینی می‌کند، بلکه تلفات اضافی خاک ناشی از فرسایش آبکند، باد یا خاک‌ورزی را نیز در نظر می‌گیرد(Van Oost et al., 2000). از دیگر مزایای مدل EPM می‌توان به دقت قابل قبول، ساختار ساده، نیاز به داده‌های ورودی کم و قابلیت ارتباط با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) اشاره کرد که امکان تجسم مناطق مستعد فرسایش را فراهم می‌آورد (Panagos et al., 2020).

با توجه به وضعیت تخریب منابع طبیعی تجدیدپذیر در ایران، که به دلایل مختلف از جمله افزایش جمعیت و فشار بیش از حد بر این منابع به وجود آمده است، خسارات جبران‌ناپذیر آن هر ساله افزایش می‌یابد. روند فزاینده سیل‌ها نشان می‌دهد که این سیل‌ها علاوه بر ایجاد خسارات جانی و مالی، خاک‌های حاصلخیز را شسته و به حوضه‌ها و دریاها منتقل کرده‌اند. از سال ۱۳۳۰ تا ۱۳۹۰، فرسایش خاک حدود ۴۵۰ درصد رشد داشته که این وضعیت نشان‌دهنده یک فاجعه بزرگ در کشور است. حوضه آبریز گرگانرود در استان گلستان به دلیل شرایط توپوگرافی و بافت خاک در طی سال‌های گذشته متحمل فرسایش شدید در برخی مناطق شده است. این فرسایش به دلایل مختلفی رخ داده که یکی از آن‌ها تغییرات در کاربری زمین و ضعف مدیریت منابع آب و خاک است (Safari et al., 2018). در این راستا، محققان متعددی به بررسی و تحلیل فرسایش و رسوب‌گذاری در این منطقه با استفاده از مدل پتانسیل فرسایش پرداخته‌اند. مطالعات انجام‌شده، از جمله کارهای Mosaadi و همکاران (2009)، به برآورد میزان رسوب خروجی از حوضه آبریزگرگانرود پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده همگن بودن داده‌های دبی متوسط روزانه ایستگاه تمر بود. همچنین، در تحقیقی توسط Mohammadi و همکاران (2007)، بهترین روش برای برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی بررسی شد. در تحقیق دیگری، Mansouri & Kabousi (2013) به پهنه‌بندی شدت فرسایش در حوضه گلیداغ استان گلستان با استفاده از مدل EPM پرداختند. نتایج نشان داد که شدت فرسایش در کل حوضه برابر با۰/۷۳ (شدید) است. همچنین، Khodabakhshi و همکاران (2010) به ارزیابی فرسایش‌پذیری واحدهای سنگی و تولید رسوب با استفاده از مدل EPM پرداختند و نشان دادند که روش اندیس

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

فرسایش به واقعیت نزدیک‌تر است. Veličković و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل EPM و تکنیک‌های GIS، بدون مشاهدات میدانی، نقشه‌های فرسایش برای سال‌های ۱۹۷۰ و ۲۰۱۸ را تهیه کردند و کاهش قابل توجهی در تلفات خاک را مشاهده کردند. در حال حاضر، ارزیابی‌های مدل‌سازی فرسایش خاک در مقیاس وسیع به‌عنوان منبع معتبر برای بسیاری از مناطق در معرض خطر جهت پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های سیاستی و اجرای استراتژی‌های کاهش فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه، استفاده از مدل‌های چندگانه فرسایش خاک، به‌ویژه مدل‌هایی که قابلیت بررسی انواع مختلف فرآیندهای فرسایش را دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی کاربرد مدل پتانسیل فرسایش (EPM) در ترکیب با سه معادله نسبت تحویل رسوب انتخابی در حوضه‌آبریز گرگانرود و ارائه شواهد علمی با استفاده از این مدل برای تعیین میزان فرسایش خاک، بررسی توزیع فضایی آن و فراهم کردن اطلاعات دقیق‌تر درباره میزان فرسایش خاک در مناطق آسیب‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

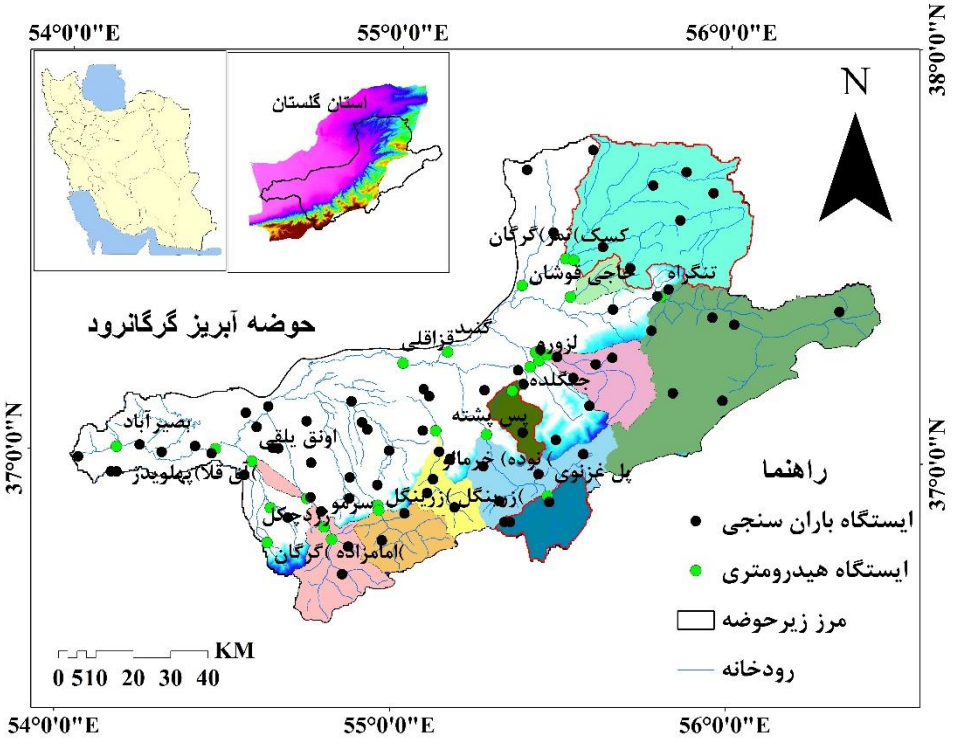
معرفی منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در حوضه آبریز رودخانه گرگانرود، واقع در استان گلستان (شکل ۱)، انجام شده است و بر تحلیل تأثیر شرایط ژئومورفولوژیکی مختلف بر فرآیندهای فرسایش و نرخ فرسایش تمرکز دارد. حوضه آبریز گرگانرود با مساحتی معادل ۱۰۱۹۷ کیلومتر مربع، یکی از حوضه‌های بزرگ شمال شرق کشور است که بخش وسیعی از آن در استان گلستان واقع شده است. بخش جنوبی منطقه مورد بررسی با کوه‌های البرز شرقی، از شرق کوه‌های آلاداغ و گلیداغ، از شمال حوضه آبریز اترک، از غرب دریای خزر و حوضه آبریز قره‌سو محدود شده است (Shahreza et al, 2009). میانگین دبی سالانه رودخانه گرگانرود در ایستگاه تمر-گرگان ۱۲ مترمکعب بر ثانیه است که باعث افزایش۱۲درصدی آبدهی رودخانه گرگانرود نسبت به داده‌های درازمدت شده است. رژیم هیدرولوژیکی این رودخانه‌ها با دبی زیاد و سیلاب‌های ناگهانی در بهار (به دنبال بارندگی زیاد و ذوب برف) و دبی کم در پاییز و تابستان مشخص می‌شود. رژیم جریان رودخانه ارتباط نزدیکی با تغییرات آب و هوایی دارد، به‌طوریکه میانگین سالانه بارش درحوضه از حدود ۳۰۰ میلی‌متر در کناره‌های جنوبی و شمالی حوضه تا ۱۰۰۰ میلی‌متر در بخش مرکزی آن متغیر است. میانگین سالانه دما در این حوضه از حدود ۱۷ درجه سانتیگراد در نواحی کم ارتفاع تا ۷/۵ درجه سانتیگراد در ارتفاعات جنوبی متغیر می‌باشد. نشان‌دهنده نوسان و تنوع اقلیمی منطقه است. عامل برف نقش مهمی در تأمین جریان رودخانه‌ها در فصل بهار ایفا می‌کند (Sandu et al, 2008).

این حوضه کوهستانی به دلیل تنوع شرایط بیوفیزیکی، فعالیت شدید تکتونیکی و گسترش سازندهای سنگی حساس به فرسایش، دارای پتانسیل خطر نسبتا زیاد فرسایش خاک و تولید رسوب است. آثار ژئومورفولوژیکی این شرایط، در قسمت‌های مختلف حوضه آبریز به ویژه در مسیر آبراهه‌ها به وضوح قابل مشاهده است (Onogh & Nahtani, 2004). منطقه مورد مطالعه عمدتاً شامل رخنمون‌های سنگی، رس، لومی، لومی_رسی و لایه جدید(تکامل نیافته) است. پارامتر بافت خاک اجازه می‌دهد تا میزان نفوذ آب در خاک را تعیین کند. (Hartemink & Bockheim, 2013). با این حال، نرخ نفوذ کم آب یکی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های رسی (بدلندی) است. بنابراین، بیشتر بارندگی در مناطق دارای خاک رسی به رواناب سطحی تبدیل می‌شود.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]



شکل ۱: مو قعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه

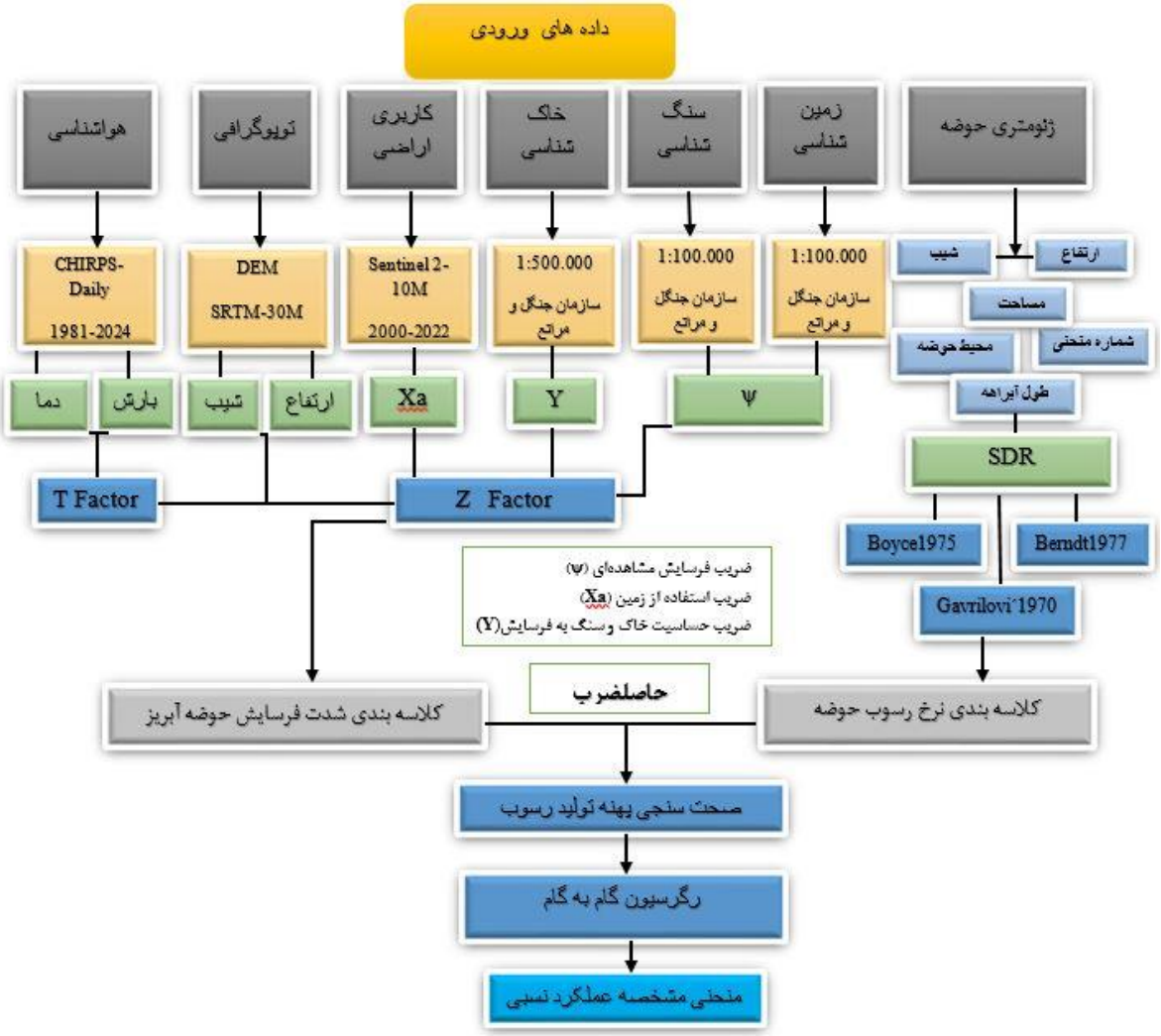
۲- روش تحقیق

برای انجام این مطالعه، از مجموعه‌ای از داده‌های مکانی و هیدرومتری جهت مدل‌سازی فرسایش و رسوب در حوضه آبریز گرگانرود استفاده شده است. این داده‌ها شامل داده‌های هواشناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، ژئومورفولوژی حوضه و داده‌های هیدرومتری است. داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه از مجموعه داده‌های CHIRPS با وضوح مکانی۰/۰۵ درجه برای دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۴ بوده که جهت محاسبه عوامل بارش و تحلیل تغییرات اقلیمی بر روی فرسایش و رسوب استفاده شده‌اند. داده‌های توپوگرافی برای تهیه لایه‌هایی نظیر شیب، جهت جریان و ارتفاع از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با وضوح مکانی ۳۰ متر از منبع SRTM استخراج شده و برای تحلیل تأثیر توپوگرافی بر میزان فرسایش و انتقال رسوب مورد پردازش قرار گرفتند. در بخش کاربری اراضی، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با وضوح ۱۰ متر برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ به‌کار گرفته شد تا نقشه‌های کاربری اراضی و تغییرات آن در طی این دوره مشخص گردد و تأثیرات آن بر فرسایش و رسوب مورد بررسی قرار گیرد. نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵،۰۰۰ برای تعیین نوع سنگ و سازندهای زمین‌شناسی منطقه استفاده شده که نقشی کلیدی در تعیین مقاومت لایه‌های زمین در برابر فرسایش داشتند. همچنین، نقشه‌های خاک‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰،۰۰۰ جهت تعیین خصوصیات خاک نظیر نفوذپذیری و نوع بافت خاک استفاده شد تا تأثیر این خصوصیات بر فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری مورد ارزیابی قرارگیرد. ویژگی‌های ژئومورفولوژی حوضه شامل نقشه‌های شیب، جهت شیب، طول آبراهه، محیط حوضه، مساحت و شماره منحنی استخراج و طبقه‌بندی شدند که بر اساس مطالعات پیشین، در محاسبه میزان انتقال رسوب و ضریب نسبت انتقال رسوب (SDR) به‌کار رفته‌اند. داده‌های هیدرومتری شامل اطلاعات رسوب ویژه ۱۱ ایستگاه هیدرومتری زیرحوضه بودندکه از تقسیم متوسط رسوب روزانه بر مساحت

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

حوضه به‌دست آمد و برای دوره زمانی ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۶ محاسبه شدند. این داده‌ها به‌عنوان مرجعی برای بررسی صحت مدل و میزان تطابق آن با واقعیت‌های میدانی استفاده گردید.

در مرحله تجزیه و تحلیل، داده‌های به‌دست آمده جهت ارائه یک رابطه ریاضی برای نسبت تحویل رسوب، با استفاده از متغیرهای مختلف نظیر مساحت، محیط، شماره منحنی، طول آبراهه، بارش، دما، اختلاف ارتفاع و شیب متوسط زیرحوضه‌ها، در رگرسیون گام‌به‌گام قرار گرفتند. سپس تمامی داده‌ها در محیط GIS و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف شامل ArcGIS 10.8، Global Mapper 13، SAGA GIS، SPSS و Google Earth Engine پردازش شدند (شکل ۲).



شکل ۲: روند نمای مراحل انجام پژوهش

۲-۱-مدل پتانسیل فرسایش برای تخمین نرخ فرسایش

در این تحقیق، برای برآورد شدت فرسایش و پتانسیل رسوب‌دهی در حوضه و زیرحوضه‌های گرگانرود، از مدل EPM به عنوان یکی از روش‌های مناسب برآورد فرسایش خاک، به همراه تکنیک‌های RS و GIS استفاده شده است. پس از وارد کردن نقشه‌ها به نرم‌افزار ARC GIS و تنظیم زمین مرجع، لایه‌های دیجیتال و پایگاه داده‌های لازم ایجاد شد. با استفاده از مدل EPM، عوامل مؤثر در

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

فرسایش در حوضه و زیرحوضه‌ها ارزیابی و امتیازدهی شدند. این مدل که در واقع ضریب شدت فرسایش است، شامل چهار عامل می‌باشد: ضریب فرسایش حوضه(ψ)، ضریب کاربری اراضی(Xa)، ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش(Y) و شیب متوسط حوضه آبریز (I). این عوامل در زیرحوضه‌های مختلف و در نهایت در کل حوضه مورد بررسی قرارگرفتند. بر اساس این چهار عامل، مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش، متوسط سالانه رسوب ویژه (میزان رسوب تولید شده در واحد سطح) و مقدار رسوب تولید شده در طول سال برای هر زیرحوضه و نهایتاً درکل حوضه محاسبه گردید.

برای سهولت و دقت کار در به دست آوردن میزان فرسایش و تولید رسوب، ابتدا کل حوضه آبریزگرگانرود به ۱۱زیر حوضه تقسیم شد سپس عوامل موثر در تولید رسوب در هریک از زیر حوضه ها مورد بررسی قرار گرفت در مرحله آخر میزان فرسایش و تولید رسوب با استفاده از ضرایب و فرمول های مربوطه به دست آمد که به بررسی هریک از عوامل چهارگانه خواهیم پرداخت.

ضریب فرسایش مشاهده‌ای (ψ)

ضریب فرسایش مشاهده‌ای نمایانگر وضعیت ظاهری فرسایش در یک حوضه آبریز است. تعیین این ضریب از طریق تحلیل نقشه‌های ژئومورفولوژی حوضه انجام می‌شود.

ضریب استفاده از زمین (Xa)

این ضریب به نوع کاربری اراضی اختصاص دارد و امتیازهای مربوط به کاربری‌های مختلف در زیرحوضه‌ها از نقشه کاربری اراضی استخراج می‌شود. نقشه‌کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ متعلق به سال ۲۰۲۱ تهیه شده است. با توجه به ضریب استفاده از زمین و نقشه‌کاربری، میزان این ضریب در هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه و نتایج در جدول مربوطه نشان داده شده است.

ضریب حساسیت خاک و سنگ به فرسایش(Y)

ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها نسبت به اثرات اقلیمی و زیستی تأثیرگذار هستند (Mahmmudi, 2004). به عبارت دیگر، سنگ‌ها و رسوبات سطح زمین از نظر مقاومت به فرسایش درکلاس‌های مختلفی قرار می‌گیرند. بنابراین، برای برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در مدلEPM، ارزیابی حساسیت سنگ‌ها در منطقه مورد مطالعه ضروری است. نقشه‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی منطقه با مقیاس۱:۱۰۰۰۰۰دیجیتال‌شده و با استفاده از نرم‌افزار ARCGISتحلیل شده‌اند. براساس امتیازدهی، حساسیت سنگ‌ها در زیرحوضه‌های مختلف و در نهایت در کل حوضه تعیین و نتایج نمایش داده شده است.

شیب متوسط حوضه (I)

برای استخراج پارامتر شیب، نقشه مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار ARCGIS مورد استفاده قرارگرفته و نقشه درصد متوسط شیب تولید شده است.

با توجه به چهار عامل محاسبه‌شده در مراحل قبلی، مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش برای هر زیرحوضه و در نهایت برای کل حوضه با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردیده است (Ts & Gruev, 2002):

$$Z = Y . X_a \, (\psi + I^{0.5})$$ رابطه ۱

ش و ضریب شدت

فرسایش (Z) تنظیم شده است طبقه فرسایشی هر یک از زیر حوضه‌ها مشخص می‌شود و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

جدول۱- طبقه‌بندی شدت فرسایش (Gavrilovic et al., 2008)

کلاس فرسایش	شدت فرسایش	محدوده Z	مقدار متوسط Z
V	خیلی شدید	>۱	**۱/۲۵**
IV	شدید	۱ > Z > ۰/۷۱	**۰/۸۵**
III	متوسط	۰/۷ >Z > ۰/۴۱	**۰/۵۵**
II	کم	۰/۴ > Z > ۰/۲	**۰/۳**
I	خیلی کم	Z <۰/۱۹	**۰/۱**

در مدل EPM برای تخمین متوسط سالانه فرسایش ویژه که در حقیقت میزان فرسایش را در واحد سطح حوضه نشان می‌دهد از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Kostadinov et al., 2017).

رابطه ۲
$$W_{sp} = T.H.\boldsymbol{\pi}.Z^{1.5}$$

که در آن W_{sp}: متوسط سالانه فرسایش ویژه بر حسب مترمکعب در کیلومتر مربع در سال، H: ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه بر حسب میلی متر، $\boldsymbol{\pi}$: عدد ثابت پی ۳,۱۴ و T: ضریب درجه حرارت می‌باشد که از رابطه ۳ به دست می‌آید (Gavrilovic, 1988).

رابطه ۳
$$T = [(t/10) + 0.1]^{0.5}$$

که در آن T: میانگین سالانه دمای هوا است (^{0}C). رابطه (۳) فقط برای T بالای ^{0}C 1- معتبر است. t: میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این بدان معنی است که EPM را نمی‌توان برای مناطق قطبی، بخش‌های بزرگی از مناطق آب و هوایی قاره‌ای و برای رشته کوه‌های مرتفع مانند هیمالیا که در آن میانگین دمای سالانه می‌تواند زیر ^{0}C 1- نیز باشد، اعمال شود. لازم به ذکر است که چندین ماژول اضافی مانند روشی برای طبقه‌بندی تورنت توسعه داده شد. متوسط فرسایش ناخالص سالانه خاک [m3] (W_s) به دلیل چندین فرآیند فرسایش (به عنوان مثال، فرسایش ورق، شیار، خندق، فرسایش کرانه‌ایی) و ریزش‌های کوچکتر خاک را می‌توان به صورت زیر (رابطه ۴) محاسبه کرد (Gavrilovic et al, 2008)

رابطه ۴
$$W_s = W_{sp} * A$$

مقدار W_s: فرسایش کل حوضه بر حسب متر مکعب در سال و A: مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع می باشد. W_{sp}: محاسبه شده در رابطه فوق بیانگر مقدار رسوبی است که از بستر خود جدا شده و انتقال یافته است، اما همه این مواد فرسایش یافته به خروجی حوضه نمی‌رسد و آن مقدار خاک فرسایش یافته که به رسوب خروجی تبدیل خواهد شد بستگی به متغیرهای مختلفی دارد که در واقع بر نسبت رسوب دهی حوضه تاثیر می‌گذارند (Bazzoffi, 1985).

بسیاری از مدل‌های منطقه‌ای برآورد فرسایش، تغییرپذیری مکانی رسوب رسیده به آبراهه را مورد بررسی قرار نمی‌دهند. بدین منظور باید از ضریب یا شاخصی برای تبدیل میزان فرسایش خاک به رسوب خارج شده از حوضه استفاده کردکه این شاخص به ضریب تحویل رسوب مشهور است (Wischmeier & Smith, 1987). نسبت تحویل رسوب برای تعیین رسوب حمل شده به آبراهه‌ها استفاده می‌شود(Arnold c et al., 1998). نسبت تحویل رسوب در جایی استفاده می‌شود که بیشتر رسوب تولیدی به وسیله فرسایش درون حوضه آبریز انباشته می‌شود و تنها بخشی از آن به سیستم آبراهه خواهد رسید و از حوضه آبریز خارج می‌شود

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

(Walling, 1983). نسبت تحویل رسوب درصدی از فرسایش ناخالص است که از یک حوضه آبریز معین در یک زمان تمرکز مشخص منتقل می‌شود (Park et al., 2010). نسبت تحویل رسوب یک فاکتور مقیاسی است که میزان فراهمی رسوب را در مقیاس مکانی بازگو می‌کند (Lu et al., 2006).

به منظور معرفی روش‌ها و روابط موجود در زمینه نسبت تحویل رسوب، با بررسی منابع در دسترس و اصل مقالات روش‌ها و روابط استخراج و همراه توضیحات ضروری هریک، به ترتیب ارائه شد. سپس با توجه به معادلات مختلف به انواع SDRهای را به کار گرفته شده پرداخته می‌شود:

1-نسبت تحویل رسوب گاوریلوویچ (SDR_G)

گاوریلوویچ معادله‌ای را برای تخمین نسبت تحویل رسوب ارائه‌کرد که بر اساس ویژگی‌های حوضه است (Gavrilovic, 1970) و می‌توان از آن برای محاسبه نرخ خالص فرسایش با در نظر گرفتن نرخ ناخالص از رابطه (۵) استفاده کرد:

رابطه۵)

$$SDR_G = \frac{\sqrt{P * D}}{0.25 * (L + 10)}$$

که در آن P: محیط حوضه بر حسب کیلومتر، L: طول آبراهه اصلی به کیلومتر، D: متوسط اختلاف ارتفاع در سطح حوضه بر حسب کیلومتر که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

رابطه ۶)

$$D=D_{av}-D_0$$

که در آن D_{av}: ارتفاع متوسط حوضه بر حسب کیلومتر D_0 :ارتفاع نقطه خروجی در رودخانه بر حسب کیلومتراست. با این حال، تعریف متغیر D در رابطه ۶ به وضوح مشخص نشده است. برخی از پژوهشگران آن را به عنوان میانگین ارتفاع حوضه تعریف کرده‌اند (Durán Zuazo et al., 2006)، در حالی که دیگران آن را به عنوان اختلاف بین حداکثر و دو برابر حداقل ارتفاع حوضه (Efthimiou et al., 2016) مطرح کرده‌اند. برخی نیز D: را به عنوان تفاوت بین ارتفاع متوسط و حداقل در نظر گرفته‌اند (Lense et al., 2020).

در این مطالعه، از رابطه ۶ برای محاسبه متغیرD استفاده شده است. از جمله محدودیت های رابطه ۵، تخمین نسبتSDR بزرگتر از یک را برای جریان‌های با گرادیان بالا است.

رسوب ویژه (G_{SP}) بر حسب مترمکعب در سال در کیلومتر مربع از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Gavrilovic, 1988):

رابطه ۷)

$$G_{SP}=W_{SP}*SDR$$

با ضرب نمودن مساحت حوضه آبریز بر حسب کیلومتر مربع در رابطه ۷، مقدار رسوب کل حوضه بر حسب مترمکعب در سال به دست می‌آید:

رابطه ۸)

$$Gs=G_{SP}*A$$

لازم به ذکر است که ضریب Z نیز می‌تواند برای طبقه‌بندی فرسایش و شناسایی نقاط حساس فرسایش در حوضه‌های‌آبریز بزرگ استفاده شود (Gavrilovic et al., 2008).

۲- نسبت تحویل رسوب ویلیامز-برنت (SDR_{WB})

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

ویلیامز و برنت (۱۹۷۵) روشی را برای محاسبه نسبت تحویل رسوب بر مبنای مساحت و ویژگی‌های فیزیوگرافی و هیدرولوژی حوضه آبریز ارائه نمود:

$$\mathbf{SDR_{WB}} = 1.37*10^{-11} *A^{-0.00998} *CN^{5.44}*(R/L)^{0.363}$$ رابطه۹)

که در آن A: مساحت حوضه (کیلومترمربع)، R: تفاوت در ارتفاع حوضه(متر)، L: طول حوضه (کیلومتر) و CN: شماره منحنی است (Walling, 1983). پارامتر CN اغلب در مطالعات هیدرولوژیکی بارش-رواناب استفاده می شود و ویژگی‌های رواناب حوضه را توصیف می‌کند (Zema et al., 2017). لازم به ذکر است که در محاسبات از پارامتر میانگین CN استفاده شده است(Jafari Ardakani et al., 2019).

ولی باید توجه داشت که بطور کلی بین فرسایش و رسوب تفاوت وجود دارد. فرسایش شامل موادی است که از سطح حوضه جدا می‌شوند، اما همهٔ مواد فرسایش یافته به رسوب تبدیل نمی‌شوند، زیرا رسوب شامل موادی است که حمل شده و به یک ایستگاه رسوب سنجی در خروجی حوضه می‌رسند.

۳- نسبت تحویل رسوب بویس (SDR_B)

بویس (۱۹۷۵) روشی را برای محاسبه تخمین نسبت تحویل رسوب بر مبنای مساحت حوضه آبریز ارائه نمود (رابطه ۱۰):

$$\mathrm{SDR_B} = 0.41 * \mathrm{A}^{-0.3}$$ رابطه۱۰)

که در آن SDR: نسبت تحویل رسوب و A: مساحت حوضه آبریز براساس کیلومتر مربع است.

بازده رسوب (G)را می توان به صورت G = SDR*Z محاسبه کرد. که در آن SDR: ضریب رسوب‌دهی و Z ضریب فرسایش حوضه می‌باشد(Pintar et al.,1986).

صحت سنجی نقشه پتانسیل فرسایش و تولید رسوب

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل تولید رسوب، از نتایج متوسط رسوب ویژه ایستگاه هیدرومتری در ۱۱ زیرحوضه استفاده شد. این نتایج با تقسیم متوسط رسوب روزانه بر مساحت حوضه به دست آمده‌اند. همچنین، عوامل مؤثر در تولید رسوب در هر یک از زیرحوضه‌ها برای ارزیابی میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبریز گرگانرود مورد بررسی قرار گرفتند. و از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) برای تأیید صحت پیش‌بینی‌ها استفاده شد (شکل ۶). در این راستا، مقادیر Specificity و Sensitivity با استفاده از رابطه‌های (۱۲ و ۱۱) زیر محاسبه می‌شوند (Pourjavad & Shirouyehzad, 2011):

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{FP + TN}$$ رابطه۱۱)

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN}$$ رابطه ۱۲)

که در آن:

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

- TN:تعداد مناطق بدون رسوب که به‌درستی تشخیص داده شده‌اند.
- FP:تعداد نقاط رسوب که اشتباه تشخیص داده شده‌اند.
- TP:تعداد نقاط رسوب که به‌درستی تشخیص داده شده‌اند.
- FN:تعداد نقاط بدون رسوب که اشتباه تشخیص داده شده‌اند. برای نشان دادن عملکرد هر یک از مدل‌ها از شاخص آماری صحت (Accuracy) نیز استفاده شد. این شاخص نسبت نقاط رسوب‌گیر و بدون رسوب را که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند در رابطه ۱۳ نشان می‌دهد.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$ رابطه ۱۳)

۳-۱-مدل رگرسیون گام به گام برای تخمین نسبت تحویل رسوب (SDR)

در این پژوهش از رگرسیون چند متغیره گام به گام به عنوان یک تکنیک کاهش دهنده عوامل، جهت انجام تحلیل رگرسیون استفاده شد. این روش اثر چندین متغیر مستقل روی یک متغیر وابسته را بررسی می‌کند. در رگرسیون چند متغیره گام به گام، متغیر مستقلی که تأثیر محسوس‌تری در ارتباط با متغیر وابسته ندارد از تحلیل حذف و به معادله وارد نمی‌گردد (Zhang et al., 2015). یکی از شرایط استفاده از رگرسیون چند متغیره گام به گام در تجزیه و تحلیل داده‌ها، عدم وجود هم خطی چندگانه بین متغیرهای مستقل است که در این پژوهش با استفاده از عامل تورم واریانس بررسی شد (Faghfouri et al., 2017). در این پژوهش ویژگی ژئومورفیک برای ۱۱زیرحوضه مورد مطالعه به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد و ضمن شناسایی مهمترین ویژگی‌های ژئومورفیک موثر در میزان رسوب خروجی زیرحوضه‌ها، رابطه پیش‌بینی مقدار نسبت تحویل رسوب توسط موثرترین پارامترها تعیین شد.

۳- نتایج

در حوضهٔ آبریز گرگانرود به دلیل شرایط آب وهوایی، نوع سازندهای زمین شناسی، شیب و دخالت‌های انسان، دو نوع فرسایش طبیعی و تشدیدی (مخرب) مشاهده می‌شود. فرسایش طبیعی شامل فرسایش مکانیکی و فرسایش تشدیدی شامل فرسایش‌های سطحی، شیاری، خندقی، آبراهه‌ای و رودخانه‌ای است. همچنین در بیشتر واحدهای کاری، همهٔ انواع فرسایش قابل مشاهده است.

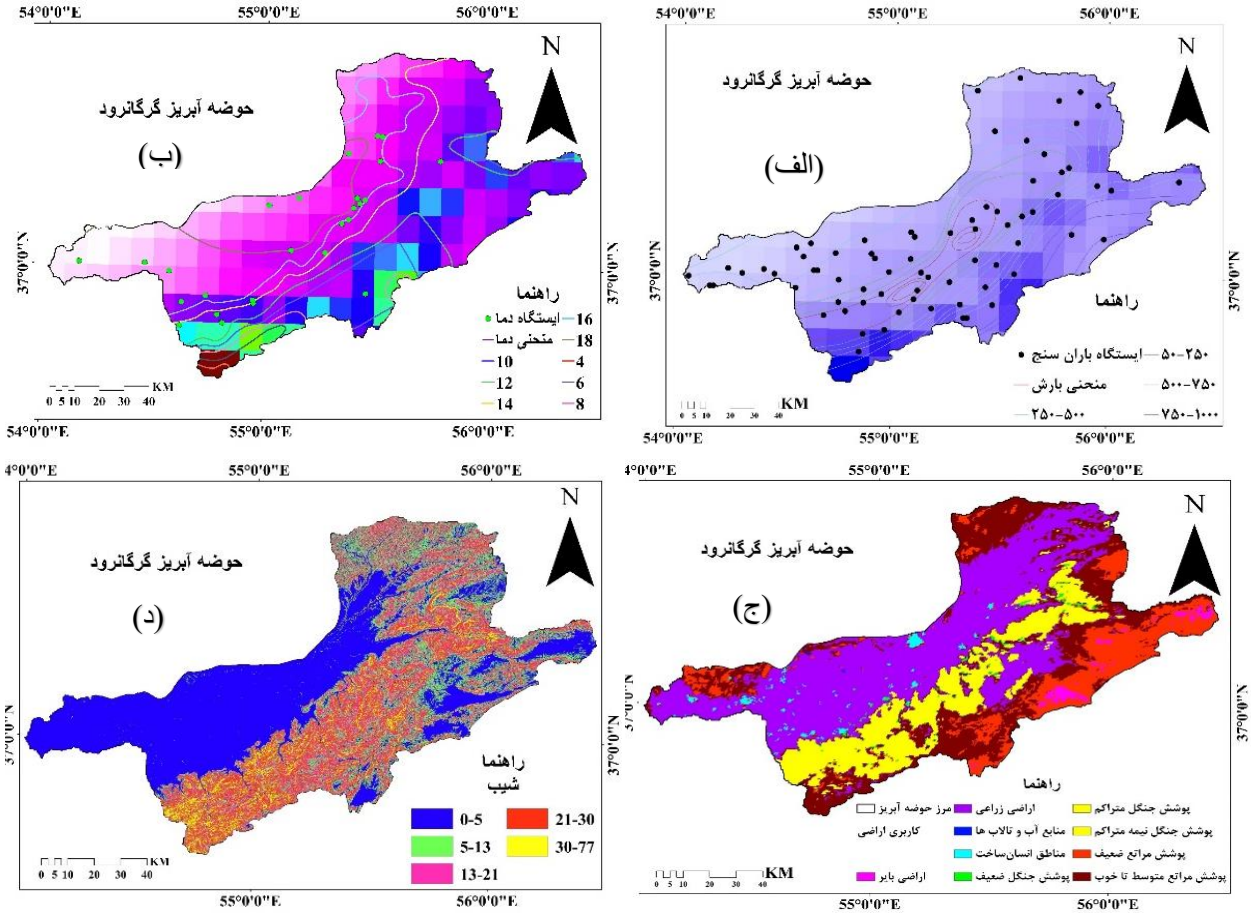
۳-۱- پارامترهای شرایط محیطی بر فرسایش و رسوب

نتایج مدل EPM نشان می‌دهد که شرایط محیطی حوضه‌گرگانرود تأثیر قابل‌توجهی بر میزان فرسایش و تولید رسوب دارد. به‌طور خاص، رژیم بارندگی و اقلیم حوضه به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر، نقش عمده‌ای در فرسایش و رسوب‌زایی ایفا می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بارندگی‌های شدید و کوتاه‌مدت، به‌ویژه در فصول سرد سال که بارش‌ها با برف همراه می‌شود، موجب افزایش رواناب سطحی و تشدید فرسایش خاک می‌گردد (شکل ۳، الف و ب). شیب‌های تند حوضه، به‌ویژه در زیرحوضه‌هایی مانند سرمه‌رود که شیب آن بیش از ۴۰ درصد است، به‌عنوان یکی از عوامل مهم در تشدید فرسایش شناخته شد. به‌طورکلی، میانگین شیب کل حوضه برابر با ۲۱/۳۹ درصد بوده که به تسریع جریان رواناب و افزایش رسوب‌زایی کمک می‌کند. همچنین، شیب بالای آبراهه اصلی که

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

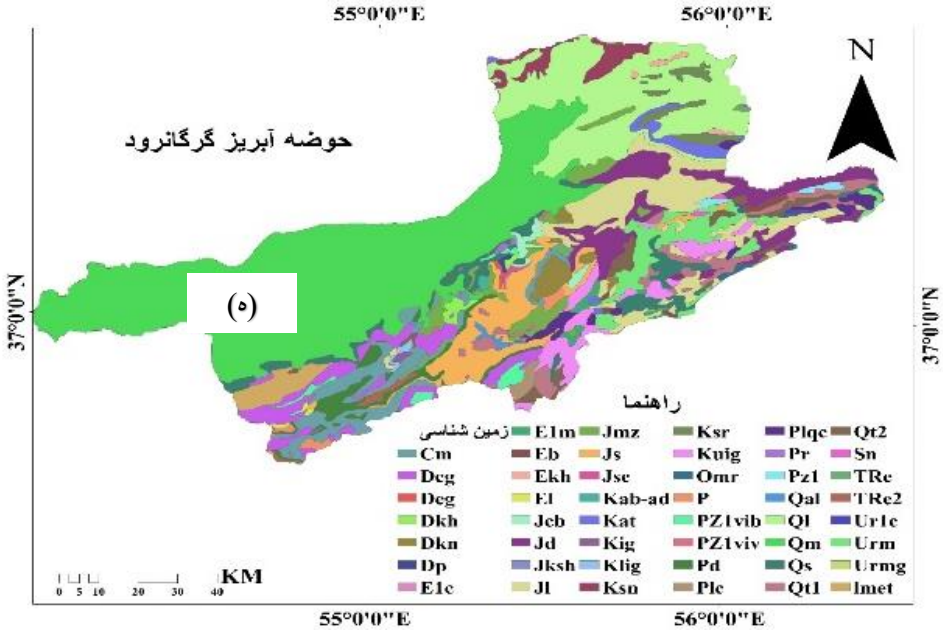
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

در حدود ۱۰ درصد برآورد شد، باعث افزایش زمان تمرکز رواناب و در نتیجه وقوع سیلاب‌های سریع‌تر می‌شود (شکل ۳، ج). در راستای ارتباط با موضوع مورد بررسی باید اشاره نمود که به لحاظ لیتولوژی و سنگ شناسی بخش اعظم حوضه شامل سازندهای مقاوم به فرسایش می‌باشد که بهره برداری‌های غیر اصولی انسان به همراه شرایط اقلیمی حوضه، بارندگی فراوان و انواع هوازدگی‌های موجود آنها را مستعد فرسایش می‌سازد (شکل ۳، د). کاربری‌اراضی و پوشش‌گیاهی نیز نقش کلیدی در کنترل فرسایش دارد. علی‌رغم پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی مناسب در بخش‌هایی از حوضه (حدود ۸۰ درصد)، عواملی نظیر چرا مفرط، شخم نادرست، و تبدیل جنگل‌ها به اراضی‌کشاورزی موجب افزایش فرسایش شده‌اند (شکل ۳، ه).



[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]



شکل ۳-الف) نقشه میزان بارش حوضه آبریز گرگانرود، ب) نقشه درجه حرارت حوضه آبریز گرگانرود، ج) نقشه میانگین شیب به درصد حوضه آبریز گرگانرود، د) نقشه سنگ شناسی حوضه آبریزگرگانرود ، ه) نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز گرگانرود

با این حال، عوامل مختلفی مانند چرای مفرط، عدم رعایت تعادل دام و مرتع، شخم نادرست اراضی، قطع بی‌رویه درختان و بوته‌ها، وتبدیل جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی، به همراه ویژگی‌های خاص مورفولوژی، فیزیوگرافی و توپوگرافی، خاک و زمین‌شناسی، وتأثیرات اقلیمی نظیر پراکنش و شدت بارندگی، موجب شده است که وضعیت فرسایش در حوضه گرگانرود بسیار شدید باشد.

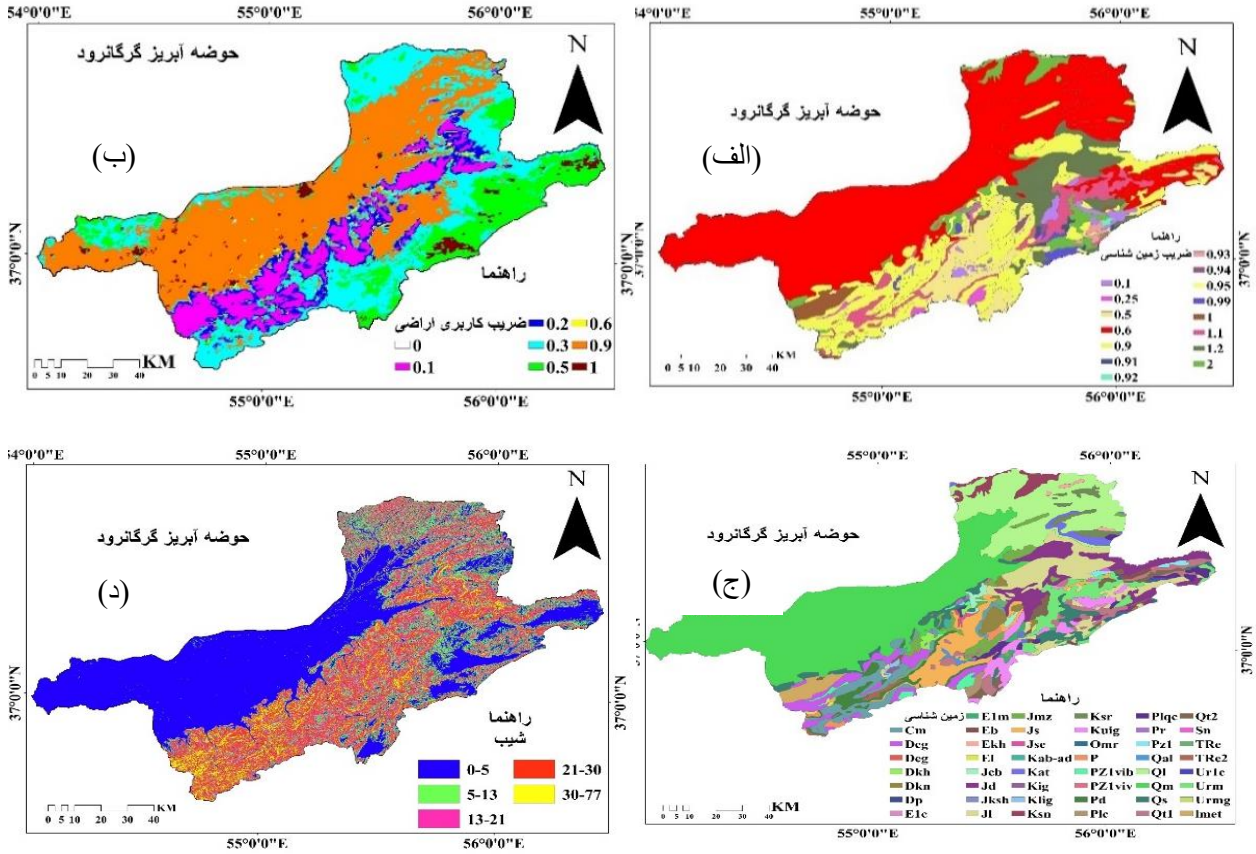
۳-۲- تحلیل ضرایب فرسایش و شدت آن

در مدل‌سازیEPM، میانگین ضرایب فرسایش مشاهده‌ای (شکل ۴، الف)، استفاده از زمین(شکل ۴، ب)، حساسیت سنگ و خاک به فرسایش(شکل۴، ج) و شیب متوسط حوضه (شکل ۴، د) محاسبه و با مقایسه با جدول استاندارد، میزان فرسایش و کلاس آن برای هر یک از زیرحوضه‌ها و در نهایت کل حوضه برآورد شد. طبق جدول(۲)، ضریب شدت فرسایش (Z) در زیرحوضه‌های مورد مطالعه بین ۰/۸۹ (زیرحوضه پل غزنوی) تا ۲۳/۲۴ (زیرحوضه تنگراه) متغیر است. مقدار ضریب Z برای کل حوضه ۲/۹۲ بدست آمد. به طور کلی زیرحوضه های واقع در شمال شرقی و جنوب شرقی دارای ضریب شدت فرسایش بالاتری هستند. در مطالعه‌ای که منصوری و کابوسی با هدف برآورد شدت فرسایش و پهنه‌بندی آن در حوضه آبریز گلیداغ در استان گلستان با استفاده از روش تجربیEPM انجام دادند، به این نتیجه دست یافتند که نتایج نشان دادند که شدت فرسایش در کل حوضه برابر با ۰/۷۳ (شدید) بوده و ۵۸ درصد حوضه دارای فرسایش شدید و ۳۹ درصد دارای فرسایش متوسط است.

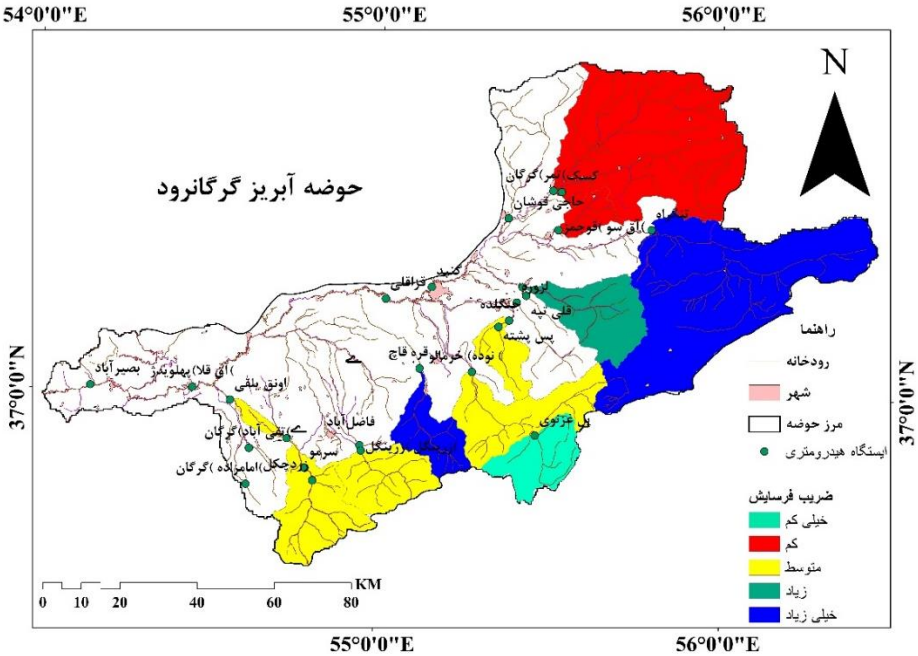
نقشه شدت فرسایش (شکل ۵) نشان داد که در زیرحوضه‌های پل غزنوی وآق‌سوقوچمز، هر یک تنها دارای دو واحد هیدرولوژیکی با شدت فرسایش شدید (IV) هستند، درحالی‌که بقیه زیرحوضه‌ها دارای شدت فرسایش بسیار شدید (V) درتمام واحدهای هیدرولوژیکی خود هستند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]



شکل -۴ الف نقشه ضریب زمین شناسی حوضه آبریز گرگانرود، ب) نقشه ضریب کاربری اراضی حوضه آبریز گرگانرود، ج)نقشه حساسیت سنگ و خاک حوضه آبریز گرگانرود، د) نقشه متوسط شیب حوضه آبریز گرگانرود



شکل ۵ -نقشه شدت فرسایش (Z) در زیرحوضه‌های حوضه آبریز گرگانرود

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

جدول- ۲ فرسایش محاسبه شده برای حوضه و زیرحوضه های آبریز گرگانرود با مدل EPM

ردیف	زیرحوضه ها	ضریب شدت فرسایش (Z)	شدت فرسایش	کلاس فرسایش
۱	پس پشته	2.42	خیلی شدید	**V**
۲	پل غزنوی	0.86	شدید	**IV**
۳	نوده خرمالو	2.32	خیلی شدید	**V**
۴	قره قاچی	2.35	خیلی شدید	**V**
۵	انق یلقی	2.45	خیلی شدید	**V**
۶	آق سو قوچمز	1.25	شدید	**IV**
۷	تنگراه	3.24	خیلی شدید	**V**
۸	بصیرآباد	2.92	خیلی شدید	**V**
۹	سرمه رود	2.69	خیلی شدید	**V**
۱۰	تمرگرگان	1.31	خیلی شدید	**V**
۱۱	لزوره	2.97	خیلی شدید	**V**

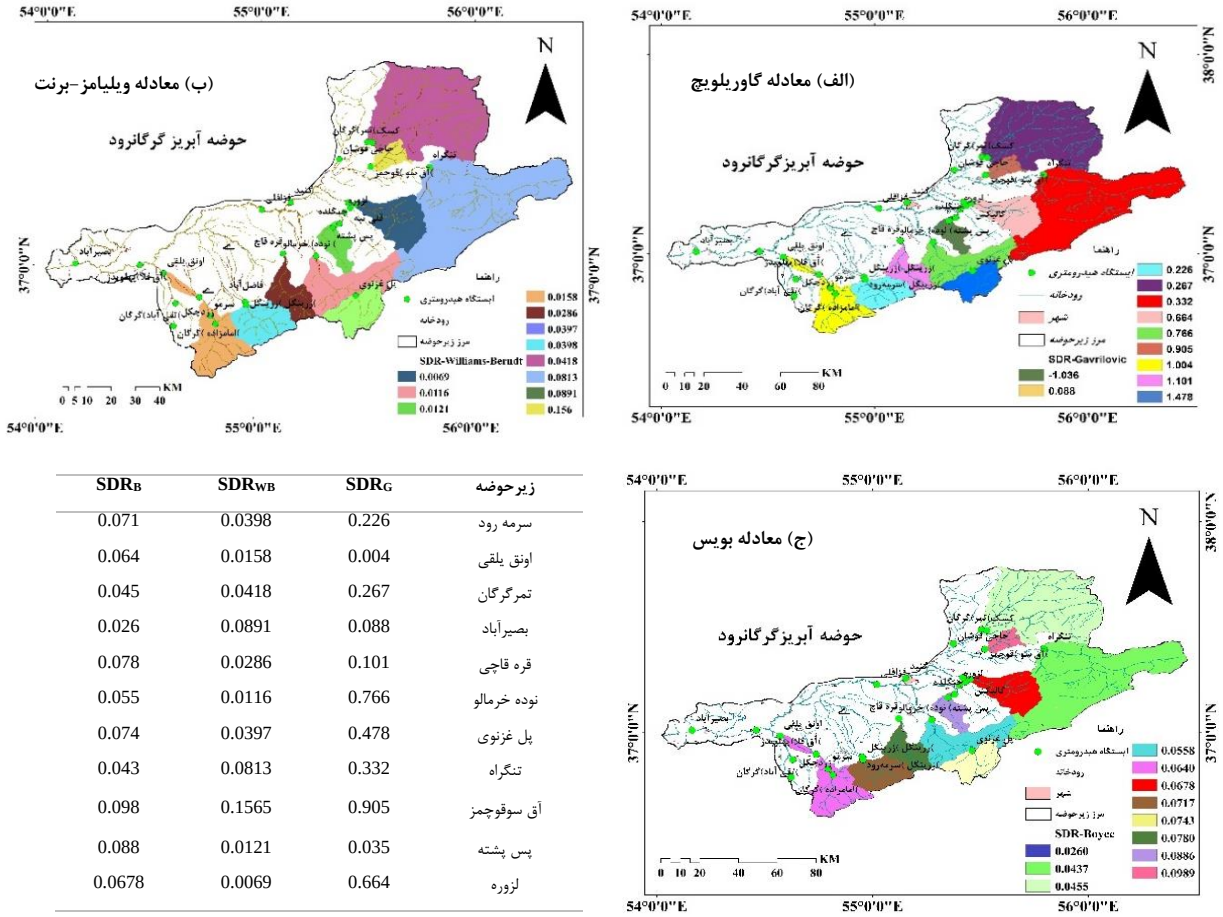
این امر نشان‌دهنده وضعیت فرسایشی بسیار شدید در کل حوضه گرگانرود است، به‌ویژه در زیرحوضه‌هایی نظیر تنگراه و سرمه‌رود که به‌طور مستقیم در ارتباط با شرایط فیزیوگرافی، شیب و اقلیم است.

همچنین میزان فرسایش ویژه (W_{SP})، فرسایش کل (W_S)، رسوب ویژه(G_{SP}) و رسوب کل (G_S) به تفکیک برای زیرحوضه‌ها و کل حوضه محاسبه شده است.

در ادامه، نسبت تحویل رسوب در هر زیرحوضه توسط روش‌های گاوریلوویچ، بویس و ویلیامز-برنت محاسبه و رابطه ریاضی بین این نسبت و ویژگی‌های حوضه‌ای مشخص شد. مقادیر مربوط به نسبت تحویل رسوب (SDR)در جدول (۴) و در شکل (۶) همچنین، رسوب ویژه و رسوب کل در این حوضه به ترتیب ۱/۰۰۵ تن در کیلومتر مربع در سال و ۲۳۵۰ تن در سال محاسبه شده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]



زیرحوضه	SDR_G	SDR_{WB}	SDR_B
سرمه رود	0.226	0.0398	0.071
اونق یلقی	0.004	0.0158	0.064
تمرگرگان	0.267	0.0418	0.045
بصیرآباد	0.088	0.0891	0.026
قره قاچی	0.101	0.0286	0.078
نوده خرمالو	0.766	0.0116	0.055
پل غزنوی	0.478	0.0397	0.074
تنگراه	0.332	0.0813	0.043
آق سوقوچمز	0.905	0.1565	0.098
پس پشته	0.035	0.0121	0.088
لزوره	0.664	0.0069	0.0678

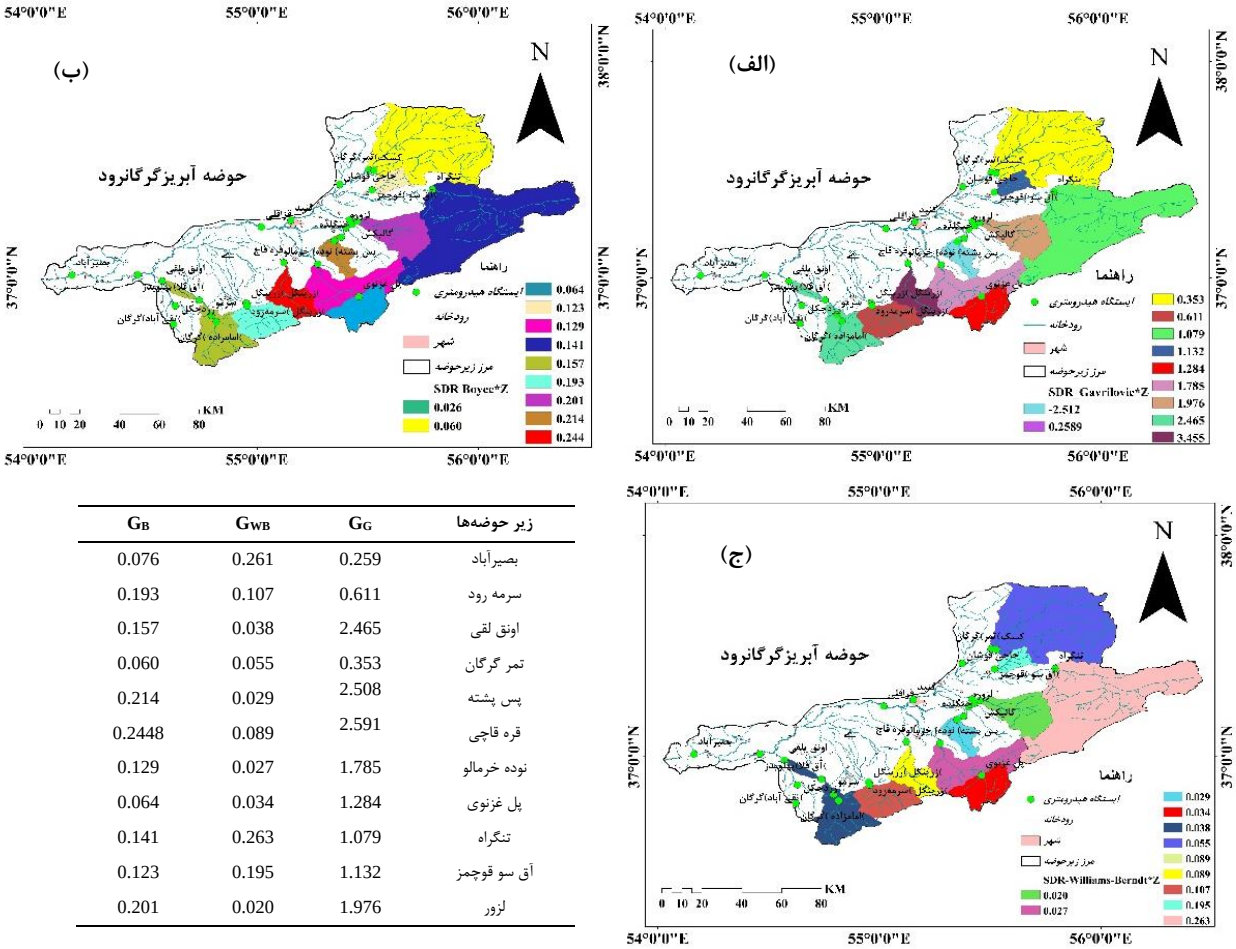
شکل ۶- نقشه‌های نسبت تحویل رسوب (SDR) زیرحوضه‌های مورد مطالعه که بر اساس سه معادله (الف) گاوریلوویچ SDR_G، (ب) ویلیامز-برنت SDR_{WB}و (ج) بویس SDR_B

درجدول۴ و در شکل (۷) مقادیر بازده رسوب (G) در زیرحوضه‌های مختلف حوضه گرگانرود است که با استفاده از سه مدل مختلف، بویس، ویلیامز-برنت و گاوریلوویچ محاسبه شده است. نتایج G با استفاده از حاصلضرب ضریب رسوب‌دهی (SDR) و ضریب فرسایش(Z) نشان می‌دهد:

نتایج مدل‌های برآورد رسوب نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی هستند. مقادیر G در مدل گاوریلوویچ به طور متوسط **حدود ۴,۲۳ برابر** بیشتر از مدل بویس و **حدود ۲۵,۳۱ برابر** بیشتر از مدل ویلیامز-برنت است. به عنوان مثال، در زیرحوضه «اونق لقی»، بازده رسوب در مدل گاوریلوویچ ۲,۴۶۵ است، در حالی که در مدل بویس تنها ۰,۱۵۷۲۶ و در مدل ویلیامز-برنت ۰,۰۳۸۹ است. این اختلاف نشان‌دهنده این است که مدل گاوریلوویچ فرسایش و رسوب‌دهی را با شدت بیشتری برآورد می‌کند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که مدل گاوریلوویچ شدت بیشتری در برآورد فرسایش و رسوب‌دهی دارد. از طرف دیگر، زیرحوضه‌های "اونق لقی"، "پس پشته" و "قره قاچی" که در مدل گاوریلوویچ به ترتیب مقادیر (به ترتیب ۲,۴۶۵، ۲,۵۰۸ و ۲,۵۹۱) را نشان می‌دهند، به عنوان مناطق با بیشترین بازده رسوب شناسایی شده‌اند. این مناطق به دلیل ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند شیب زیاد و شرایط خاص اقلیمی، بیشترین پتانسیل برای تولید رسوب را دارند. از لحاظ اختلافات بین مدل‌های بویس و ویلیامز-برنت، این دو مدل مقادیر نزدیک‌تری به هم دارند، اما در برخی موارد مدل ویلیامز-برنت، مانند زیرحوضه‌های "بصیرآباد (۰,۲۶۱۰۲) و «تنگراه» (۰,۲۶۳۶) مقادیر بیشتری نسبت

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

به بویس ارائه داده است. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت‌های روش‌شناختی بین این دو مدل باشد که هر کدام بر اساس پارامترهای مختلفی محاسبات فرسایش و رسوب‌دهی را انجام می‌دهند. به علاوه، زیرحوضه‌هایی مانند "پل غزنوی" و "تمر گرگان" کمترین مقادیر بازده رسوب را در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهند، که بیانگر فرسایش و تولید رسوب کمتر در این مناطق نسبت به سایر زیرحوضه‌ها است.



زیر حوضه‌ها	G_G	G_{WB}	G_B
بصیرآباد	0.259	0.261	0.076
سرمه رود	0.611	0.107	0.193
اونق لقی	2.465	0.038	0.157
تمر گرگان	0.353	0.055	0.060
پس پشته	2.508	0.029	0.214
قره قاچی	2.591	0.089	0.2448
نوده خرمالو	1.785	0.027	0.129
پل غزنوی	1.284	0.034	0.064
تنگراه	1.079	0.263	0.141
آق سو قوچمز	1.132	0.195	0.123
لزور	1.976	0.020	0.201

شکل ۷- نقشه بازده رسوب(G) در زیرحوضه‌های مورد مطالعه حوضه که توسط مدل EPM بر اساس معادله نسبت تحویل رسوب (الف) گاوریلوویچ، G_G، (ب) بویس، G_B و (ج) ویلیامز-برنت، G_{WB}

با توجه به آنچه تاکنون بیان شده است می‌توان اذعان کرد که مدل گاوریلوویچ به دلیل پیش‌بینی مقادیر بالاتر برای بازده رسوب، بیشتر برای مناطق با شیب تند و فرسایش شدید مناسب است. مدل‌های بویس و ویلیامز-برنت، با دقت بیشتری برای زیرحوضه‌هایی با شیب کمتر و فرسایش ملایم‌تر استفاده می‌شوند. انتخاب مدل مناسب برای برآورد رسوب باید با توجه به ویژگی‌های هر زیرحوضه صورت گیرد تا بتواند بهترین نتایج را برای مدیریت فرسایش و رسوب در منطقه فراهم کند. این تحلیل نشان می‌دهد که درک تفاوت‌های بین مدل‌ها و شرایط خاص زیرحوضه‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت منابع خاک و کاهش خطرات فرسایش در منطقه کمک کند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

مقادیر مربوط به ضریب فرسایش، فرسایش ویژه ($m3/km^2/year$) ، فرسایش کل ($m3/year$)، رسوب ویژه ($m3/km^2/year$)، رسوب کل($m3/year$) و ضریب رسوب‌دهی برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه در جدول ۵ درج شده است. بر اساس این مقادیر، فرسایش ویژه و کل در حوضه آبریز گرگانرود به ترتیب ۷۶۵۶٫۸ تن در کیلومتر مربع در سال و ۶۶۹۶۰۰۵ تن در سال برآورد شده است. همچنین، میزان فرسایش ویژه (W_{SP}) و رسوب ویژه (G_{SP}) کل حوضه به ترتیب ۷۶۵۶/۸۸ و۶۸۲/۲۶ مترمکعب در کیلومترمربع در سال برآورد شد.

جدول۵ -فرسایش و رسوب محاسبه شده برای زیرحوضه‌های گرگانرود با استفاده از مدلEPM

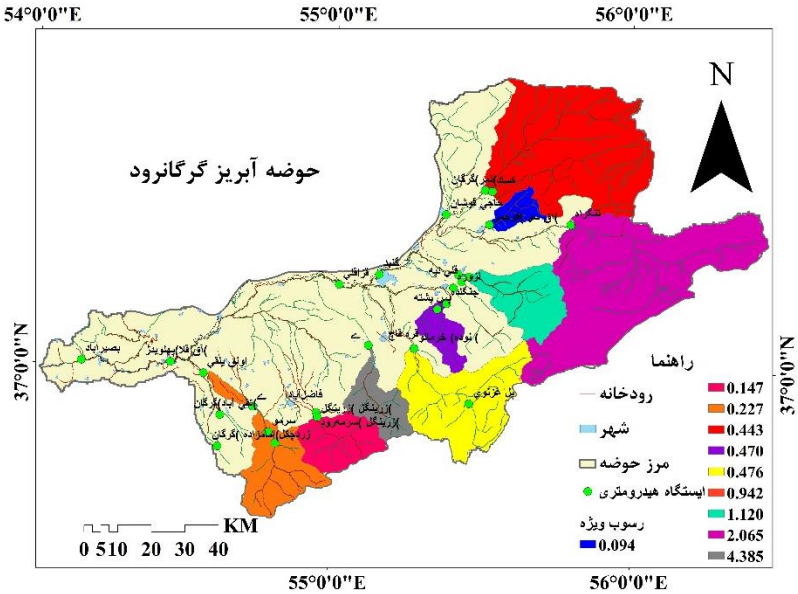
زیرحوضه‌ها	W_{SP} ($m3/km^2/year$)	GSP_{WB} ($m3/km^2/year$)	Ws ($m3/year$)	GS_{WB} ($m3/year$)
سرمه رود	7424.4	295.9183	2474172	98613.35
اونق یلقی	7284.7	115.535	3546703	56250.29
تمرگرگان	2439.4	102.0864	3693009	154543.2
بصیرآباد	7656.8	682.2603	75148100.3	6696005
قره قاچی	11936.6	222.0847	3010289	56007.31
نوده خرمالو	5239.1	60.79061	4037585.67	46848.84
پل غزنوی	624.4	24.79246	185174.6	7351.976
تنگراه	6273.2	510.0426	10877373	884378.3
آق سوقوچمز	3608.3	564.86	412347.3	64549.9
پس پشته	9909.2	120.1013	1635597	19823.58
لزوره	9386.5	6232.6	3775178	2506733

۳-۳-ارزیابی صحت نقشه پتاسیل فرسایش و تولید رسوب

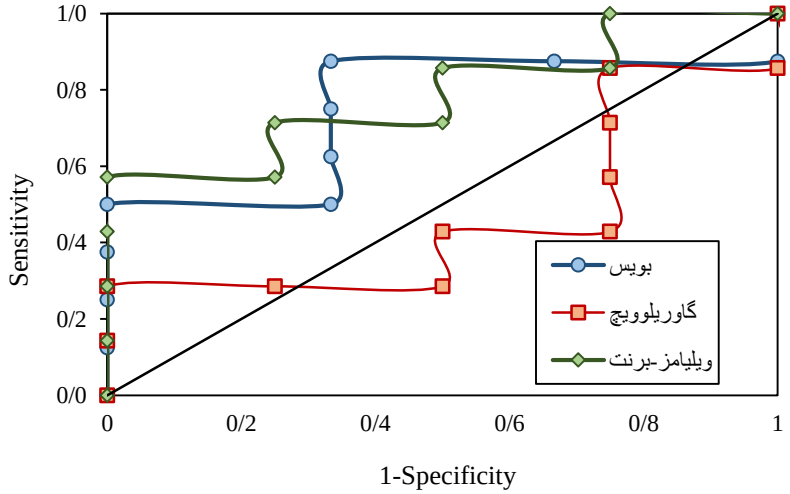
برای اعتبارسنجی نقشه پتانسیل رسوب حوضه، داده‌های متوسط بلندمدت رسوب ویژه ۱۱ ایستگاه هیدرومتری زیرحوضه که از تقسیم متوسط رسوب روزانه بر مساحت حوضه به دست آمده بود، طی سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۶ محاسبه و نمودار مشخصه عملکرد محاسبه شد(شکل ۸).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]



شکل- ۸ نقشه رسوب ویژه حوضه آبریز گرگانرود



شکل -۹ ارزیابی معادلات مختلف تخمین نسبت تحویل رسوب در مدل EPM به منظور تخمین نرخ رسوب دهی حوضه آبریز گرگانرود بر اساس منحنی مشخص ROC.

این ارزیابی با استفاده از منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) انجام شد که نتایج آن نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل پتانسیل فرسایش است. سطح زیر منحنی (AUC) که در آن SDR ویلیامز و برنت با ضریب ۰/۷۸، SDR گاوریلوویچ با ضریب ۰/۴۲ و SDR بویس با ضریب ۰/۷۵ صحت‌سنجی شد. با توجه به ضریب بالای ویلیامز و برنت بعنوان بهترین نسبت تحویل رسوب شناخته شد (شکل۹). معادله ویلیامز و برنت (۱۹۷۵) روشی را برای محاسبه نسبت تحویل رسوب بر مبنای مساحت و ویژگی‌های فیزیوگرافی و هیدرولوژی حوضه آبریز می‌باشد که از از فاکتورهای مساحت، محیط، شماره منحنی، طول آبراهه، بارش، دما، اختلاف ارتفاع و شیب متوسط زیرحوضه‌های مورد مطالعه استفاده شد. مطالعات Dehzad و همکاران (2008) نیز به بررسی کارایی مدل EPM در مناطق کوهستانی گرگانرود پرداخته و به این نتیجه رسیده بودند که مدل EPM به دلیل توانایی آن در در نظرگرفتن پارامترهای کلیدی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]
[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

مؤثر بر فرسایش، از جمله بارش، شیب، پوشش گیاهی و نوع خاک، یک ابزار ارزشمند برای برآورد دقیق فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبریز است.

با توجه به نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شناخت تفاوت‌های بین مدل‌های برآورد رسوب و شرایط خاص زیرحوضه‌ها نقش مهمی در بهبود مدیریت منابع خاک و کاهش خطرات ناشی از فرسایش در منطقه دارد. این تحلیل بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده و تحلیل‌های صورت گرفته، انجام شده است و به وضوح نشان‌دهنده اهمیت این تفاوت‌ها در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی می‌باشد.

۳-۳-مدل‌سازی و رگرسیون چندمتغیره

در این پژوهش، نسبت تحویل رسوب به‌عنوان متغیر وابسته تعریف شده است که از تقسیم مقدار متوسط رسوب معلق سالانه بر مقدار فرسایش کل به‌دست می‌آید و سایر پارامترها به عنوان متغیرهای مستقل در نظرگرفته شدند. به دلیل زیاد بودن تعداد متغیرها فقط متغیرهایی که دارای بیشترین همبستگی بودند در جدول(۷) ذکر شدند. با توجه به تحلیل رگرسیون متغیرها جدول(۷) مشاهده می‌شود که متغیرهای مساحت(A)، محیط(P)، طول آبراهه(L)، شیب(S)، شماره منحنی(CN)، دما(T)، اختلاف ارتفاع(H) و بارش(R) نسبت به سایر متغیرها مقدار همبستگی بالاتری با میزان تولید رسوب حوضه دارند (جدول۶)، به همین دلیل در مدل‌های رگرسیونی وارد شدند. این یافته‌ها هم‌راستا با تحقیق انجام شده توسط جوناس دیدونه و همکاران در سال ۲۰۱۵ با هدف کمی سازی فرسایش خاک و رسوب در یک حوضه آبریز در جنوب برزیل انجام دادند، به این نتیجه دست یافتند مقادیر فرسایش ناخالص بالا درحوضه با مناطقی با رواناب سطحی بالقوه بالا و نفوذ کم خاک مرتبط است، که احتمالاً ناشی از شیوه‌های مدیریت ناکافی خاک و فشردگی بیش از حد خاک است.

جدول -۶ مشخصات فیزیکی و هیدرولوژیکی زیرحوضه‌های حوضه آبریز گرگانرود به همراه مقدارSDR

زیرحوضه	SDR	CN	A(Km^2)	R(mm)	T (°C)	H(km)	P(km)	L(km)	S(٪)
بصیرآباد	0.010	66.2	9814.44	456.00	10.38	0.876	802.44	1189.72	21.39
سرمه رود	0.036	43.7	333.25	550.00	8.40	1.219	84.77	42.22	44.19
اونق لقی	0.004	37.4	486.87	575.00	10.00	0.001658	165.86	56.05	42.77
تمر گرگان	0.024	50.8	1513.85	433.33	13.00	0.638	219.91	166.79	22.06
پس پشته	0.006	34.3	165.06	707.14	13.00	0.000623	70.70	15.64	33.15
قره قاچی	0.048	40.5	252.19	600.00	12.00	1.153	96.05	28.22	20.51
نوده خرمالو	0.012	35.9	770.66	440.91	10.33	1.246	166.40	65.12	29.92
پل غزنوی	0.197	39.9	296.54	250.00	8.67	0.685	94.90	11.93	22.93
تنگراه	0.003	55.4	1733.93	316.67	10.67	0.959	276.04	185.45	20.30
آق سو قوچمز	0.003	54.6	114.28	650.00	15.00	0.378	56.33	10.38	25.59
لزور	0.016	32.7	402.19	483.33	13.50	1.051	111.30	55.16	29.18

جدول۷آماره‌های مربوط به رگرسیون چند متغیره گام به گام را نشان می‌دهد. براساس جدول۷، با اضافه شدن متغیر دما (T) به مدل شماره ۴، ضریب تبیین رگرسیون افزایش معنی‌داری (از ۰/۱۵۱ به ۰/۸۴۸) نشان می‌دهد و نشان‌دهنده این است که متغیر دما به تنهایی می‌تواند حدود ۷۰٪ تغییرات مربوط به SDR را نشان دهد. مدل شماره ۸ که بر اساس تمام متغیرهای درنظر گرفته شده ساخته شده است، توانسته است ۹۷٪ تغییرات SDR را نشان دهد. با توجه به ضریب تعیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) در مدل‌های مختلف، مدل ۸ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. همچنین، نتایج آزمون t نشان داد که ضرایب رگرسیون مدل‌های ارائه شده در جدول

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

۶ با سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده و متغیرهای مستقل به‌طور مؤثری تغییرات متغیر وابسته (نسبت تحویل رسوب) را توضیح می‌دهند.

جدول ۷-مدل رگرسیون بین متغیرهای موثر و نسبت تحویل رسوب در زیر حوضه‌های مورد مطالعه

شماره رگرسیون	رابطه ریاضی رگرسیون	ضریب تبیین (R^2)	خطای استاندارد (SE)
۱	SDR=-0.01×S+0.072	0.044	0.058
۲	SDR=-0.002×S-0.0004×L+0.096	0.114	0.059
۳	SDR=-0.002×S-0.00001×L-0.00001×P+0.129	0.146	0.062
۴	SDR=-0.002×S-0.00001×L-0.00001×P+0.01×H +0.119	0.151	0.067
۵	SDR=-0.006×S-0.00001×L-0.001×P-0.042×H -0.03×T +0.672	0.848	0.031
۶	SDR=-0.004×S+0.001×L-0.001×P-0.048×H -0.02×T-0.001×R +0.644	0.944	0.021
۷	SDR=-0.004×S+0.001×L-0.001×P-0.05×H -0.021×T-0.0001×R -0.00008×A+0.682	0.951	0.022
۸	SDR=-0.004×S+0.001×L-0.001×P-0.051×H -0.021×T-0.0001×R -0.00006×A-0.001×CN+0.729	0.969	0.022

S: شیب (٪)، L: طول آبراهه (km)، P: محیط (km)، H: اختلاف ارتفاع (km)، T: دما (°C)، R: بارش (m/m)، A: مساحت (Km^2) و CN: شماره منحنی

۴-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل EPM به‌منظور برآورد فرسایش و رسوب در ۱۱ زیرحوضه حوضه آبریز گرگانرود طراحی و تحلیل شد. نتایج نشان داد که عوامل اقلیمی، از جمله دما و بارندگی، تأثیر معناداری بر تولید رسوب و فرسایش دارند. بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت، به‌ویژه در فصل زمستان، موجب افزایش رواناب و جابجایی توده‌های خاک می‌شوند. همچنین، شیب بالای آبراهه‌ها باعث جریان سریع رواناب و تشدید سیلاب می‌شود. توپوگرافی حوضه، به‌ویژه شیب متوسط ۲۱/۳۹ درصد و در برخی زیرحوضه‌ها بیش از ۴۰ درصد، فرسایش قابل‌توجهی را ایجاد کرده است. تحلیل‌های رگرسیونی نشان دادند که شماره منحنی (CN) به‌عنوان شاخصی کلیدی، تعیین‌کننده نفوذپذیری خاک و شدت رواناب است. هرچه CN بیشتر باشد، رواناب بیشتر و نفوذپذیری کمتر است. همچنین، اختلاف ارتفاع به‌عنوان عاملی مهم بر سرعت رواناب و فرسایش تأثیرگذار است؛ مناطق با اختلاف ارتفاع بالا مستعد فرسایش بیشتری هستند. مساحت حوضه نیز تأثیر مستقیم بر تولید رسوب دارد؛ با افزایش مساحت، مقدار رسوب تولیدی و انتقال آن نیز افزایش می‌یابد. در حالی که حوضه دارای پوشش مناسب جنگلی و مرتعی است، فعالیت‌های انسانی مانند چرای مفرط و تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی وضعیت فرسایش را تشدید کرده است. مدل‌سازی EPM نشان داد که اکثر زیرحوضه‌ها دارای شدت فرسایش بسیار شدید (V) هستند و تنها تعداد محدودی دارای شدت فرسایش شدید (IV) می‌باشند. نتایج مدل نهایی با ضریب تبیین ۰/۹۶۹ و خطای استاندارد ۰/۰۲۲، نشان‌دهنده عملکرد خوب آن در توضیح فرایندهای فرسایش و رسوب است.

اعتبارسنجی نقشه پتانسیل فرسایش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و روش‌های آماری ROC وAUC، تأییدکننده دقت بالای مدل در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه گرگانرود است. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل EPM

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

توانایی بالایی در شناسایی و تحلیل عوامل تأثیرگذار بر فرسایش و رسوب دارد. همچنین، دقت این مدل به داده‌های ورودی بستگی دارد و در صورت نبود داده‌های کافی، نتایج ممکن است دچار خطا شوند. پیشنهاد می‌شود که در طرح‌های مدیریتی، از جمله احیای پوشش گیاهی و مدیریت منابع آب، استفاده شود تا فرسایش کاهش یابد و وضعیت رسوب بهبود یابد.

منابع

1. Ahmadi, Habibollah. (2007). Geomorphology of Land Use (Volume 1). Tehran University Press.
2. Aleksova, B., Lukić, T., Milevski, I., Spalević, V., & Marković, S. B. (2023). Modelling water erosion and mass movements (wet) by using GIS-based multi-hazard susceptibility assessment approaches: a case study—Kratovska Reka Catchment (North Macedonia). *Atmosphere*, *14*(7), 1139.
3. Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, *7*(3), 203-225.
4. Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, *348*(6235), 1261071.
5. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *34*(1), 73-89.
6. Bagherzadeh, A., & Daneshvar, M. R. M. (2010, April). Estimating and mapping sediment production at Kardeh watershed by using GIS. In *1st International Applied Geological Congress, Mashad, Iran*.
7. Bazzoffi, P. (1985, March). Methods for net erosion measurement in watersheds as a tool for the validation of models in central Italy. In *Workshop on soil erosion and hillslope hydrology with emphasis on higher magnitude events, Leuven*.
8. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, *780*, 146494.
9. Borrelli, P., Ballabio, C., Yang, J. E., Robinson, D. A., & Panagos, P. (2022). GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. *Scientific Data*, *9*(1), 406.
10. Borrelli, P., Panagos, P., Alewell, C., Ballabio, C., de Oliveira Fagundes, H., Haregeweyn, N., ... & Robinson, D. A. (2023). Policy implications of multiple concurrent soil erosion processes in European farmland. *Nature Sustainability*, *6*(1), 103-112.
11. Boyce, R. C. (1975). Sediment Routing with Sediment Delivery Ratios. *Present and Prospective Technology for ARS/USDA*.
12. Brannigan, N., Mullan, D., Vandaele, K., Graham, C., McKinley, J., & Meneely, J. (2022). Modelling soil erosion by water under future climate change: Addressing methodological gaps. *Catena*, *216*, 106403.
13. Chen, W., Huang, Y. C., Lebar, K., & Bezak, N. (2023). A systematic review of the incorrect use of an empirical equation for the estimation of the rainfall erosivity around the globe. *Earth-science reviews*, *238*, 104339.
14. Durán Zuazo, V. H., Martínez, J. F., Pleguezuelo, C. R., Martínez Raya, A., & Rodríguez, B. C. (2006). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers in a mountainous area (SE Spain): implications for sustainable agriculture. *Environmentalist*, *26*(4), 309-319.
15. Durán Zuazo, V. H., Martínez, J. F., Pleguezuelo, C. R., Martínez Raya, A., & Rodríguez, B. C. (2006). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers in a mountainous area (SE Spain): implications for sustainable agriculture. *Environmentalist*, *26*(4), 309-319.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

16. Efthimiou, N., Lykoudi, E., Panagoulia, D., & Karavitis, C. (2016). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE Models: The case of Venetikos River Catchment. *Global NEST Journal*, *18*(1), 164-179.
17. Elhag, M., & Bahrawi, J. A. (2014). Conservational use of remote sensing techniques for a novel rainwater harvesting in arid environment. *Environmental earth sciences*, *72*, 4995-5005.
18. Faghfouri, Z., Arman, N., Faraji, M., & Khorsandi, Z. (2017). Identifying the effective factors on sediment yield using statistical method, case study: Seyed Abad Basin. *Watershed Engineering and Management*, *9*(2), 190-204.
19. Gavrilovi´c, S., 1972. Inˇzenjering o bujiˇcnim tokovima i eroziji. Belgrade: Republic water fund of the SR Serbia, Belgrade: Water management organization "Belgrade": Institute for erosion, melioration and water management of torrential streams at the Faculty of Forestry, Belgrade.
20. Gavrilovic, Z. (1988). Use of an Empirical Method(Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams. In *International Conference on River Regime. Hydraulics Research Limited, Wallingford, Oxon UK. 1988. p 411-422, 5 fig, 4 tab, 8 ref.*.
21. Gavrilovic, Z., Stefanovic, M., Milovanovic, I., Cotric, J., & Milojevic, M. (2008). Torrent classification–base of rational management of erosive regions. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 4, No. 1, p. 012039). IOP publishing.
22. Ghanbarzadeh, H., Gholamrezaee, M., 2007. The Estimated of Potential Erosion and Sediment Using EPM Model in Arekamar Watershed in Fariman Using GIS, Geographic Sciences Quarterly, No. 7 & 8, PP. 187-206.
23. Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2013). Soil genesis and classification. *Catena*, *104*, 251-256.
24. Jafari Ardakani, A., Bayat, R., Peyrovan, H. R., Jafari, M. S., & Charkhabi, A. H. (2009). Sediment yield and erosion rate of loess deposits of Golestan province in Iran. In *6th Iranian Conference of Engineering Geology and the Environment* (Vol. 4, pp. 1161-1172).
25. Khodabakhshi, Zeinab, Arzani, Nasser, Abdollahi, Khodayar, & Davoodian, Alireza. (2010). Study of Erosion Susceptibility of Rock Units and Sediment Production Using the EPM Model and GIS in Part of the Zayandeh Rud Watershed – Haidari Watershed in the North of Shahrekord. Journal of Stratigraphy and Sedimentology, 26(2), 33-48.
26. Kostadinov, S., Dragićević, S., Stefanović, T., Novković, I., & Petrović, A. M. (2017). Torrential flood prevention in the Kolubara river basin. *Journal of Mountain Science*, *14*(11), 2230-2245.
27. Lense, G. H. E., Moreira, R. S., Parreiras, T. C., Santana, D. B., Bolelli, T. D. M., & Mincato, R. L. (2020). Water erosion modeling by the Erosion Potential Method and the Revised Universal Soil Loss Equation: a comparative analysis. *Revista Ambiente & Água*, *15*, e2501.
28. Let me know if you need further assistance!Ahmadi, H. 1386. Applied geomorphology (first volume). *University of Tehran Publishing and Printing Institute.* (*in Persian*)
29. Lu, H., Moran, C. J., & Prosser, I. P. (2006). Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environmental Modelling & Software*, *21*(9), 1297-1308.
30. Mahmmudi, F.A., 2004. Dynamic Geomorphology, 6th edition, Payame Noor University Press, Tehran, Iran.
31. Mansouri, Zahra & Kabousi, Kami. (2013). Erosion Intensity Zoning Using the EPM Model (Case Study: Golidagh Watershed, Golestan Province). First National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran. https://civilica.com/doc/258216
32. Mansouri, Zahra and Kabousi, Kami, (2013), Erosion intensity zoning using EPM model (case study: Glidagh watershed, Golestan province), *the first national conference on sustainable agriculture and natural resources, Tehran*, https://civilica.com/ doc/258216. (*in Persian*)
33. Mohammadi Ostadkalaei, Amin, Mosaadi, Abolfazl, & Heshamatpour, Ali. (2007). Determining the Most Suitable Method for Estimating Suspended Sediment in the Qazaqli Hydrometric Station of the Gorganrud River.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

34. Mohammadi Ostadkalaye Amin, Mosaedi Abolfazl, & Hashmatpour Ali. (2007). Determining the most appropriate method for estimating suspended sediment in the Ghazagli hydrometric station of the Gorganrood River. (*in Persian*)
35. Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(33), 13268-13272.
36. Moradi, S., Limaei, S. M., & Khanmohammadi, M. (2015). Calculation of sediment yield in the Zemkan River Basin of Iran using analytical methods and GIS concept. *Agriculture & Forestry*, *61*(2), 157-171.
37. Mosaadi, Mansour Najafi Haji Vareh, & Mehdi Jalali. (2009). Estimation of Sediment Output from the Gorganrud Watershed for Erosion Assessment. In the 5th National Conference on Watershed Sciences and Engineering of Iran (Sustainable Management of Natural Disasters).
38. Mosaedi, Mansour Najafi Hajivar, & Mehdi Jalali. (2009). Estimating the output sediment from the Gorgan River catchment area in order to determine the erosion rate. *In the 5th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran (Sustainable Management of Natural Disasters). Sudden flows in spring* (following heavy rainfall and melting snow) and low discharge in autumn and summer are identified. (*in Persian*)
39. Ong Majid, & Nahtani Mohammad. (2004). The relationship between geomorphological units and erosion and sediment production in the Kashidar watershed (Gorganrood). (*in Persian*)
40. Onogh, Majid, & Nahtani, Mohammad. (2004). The relationship between geomorphological units and erosion and sediment production in the Kashidar Watershed (Gorganrud).
41. Panagos, P., Ballabio, C., Poesen, J., Lugato, E., Scarpa, S., Montanarella, L., & Borrelli, P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European Union. *Remote Sensing*, *12*(9), 1365.
42. Park, Y. S., Kim, J., Kim, N. W., Kim, S. J., Jeon, J. H., Engel, B. A., ... & Lim, K. J. (2010). Development of new R, C and SDR modules for the SATEEC GIS system. *Computers & Geosciences*, *36*(6), 726-734.
43. Pintar, J., Mikoš, M., & Verbovšek, V. (1986). *Elementi okolju prilagojenega urejanja vodotokov: alternativa utesnjevanju živih naravnih procesov v toge objekte*.
44. Ponjiger, T. M., Lukić, T., Wilby, R., Marković, S. B., Valjarević, A., Dragićević, S., ... & Morar, C. (2023). Evaluation of rainfall erosivity in the Western Balkans by mapping and clustering ERA5 reanalysis data.
45. Pourjavad, E., & Shirouyehzad, H. (2011). A MCDM approach for prioritizing production lines: a case study. *International Journal of Business and Management*, *6*(10), 221-229.
46. Pourjavad, E., & Shirouyehzad, H. (2011). A MCDM approach for prioritizing production lines: a case study. *International Journal of Business and Management*, *6*(10), 221-229.
47. Rafahi, H., 2009. Water Erosion and Conservation, 5th Edition, University of Tehran Press, Tehran, Iran.
48. Recatalá, L., Añó, C., Verzandvoort, S., Ritsema, C., & Sánchez, J. (2011). Harmonization of risk assessment methods of soil erosion by water in the European Union. *Soil Erosion: Causes, Processes and Effects*, 161-176.
49. Renard, K. G. (1995). Predicting Soil Erosion by Water; A Guide to Coservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, *703*, 367.
50. Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
51. Safari, Mohammad, Noori, Mohammad, Karami, Mohammad, & Jalal, Mohammad. (2018). Examining the Impact of Land Cover and Land Use Changes on Soil Erosion Potential – A Case Study of the Qara Sou-Gorganrud Watershed. Scientific Journals System, 5(1), 83-96.
52. Safari, Nouri, Kerami, & Jalal. (2018). Investigating the impact of land cover and land use changes on soil *erosion capability - a case study of Qarasu Basin, Gorganrood. Scientific Journal System, 5(1), 83-96*(*in Persian*).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]

53. Sandu, I., Pescaru, V. I., Poiană, I., Geicu, A., Cândea, I., & Tâstea, D. (2008). Clima României (Climate of Romania). *The Publishing House of the Romanian Academy, Bucharest*.
54. Shahreza, Ali Saleh & Asghari, Ebrahim. (2009). Report on the Integration of Water Resources Studies of the Qara Sou-Gorganrud Watershed, Volume 3: Statistical Analysis, Data Interpretation, and Hydrology, Part 1: Meteorology, 293 pp.
55. Shahreza, Ali Saleh and Asghari, Ebrahim. (2008). *The integrated report of studies of water resources in the Gharesu-Gorganrood watershed, volume three*: analysis of statistics and information and water expression, part one: meteorology, 293 p. (*in Persian*)
56. Ts, M. I., & Gruev, G. (2002). Intensity of erosion in the catchment area of the river Rakovitsa. *Forest Science*, *1*, 73-84.
57. USDA, 2019. Conservation practices have decreased soil erosion on cultivated cropland over time [WWW Document]. https://www.ers.usda.gov/data-products/chart-gall ery/gallery/chart-detail/?chartId=94923.
58. Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe: European Soil Bureau. *European Commission Belgium*.
59. Van Oost, K., Govers, G., & Desmet, P. (2000). Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape ecology*, *15*, 577-589.
60. Veličković, N., Todosijević, M., & Šulić, D. (2022). Erosion Map Reliability Using a Geographic Information System (GIS) and Erosion Potential Method (EPM): A Comparison of Mapping Methods, BELGRADE Peri-Urban Area, Serbia. *Land*, *11*(7), 1096.
61. Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of hydrology*, *65*(1-3), 209-237.
62. Williams, J. R., & Berndt, H. D. (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the ASAE*, *20*(6), 1100-1104.
63. Wischmeier, W., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. *US Department of Agriculture, Washington, DC*.
64. Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiake, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological processes*, *17*(14), 2913-2928.
65. Zema, D. A., Labate, A., Martino, D., & Zimbone, S. M. (2017). Comparing different infiltration methods of the HEC-HMS model: the case study of the Mésima Torrent (Southern Italy). *Land Degradation & Development*, *28*(1), 294-308.
66. Zhang, H. Y., Shi, Z. H., Fang, N. F., & Guo, M. H. (2015). Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, *234*, 19-27.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-08-21]

[DOI: 10.61186/jeer.15.1.120]