Research Paper

Modeling of Suspended Sediment Yield in Ardabil Province watersheds using PCA and Multiple Regression Analysis

Fariba Esfandiari Darabad[1], Raoof Mostafazadeh[2*], Behruoz Nezafat Takleh[3] Amir Hesam Pasban[4],

[1]- Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09120503281, esfandyari@uma.ac.ir
[2]- Associate Professor, Department of Natural Resources and member of Water Management Research Institute, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09144815743, raoofmostafazadeh@uma.ac.ir (Corresponding Author)
[3]- Ph. D student in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09389497242, behrouznezafat75@gmail.com
[4]- Ph. D student in in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09380967946, a.hesam773@gmail.com

10.22125/IWE.2022.162629

Received:
25.December.2020
Accepted:
June.15.2021
Available online:
December 11, 2022

Keywords:
Regionalization, Sediment yield, Suspended sediment concentration, Modeling, Sediment rating curve

Abstract

The main aim of the present study was Modelling the SSY in Ardabil Province watersheds using Principal Component Analysis (PCA) and Multiple Regression (MRA). The available suspended sediment data of 29 watersheds were used to develop the SSY estimation models through validation by six watersheds. The 15 different physiographic, climatic, geomorphic, geological variables were used in the modeling after applying PCA. Finaly, the MRA models were evaluated based on the percentage of error, and Adj-R2 as statistical measures. The results of PCA showed that the first four principal component had explained about 86.39% of the total variance, which were selected as the main components for MRA input variables. The most influencial variables includes main river length, maximum precipitation, maximum elevation, and area. According to the results the Best Model with maximum height and maximum precipitation variables, Forward and Stepwise methods with perimeter variable, the Backward method with minimum elevation and maximum elevation, area, perimeter, total mainstream length, maximum precipitation, mean precipitation, annual precipitation, and sensitive geological formations were selected. According to the Backward model, Minimum elevation (0.073), maximum elevation (0.001), area (0.002), perimeter (0.053), total river length (0.01), maximum precipitation (0.001), mean precipitation (0.008), and erosive geologic formations (0.082) were the final significant parameters in estimation of SSY. The drainage density and vegetation cover were excluded from the modelling process and the selected variables had a great impact on SSY over the study area, and the results can be generalized to the ungauged watersheds to SSY estimation.

* **Corresponding Author:** Raoof Mostafazadeh
Address: Department of Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir
Tel: 09144815743

Introduction

Estimation of suspended sediment is essential in adopting better land and water management methods in watersheds. Sediment transport in rivers has negative effects such as reservoir sedimentation and changes in channel characteristics, which may cause sediments from slopes and small areas to accumulate in river networks or irrigation channels. In addition, loss of soil fertility and nutrients, which reduces productivity as well as pollution of water resources. The study of erosion and its performance due to its economic importance is an important field of hydrological research that is important in terms of soil structure and fertility, especially in steep slopes and degraded areas. In general, cultivation on sloping areas affects the environment in terms of generating runoff and flash floods and reducing crop production, etc. Sediment estimation is used in planning and designing water resources development projects. Specially, feasibility stud of dam construction, assessing sediment balance and estimating sediment ratio evolution, as well as evaluating changes due to human activities need the sediment data. In addition, sediment data are not available due to the lack of gauge stations. Erosion and sediment transport are complex phenomena and these processes are influenced by several factors such as climate, geology and land use. The mountainous upland areas with high slope and sensitive formations as well as limited vegetation, have the potential for severe soil erosion and sedimentation. In addition, human activities such as overgrazing, inappropriate cultivation without considering the potential of the land, non-standard plowing have intensified soil erosion in the region. Therefore, according to the above, estimating the amount of suspended sediments in the watersheds of the province is necessary.

Materials and Methods

The aim of this study was to investigate the relationship between hydrogeomorphic features and sediment production in the watersheds of Ardabil province. In the first stage, first the effective factors in modeling the amount of suspended sediments such as temperature, precipitation, sediment texture, vegetation, slope, geologic formation, watershed height, watershed area, river length, and soil type are identified. In the next step, the sediment rating curves is extracted based on the relationship between the flow rate and suspended sediment concentration for each watershed and the variables affecting the amount of suspended sediment are quantified. Then, using PCA analysis, the variables affecting the amount of suspended sediment has been determined. Multiple regression analysis is also used to determine the values of independent variables in estimating the dependent variable. Using multiple regression, the linear relationship between the set of effective factors and the amount of suspended sediments is analyzed.

Results

According to the results, the highest correlation coefficient between (main waterway, concentration time, maximum altitude, and maximum precipitation) is about 99%. In addition, among the 14 main components, the first component accounted for 40.69% of the total variance and the second component accounted for 30.64% of the total variance. Finally, 4 main components with a total value of 86.39% variance explained were used to model suspended sediments in the study area The results of multiple regression were assessed by adjusted-R^2 among the examined models (e.g., Best model, Backward, Stepwise, Forward methods). The adjusted-R^2 values of the examined models were 0.80, 0.98, 0.25, and 0.29, respectively. In addition, analysis of variance in Best model, Stepwise, Forward, and Backward methods were confirmed based on significance and linear F-statistic. According to the selected models in the Best model, the factors of maximum height and maximum rainfall were the most important factors. While, the perimeter factor determined to be more influential in Stepwise, and Forward methods. The minimum height Maximum height, area, perimeter, total river length, average rainfall, maximum rainfall and susceptible formations were significant independent factors in backward method.

Discussion and Conclusion

The maximum height, maximum rainfall and main waterway, concentration time factors had the highest internal correlation coefficient. The present results, while introducing the influencing factors on the amount of sediment production in the watersheds of Ardabil province, can be generalized to areas without observed sediment data to estimate sediment concentration.

Six important references

1) Asgari, E., S.Z. Hosseini, R. Mostafazadeh. 2020. Determination of the relationship and spatial variations of discharge and suspended sediment values in watersheds of Ardabil Province, Geography and Development, 18(61):149-176. [In Persian]
2) Mehry, S., R. Mostafazadeh, A. EsmaliOuri, A., A. Ghorbani, A. 2017. Spatial and temporal variations of Base Flow Index (BFI) the Ardabil Province rivers, Iran. Earth and Space Physics, 43(6):623-634. [In Persian]
3) Tananaev. N. I. 2017. Applying regression analysis to calculating suspended sediment runoff: 793. Specific features of the methods. Water Resources. 6: 585- 592.
4) Telvari A.R. 2002, The relationship between suspended sedimentation and some watershed characteristics in Karkheh and Dez tributaries in Lorestan province, Quarterly Journal of Research and Construction, Nos. 56 and 57, pp. 56-61.
5) Wuttichaikitcharoen. P. Babel. M.S. 2014. Principal Component and Multiple Regression Analyses for the Estimation of Suspended Sediment Yield in Ungauged Basins of Northern Thailand. Water 2014, 6, 2412-2435; doi:10.3390/w6082412.
6) Zhang. H.Y. Z.H. Shi. N.F. Fang and M.H. Gua. 2017. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield. Evidence from the Loess Plateau of China. Geomorphology. 234 (4): 19-27.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to the Ardabil Regional Water company that provided the water quality data.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. شماره پنجاه. زمستان ۱۴۰۱

مدل‌سازی میزان رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون چندگانه

فریبا اسفندیاری درآباد [۱]، رئوف مصطفی‌زاده [۲*]، بهروز نظافت تکله [۳]، امیرحسام پاسبان [۴]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

چکیده

هدف از مطالعه حاضر مدل‌سازی رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی و رگرسیون چندگانه است. برای این منظور از اطلاعات ۲۹ ایستگاه رسوب‌سنجی برای ایجاد مدل‌های برآورد رسوبات معلق استفاده شد. سپس مدل‌های توسعه‌یافته با اطلاعات شش ایستگاه رسوب‌سنجی دیگر اعتبارسنجی شد. تعداد ۱۵ ویژگی مختلف فیزیوگرافی، اقلیمی، ژئومورفیک و زمین‌شناسی، به‌عنوان متغیرهای ورودی در مدل‌سازی برآورد رسوبات معلق استفاده شد. از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، برای انتخاب مهم‌ترین متغیرها، از روش رگرسیون چندگانه برای مدل‌سازی و از معیارهای درصد خطا و ضریب تبیین تعدیل شده برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که چهار مؤلفه اول با مقدار ۸۶/۳۹ درصد از کل واریانس به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی برای انجام رگرسیون انتخاب شدند. در مؤلفه اول متغیرهای شامل طول آبراهه اصلی، بارش بیشینه، حداکثر ارتفاع، مساحت مؤثر بوده اند. طبق نتایج روش‌های رگرسیونی که در روش توام عامل‌های حداکثر ارتفاع و بارش بیشینه متغیرهای مؤثر هستند. در روش گام به گام و روش پیش‌رو عامل محیط عامل مؤثر بر تولید رسوب است. در روش حذف پس رو عامل‌های حداقل ارتفاع (۰/۰۷۳)، حداکثر ارتفاع (۰/۰۰۱>)، مساحت (۰/۰۰۲)، محیط (۰/۰۵۳)، مجموع طول آبراهه اصلی (۰/۰۱۰)، بارش بیشینه (۰/۰۰۱>)، بارش متوسط (۰/۰۰۸)، سازندهای فرسایش‌پذیر (۰/۰۸۲)، بر اساس معنی‌داری به‌عنوان عامل‌های برتر برای معادله نهایی انتخاب شدند. متغیرهای تراکم زهکشی و درصد پوشش‌گیاهی از مدل‌سازی حذف شدند. نتایج حاضر ضمن معرفی عوامل تاثیرگذار بر میزان تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل، می‌تواند برای برآورد رسوب به مناطق فاقد آمار تعمیم داده شود.

واژه‌های کلیدی: تعمیم منطقه‌ای، تولید رسوب، غلظت رسوب معلق، مدل‌سازی، منحنی سنجه رسوب

[۱] - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، تلفن تماس ۰۹۱۲۰۵۰۳۲۸۱، esfandyari@uma.ac.ir

[۲] - دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ۰۹۱۴۴۸۱۵۷۴۳، raoofmostafazadeh@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۳] - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران ۰۹۳۸۹۴۹۷۲۴۲ behrouznezafat75@gmail.com

[۴] - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران ۰۹۳۸۰۹۶۷۹۴۶ a.hesam773@gmail.com

مقدمه

برآورد رسوب معلق[1] از موارد ضروری در اتخاذ روش‌های مدیریت بهتر زمین و آب در حوزه‌های آبخیز است. حمل و نقل رسوب[2] در رودخانه‌ها دارای اثرات منفی مانند پرشدن مخزن و تغییر در خصوصیات کانال است که ممکن است رسوبات حاصل از دامنه‌ها و مناطق کوچک در شبکه رودخانه‌ها و یا کانال‌های آبیاری تجمع یابند. علاوه بر این موجب از بین‌رفتن حاصل‌خیزی و مواد مغذی خاک که باعث کاهش بهره‌وری و هم‌چنین آلودگی منابع آب می‌شود. مطالعه فرسایش[3] و عملکرد آن به‌دلیل اهمیت اقتصادی حاصل از آن زمینه مهمی از تحقیقات هیدرولوژیکی را شامل می‌شود که از لحاظ ساختار خاک و حاصل‌خیزی آن به‌ویژه در زمین‌های شیب‌دار و درحال تخریب دارای اهمیت است (عسگری و همکاران، ۱۳۹۹؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۴۰۱). به‌طور کلی کشت روی مناطق شیب‌دار از نظر ایجاد رواناب[4] و سیلاب‌های ناگهانی[5] و کاهش تولید محصول و غیره بر محیط‌زیست تاثیر می‌گذارد. برآورد میزان رسوب در برنامه‌ریزی و طراحی پروژه‌های توسعه منابع آب به‌ویژه برای مطالعه امکان‌سنجی احداث سد، ارزیابی بیلان رسوب و برآورد تحویل نسبت رسوب و نیز ارزیابی تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه براین، داده‌های رسوب به‌دلیل کمبود ایستگاه‌های پایش در دسترس نیستند. فرسایش و انتقال رسوب پدیده پیچیده‌ای است و این فرآیندها تحت تاثیر عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی و استفاده از زمین قرار دارد (ووتیچایکیتچارون و همکاران[6]، ۲۰۱۴؛ آریس و همکاران، ۲۰۱۶). هر ساله بخش عظیمی خاک از سطوح حوزه‌های آبخیز کشور توسط عوامل مختلف به‌ویژه آب و باد فرسایش به محل دیگری انتقال یافته و ضمن پایین آوردن کیفیت منابع آب و خاک، مشکلات زیادی را از نظر اقتصادی و اجتماعی پدید می‌آورد. از طرفی دیگر مجهز کردن تمامی حوزه‌ها به ابزارهای اندازه‌گیری و تهیه نمونه‌های تکراری و مرتب نه‌تنها از نظر تخصصی ممکن نیست بلکه مستلزم صرف وقت و هزینه کلانی است. برای این منظور مشخص کردن راهکارهایی برای برآورد علمی و دقیق رسوب‌دهی در حوزه‌های آبخیز کشور به‌منظور کنترل این فرآیند امری ضروری است. روش‌های تجزیه و تحلیل آماری به‌واسطه امکان ایجاد مدل‌های مناسب برای برآورد میزان رسوب معلق و شناسایی متغیرهای مؤثر در رسوب‌دهی زیرحوزه‌های بدون ایستگاه اندازه‌گیری می‌توانند در این زمینه تاثیرگذار باشند (تلوری، ۱۳۸۱).

در مدل‌سازی و ارزیابی رسوب معلق جریان می‌توان از عوامل ژئومورفولوژیکی، اقلیمی و هیدرولوژیکی استفاده نمود. تولید رسوب توسط عوامل کنترل‌کننده فرسایش و رسوب شامل توپوگرافی محلی، ویژگی‌های خاک، آب و هوا، پوشش‌گیاهی، مورفولوژی حوزه، ویژگی‌های شبکه زهکشی و استفاده از زمین کنترل می‌شود. رابطه بین میانگین بارش سالانه و رسوب در ایالات متحده مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده است که ارتباط مشخصی بین آب و هوا و رسوبات وجود ندارد چرا که اثرات آب و هوا بر بار رسوب بسیار پیچیده است (اندرسون، ۱۹۵۷). عواملی مانند حوزه آبریز، شرایط اقلیمی و پوشش‌گیاهی بر میزان تولید رسوب در هریک از حوزه‌های مورد مطالعه مؤثر هستند. پیش‌بینی جامع رسوب بر اساس مطالعه کوهن در مقیاس جهانی توسط مدل تعادل آب و بار رسوب انجام می‌شود که مهم‌ترین ورودی‌های این مدل شامل عوامل انسانی، پوشش یخ، سنگ‌شناسی، رسوب مخزن، دما و دبی روزانه است (کوهن و همکاران، ۲۰۱۳). عملکرد بار معلق در یک حوزه از طریق فرآیندهای فیزیکی مانند جداسازی خاک، حمل‌ونقل و رسوب رخ می‌دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). تاکنون مطالعات متعددی در خصوص نقش عوامل ژئومورفیک، هیدرواقلیمی و فیزیوگرافی بر میزان رسوب‌دهی انجام شده است. فغفوری و همکاران (۱۳۹۶)، به‌منظور تعیین عوامل موثر بر رسوب‌دهی در حوضه سیدآباد از روش‌های آماری رگرسیونی استفاده کردند و به‌این نتیجه رسیدند که به‌ترتیب عوامل روان آب (۰/۰۲)،

---

[1]- Suspended Sediment
[2] - Sediment
[3] - Erosion
[4] - Runoff
[5]- Flash Flood
[6]- Wuttichaikitcharoen

سنگ‌های فرسایش‌پذیر (۰/۰۰۱)، ضریب روان آب (۰/۰۰۰۵)، درصد شن (۰/۰۰۰۰۲) از پارامترهای موثر بر رسوب‌دهی در حوضه تشخیص داده شدند. نصرتی و همکاران (۱۳۹۷)، در تحلیل منطقه‌ای بار رسوب معلق در حوزه آبخیز سفیدرود با روش رگرسیون و تحلیل مولفه‌های اصلی بیان نمودند که در منطقه همگن ۱، فاکتور اول با مقدار ضریب تبیین دبی رسوب ۲۵ ساله ۰/۶۷ و در منطقه همگن ۲، نیز فاکتور اول و دوم با ضریب تعیین ۰/۳۲ وارد مدل شدند. هنربخش و همکاران (۱۳۹۸)، به مدل‌سازی رابطه میزان رسوب و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوزه سد دز با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی و رگرسیون چندگانه پرداختند و به‌این نتیجه رسیدند که دبی سالانه، متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوزه از مهم‌ترین متغیرهای برآورد رسوبات معلق بودند و دبی سالانه نیز تاثیرگذارترین متغیر مدل‌های برآورد رسوبات معلق بود. معتمدی و آذری (۱۳۹۶)، به‌منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک با رسوبات در آبخیز خراسان رضوی با رگرسیون چند متغیره[1] مورد بررسی قرار دادند و ایشان به‌این نتیجه رسیدند که با توسعه سیستم اطلاعات جغرافیایی در استخراج متغیرهای فیزیوگرافیکی و ژئومورفولوژیکی امکان ارائه روابط منطقه‌ای برای پیش‌بینی رسوب وجود دارد. اصغری سراسکانرود و قلعه (۱۳۹۸)، به‌منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و میزان تولید رسوب در حوزه قرنقو استان آذربایجان شرقی را با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی[2] و رگرسیون چندگانه مورد بررسی قرار دادند و ایشان به این نتیجه رسیدند که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوزه توانسته‌اند با ۹۲/۲ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کنند. در خارج از کشور نیز، سلیم[3] (۲۰۱۴)، ویژگی‌های ژئومورفولوژیک مؤثر در رسوب را برای حوضه‌های در جنوب اردن با استفاده رگرسیون گام به گام استخراج کرد. ایشان به این نتیجه رسیدند که اهمیت ۴۳ ٪ از کل متغیرهای مورد مطالعه در میزان رسوب، کمتر از ۵ درصد است. در این تحقیق دبی حوضه، درصد پوشش‌گیاهی و شیب حوضه به‌ترتیب مهم‌ترین متغیرها در میزان رسوب هستند.

چانگ[4] و همکاران (۲۰۱۷)، ارتباط بین توپوگرافی و فرسایش خاک را در فلات لسی چین با مولفه PCA و رگرسیون خطی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که خصوصیات توپوگرافی حوزه و شاخص توپوگرافی فرسایش از الگوی مشابه برخوردارند و بین شاخص توپوگرافی فرسایش و متغیرهای دبی رسوب حوزه هم‌بستگی مثبت وجود دارد. تاناناییو[5] (۲۰۱۷)، در پژوهشی با استفاده از تحلیل رگرسیون چندمتغیره به محاسبه رسوبات معلق روان‌آب پرداخت و مدل‌های نظری گسترده و هم‌چنین روش‌ها و الگوریتم‌های ارزیابی ضرایب رگرسیون را مورد تحلیل قرار داد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تغییر پیش‌بینی کننده در معادلات منحنی سنجه رسوب در صورت لزوم نیازمند ارزیابی آماری است، هم‌چنین تخلیه آب بهترین پیش‌بینی کننده بار رسوب بارندگی است. یوکا[6] و همکاران (۲۰۱۸)، با هدف پیش‌بینی میزان تخلیه رسوبات روزانه با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی دریافتند که روش رگرسیون چند متغیره در حوزه آبخیز جندران مناسب‌تر است. الداهول و همکاران[7] (۲۰۲۱) پیش‌بینی رسوبات معلق را با استفاده از روش‌های مختلف مبتنی برشبکه عصبی مصنوعی در رودخانه جوهور مالزی در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی، ده روزه و ماهانه انجام دادند و نتیجه گرفتند که کارایی روش پاسخ سریع داده‌های بلندمدت نسبت به سایر روش‌ها بهتر و برابر ۹۲ تا ۹۹ درصد در مقیاس‌های مختلف زمانی بوده است. بر اساس مطالعات انجام گرفته می‌توان نتیجه گرفت که عوامل مختلفی هم‌چون بارش، جنس سازند، نوع خاک، بافت رسوب، ارتفاع حوزه، شیب، دما، پوشش‌گیاهی و طول آبراهه در تولید رسوبات معلق مؤثر هستند. بنابراین

[1] - Multiple Regression
[2]- Principal Component Analysis
[3]- Salim
[4]- Cheng
[5]- Tananaev
[6]- Uca
[7]- AlDahoul

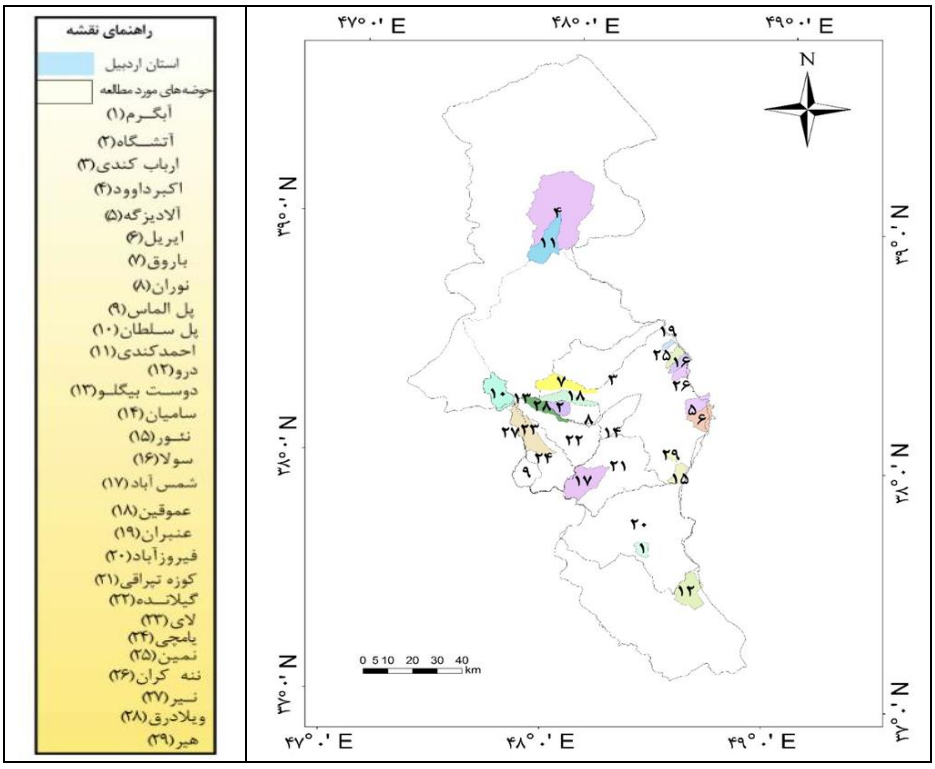
شناخت و بررسی این عوامل می‌تواند در مدل‌سازی میزان رسوبات معلق بسیار مفید واقع شود.

حوزه‌های آبخیز موجود در سطح استان اردبیل، اغلب به‌دلیل قرارگیری در منطقه کوهستانی و دارای شیب زیاد با سازندهای فرسایش‌پذیر و هم‌چنین پوشش‌گیاهی محدود، دارای پتانسیل فرسایش و رسوب‌دهی خاک شدید است. هم‌چنین عملیات نامتناسب انسانی از جمله چرای مفرط، کشت تکراری بدون توجه به توان زمین، شخم غیراستاندارد باعث تشدید فرسایش خاک در منطقه شده است. لذا با توجه به موارد فوق الذکر، برآورد میزان رسوبات معلق حوزه‌های استان ضروری به‌نظر می‌رسد. به‌منظور برآورد بار رسوب معلق روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از روش‌های مهمی که در تحلیل عوامل مؤثر در تولید رسوب به کار می‌رود، استفاده از روش‌های آماری است که این روش‌ها در سال‌های اخیر کاربرد زیادی داشته و نتایج قابل درکی به‌همراه داشته است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی میزان رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل رگرسیون چندگانه است. در این راستا از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین عوامل مستقل مؤثر بر میزان تولید رسوب استفاده شده است.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل با وسعتی معادل ۱۷۶۳۰/۸۱۷ کیلومترمربع (۱/۰۷ درصد از مساحت کشور)، در شمال فلات ایران و در شرق فلات آذربایجان، بین ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ طول شرقی، در شمال غرب ایران واقع شده است (شکل۱). پست‌ترین نقطه داخلی استان با ارتفاع ۱۰۰ متر در شهر پارس‌آباد و بیله‌سوار است و بلندترین نقطه آن، قله سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر است (پاک‌نژاد متکی و فرجی‌راد، ۱۳۸۹). استان اردبیل جزء نواحی بسیار سرد کوهستانی محسوب می‌شود و مقدار نزولات جوی در استان اردبیل به‌طور متوسط بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های مختلف استان در نوسان است (مهری و همکاران، ۱۳۹۶). بارندگی‌های استان اردبیل متاثر از اقلیم منطقه شمال غرب بوده و در اوایل فصل پاییز با ورود سیستم‌های باران‌زای غربی بارش‌ها شروع می‌شوند (خروشی و همکاران، ۱۳۹۶). آب و هوای استان اردبیل به‌طور عمده مؤثر از چهار عامل ارتفاع، عرض جغرافیایی، منابع آبی و توده‌های هوای مهاجر قرار دارد و عوامل دیگری نیز نظیر پوشش گیاهی، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و معدنی در مقیاس کوچک بر اقلیم تاثیر داشته و یا تاثیر می‌پذیرند (طاووسی و همکاران، ۱۳۸۹). با کاهش تدریجی دمای هوا، توده‌های کم فشار حرارتی مرکز ایران به‌تدریج زمینه نفوذ سامانه‌های عرض‌های میانی به نوار شمالی کشور و استان اردبیل فراهم شده و بارندگی آغاز می‌شود. از طرفی، پرفشار سیبری از شمال شرق و شمال وارد کشور شده و زبانه‌های آن شمال غرب و استان اردبیل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در صورت همزمانی این پدیده با شارش‌های ناپایدار جوی در لایه میانی جو، به‌صورت ناوه ژرف، در شمال غرب کشور افت محسوس دما همراه با بارش‌های مداوم در استان رخ می‌دهد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبخیز استان اردبیل را نشان می‌دهد. در جدول (۱)، خصوصیات ایستگاه‌های مطالعاتی در استان اردبیل ارائه شده است، عوامل مورد بررسی در برآورد و مدل‌سازی رسوب معلق شامل ارتفاع، حداقل ارتفاع، حداکثر ارتفاع، مساحت، محیط، آبراهه اصلی، شیب، مجموع طول آبراهه‌ها، تراکم زهکشی، بارش متوسط، بارش بیشینه، زمان تمرکز، پوشش‌گیاهی، سازندهای فرسایش‌پذیر و دبی رودخانه هستند (آقابیگی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل (۱): نقشه موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در استان اردبیل

جدول (۱): خصوصیات حوزه‌های آبخیز و داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

نام ایستگاه	میانگین رسوب معلق t/day	ارتفاع (m)	حداقل ارتفاع (m)	حداکثر ارتفاع (m)	مساحت (km^2)	محیط (km)	ابراهه اصلی (km)	شیب (%)	مجموع طول آبراهه‌ها (km)	تراکم زهکشی km/km^2	بارش متوسط (mm)	بارش بیشینه (mm)	زمان تمرکز روش کرپیچ (دقیقه)	پوشش‌گیاهی (%)	سازندهای فرسایش‌پذیر (%)	دبی رودخانه m^3/s
آلادیزگه	۴/۸۳	۱۴۷۰	۱۳۲۴	۲۶۵۸	۲۲	۳۳	۶/۳۹	۸	۷	۰/۱۱	۳۳۲	۴۰۲	۳۰	-۰/۴۲	۳۸/۴	۰/۲۵
آکبرداوود	۴/۹۹	۹۷۴	۳۶۲	۲۱۵۷	۷۱۰	۱۳۸	۵۱/۴۳	۱۰	۳۰۱	۰/۳۸	۳۰۳	۳۷۳	۳۰۰	-۰/۲۳	۲۴/۱۴	۰/۴۲
آرباب‌کندی	۶۳۹/۶۴	۱۷۷۲	۱۰۸۴	۴۷۷۸	۴۸۰۰	۳۵۹	۱۲۷/۸	۹	۱۴۶۰	۰/۳	۳۵۰	۵۲۷	۶۵۱	-۰/۳	۵۰/۱۸	۴/۳۹
باروق	۱۶/۸	۲۵۵۹	۱۴۳۵	۳۸۲۷	۹۶	۶۳	۳۳/۷	۱۴	۴۳	۰/۴	۳۸۴	۴۷۱	۱۶۵	-۰/۴۹	۸۲/۶۶	۰/۳۹
درو	۳۲/۰۳	۲۲۰۶	۱۵۸۸	۲۹۰۱	۱۵۸	۵۱	۱۵/۳۷	۱۸	۴۶	۰/۳۵	۳۷۵	۴۱۶	۸۴	-۰/۳	۱۰/۰۶	۰/۷۴
فیروزاباد	۱۴۹۹/۳۵	۱۸۹۲	۱۱۳۰	۳۲۳۴	۱۵۱۵	۲۱۹	۵۶/۳	۱۳	۵۱۵	۰/۳۲	۳۵۷	۴۲۳	۳۱۳	-۰/۲۶	۹/۷۱	۴/۵
گیلانده	۲۰/۲۲	۲۰۲۴	۱۳۱۱	۴۷۸۳	۱۶۳۸	۲۰۹	۹۹/۹	۱۰	۲۴۰	۰/۱	۳۶۴	۵۲۷	۵۰۲	-۰/۲۷	۶۱/۶۸	۲/۳۹
کوزه‌توپراقی	۱۴۲/۸۹	۱۷۵۳	۱۳۸۰	۲۵۴۴	۸۱۲/۵	۱۴۸	۲۱/۸	۹	۲۳۸	۰/۳	۳۸۴	۳۹۵	۱۳۱	-۰/۲۳	۱۲/۷۴	۱/۱۷
لای	۲/۳۴	۲۸۱۱	۲۰۴۵	۳۶۸۵	۳۶	۲۵	۵۱۰/	۱۶	۴۷	۲/۶	۴۱۱	۴۶۳	۵۰	-۰/۳۹	۱۰۰	۰/۱۹
نمین	۰/۷۹	۱۶۹۴	۱۴۰۸	۲۰۵۶	۴۴	۳۳	۹/۶	۱۱	۲۱	۰/۵۸	۳۴۵	۳۶۸	۶۴	-۰/۳۳	۴/۷۷	۰/۱۱
ننه‌کران	۰/۵۱	۱۴۵۰	۱۳۲۳	۱۷۱۵	۴۰	۲۴	۱۰/۰۵	۱۰	۲۰	۰/۶۴	۳۳۱	۳۴۷	۸۲	-۰/۵۱	۱۰/۰۹	۰/۱۱
پل الماس	۱۹/۳۴	۲۱۱۹	۱۴۱۰	۴۷۷۸	۱۰۷۰	۱۶۹	۶۷/۹	۱۱	۱۸۶	۰/۱۸	۳۷۰	۵۲۷	۳۲۵	-۰/۲۸	۶۲/۲۴	۲/۱۸
پل سلطانی	۱۳۱/۶۶	۲۶۷۰	۱۵۰۱	۳۹۳۲	۹۸	۵۳	۳۷/۵۶	۱۹	۱۸۹	۱/۵۳	۴۰۲	۴۷۸	۱۸۶	-۰/۳۵	۱۰۰	۱۰/۰۳
سامیان	۳۰۹/۵	۱۷۹۶	۱۲۶۵	۴۷۷۸	۴۰۰۴	۳۵۱	۱۲۷/۸	۹	۱۲۲۰	۰/۲۹	۳۵۱	۵۲۷	۶۶۴	-۰/۳۱	۰/۰۵	۴/۲۵
سولا	۱/۷۴	۱۵۶۶	۱۳۴۳	۱۸۵۷	۴۴	۳۲	۱۴/۸	۱۱	۲۱	۰/۵۴	۳۳۸	۳۵۶	۱۱۵	-۰/۴۴	۹/۶۳	۰/۲۱
ویلادرق	۰/۶۶	۳۰۸۴	۱۸۱۰	۴۷۸۳	۹۴	۵۲	۲/۷۱	۱۸	۳	۰/۰۴	۴۲۷	۵۲۷	۹	-۰/۳	۹۹/۹۸	۰/۰۸
یامچی	۱۱/۵۶	۱۲۰۸	۱۵۵۰	۴۳۶۵	۷۱۰	۱۴۳	۲۰/۴۹	۱۱	۶۷۰	۱/۱۷	۳۷۰	۵۰۳	۸۷	-۰/۳۱	۵۴/۸۲	۶/۱۴
نیر	۵/۵۹	۲۵۱۵	۱۶۰۲	۴۳۶۵	۲۵۶	۸۲	۳۹/۶	۱۴	۱۸	۰/۱۱	۳۹۳	۵۰۳	۱۸۸	-۰/۳۳	۹۲/۱۷	۱/۳۴
نوران	۳/۹۲	۱۷۹۰	۱۳۳۴	۳۶۶۲	۴۴	۱۲۳	۲۸/۱۷	۸	۴۶	۰/۲۳	۳۵۱	۴۶۱	۱۳۵	-۰/۳۶	۹۴/۰۲	۰/۴۶
نئور	۳/۴۲	۲۱۳۱	۱۳۵۰	۳۲۴۰	۴۴	۱۳۶	۱۸/۴۸	۱۲	۵۳	۰/۲۴	۳۷۱	۴۳۶	۹۱	-۰/۴	۱۵/۶۱	۰/۵
عموقین	۴/۰۷	۲۲۰۴	۱۴۲۸	۳۸۱۰	۱۱۰	۵۴	۱۷/۴۶	۱۳	۲۷	۰/۳۴	۳۷۵	۴۷۱	۷۷	-۰/۵	۹۹/۵۱	۰/۴
عنبران	۱۰/۲۴	۱۶۴۱	۱۲۹۹	۲۳۲۳	۳۶	۱۰۴	۱۸/۷	۹	۷۴	۰/۴۶	۳۴۲	۳۸۲	۱۱۶	-۰/۲۵	۰	۰/۲۲
آتشگاه	۸/۰۱	۲۰۶۳	۱۴۲۶	۳۶۱۳	۴۴	۴۷	۱۸/۵۳	۱۲	۲۲	۰/۲۱	۳۶۷	۴۵۸	۸۵	-۰/۴۳	۸۹/۷۱	۰/۷

روش تحقیق

هدف این پژوهش بررسی ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و میزان تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل است. در مرحله اول، ابتدا عوامل مؤثر در مدل‌سازی میزان رسوبات معلق بر اساس مرور منابع در مناطق مختلف و استان اردبیل مشخص شد که شامل دما، بارش، بافت رسوب، پوشش گیاهی، شیب، جنس سازند، ارتفاع حوزه، مساحت حوزه، طول آبراهه، نوع خاک و تراکم زهکشی شناسایی بودند. آمار دبی و رسوب معلق ایستگاه‌های هیدرومتری و بارندگی روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شد. در انتخاب ایستگاه‌ها، اولویت با آمار بلندمدت و کامل نمونه‌برداری‌های رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری بوده و ایستگاه‌های بارانسنجی نیز بر این اساس منطبق شد. دوره زمانی مشترک مورد استفاده در این تحقیق یک دوره ۳۵ ساله از سال آبی ۶۰ تا سال آبی ۹۵ را شامل می‌شود که در انتخاب این پایه زمانی مشترک معیارهای کامل بودن، طول کافی داده‌ها و استفاده از آخرین داده‌های در دسترس مد نظر قرار گرفت. در این پژوهش به‌منظور استخراج ویژگی‌های ژئومورفیک حوزه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع، نقشه زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی منطقه و کاربری اراضی نیز مطالعات قبلی استفاده شد (نصیری و همکاران، ۱۳۹۸؛ عسگری و همکاران، ۱۳۹۹). در مرحله بعد، معادلات منحنی سنجه رسوب در نرم‌افزار اکسل بر اساس معادله مناسب میان میزان رسوب معلق (بر حسب تن در روز) و دبی (مترمکعب در ثانیه) در هریک از ایستگاه‌های مورد

مطالعه به‌دست آمدند. سپس با استفاده از تحلیل PCA متغیرهای مؤثر بر مقادیر رسوب معلق مشخص خواهند شد. این روش در نرم‌افزار Xlstat انجام شد و متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل‌سازی خلاصه‌سازی می‌شوند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های کاهش داده‌های مؤثر بر یک پدیده است و در این روش چندمتغیره، توصیف روابط درونی متغیرها انجام می‌شود (آذرمدل و همکاران، ۱۳۸۹؛ ژانگ، ۲۰۱۷). در این روش، بین تعداد کثیری از عوامل، ارتباط خاصی تحت یک مدل فرضی ایجاد می‌شود و سپس هر عامل به‌صورت ترکیب خطی از فاکتورهای پنهان تبدیل می‌شود. در این روش متغیرها به‌مجموعه‌ای کوچکتری از عامل‌ها با کم‌ترین اطلاعات از دست‌رفته و مؤثرترین اطلاعات مؤثر بر پدیده تبدیل می‌شوند. در تحلیل عاملی، متغیرهایی که در یک عامل تعریف می‌شوند، به یکدیگر کاملاً وابستگی دارند و این وابستگی، عامل را به‌وجود می‌آورد. از طرفی متغیرهای هر عامل هیچ وابستگی به متغیرهای عامل‌های دیگر ندارد (زارع چاهوکی، ۱۳۹۰). هم‌چنین جهت تعیین میزان متغیرهای مستقل در برآورد و پیش‌بینی متغیر وابسته از تحلیل رگرسیون چندگانه استفاده می‌شود. هدف از تحلیل رگرسیون چندگانه پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته با توجه به تغییرات متغیرهای مستقل است. با استفاده از رگرسیون چندگانه رابطه خطی بین مجموعه‌ای از عوامل مؤثر در مدل‌سازی میزان رسوبات معلق تجزیه و تحلیل شده و بر اساس نتایج به‌دست آمده میزان رسوبدهی هر یک از حوزه‌ها به‌دست خواهد آمد.

منحنی‌های سنجه رسوب

منحنی سنجه رسوب، مربوط به غلظت رسوبات معلق رودخانه به‌منظور برآورد رسوبات از داده‌های دبی جریان رودخانه استفاده می‌کند. منحنی سنجه رسوب به‌طور کلی نشان‌دهنده یک رابطه نمایی است (حلبیان و حیدری، ۱۳۹۵). هیدرولوژیست‌ها در صورت کمبود داده‌های غلظت رسوب معلق، از منحنی‌های سنجه برای پیش‌بینی و برآورد غلظت رسوب معلق جریان‌ها استفاده می‌کنند (هورویتز، ۲۰۰۲). روش‌های برآورد رسوب از نظر نوع منحنی سنجه و استفاده از دبی جریان، به منحنی سنجه یک خطی، چندخطی و حدوسط دسته‌ها طبقه‌بندی می‌شوند (ثقفیان و همکاران، ۱۳۸۷). که تمامی آن‌ها از رابطه اداره عمران اراضی آمریکا (USBR)[1] پیروی می‌کنند. این رابطه به‌صورت زیر است:

$$Q_S = aQ_w^b$$ رابطه ۱

که در آن، Q_s دبی رسوب بر حسب میلی‌گرم در لیتر یا تن در روز، Qw دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه و a و b ضرایب ثابت معادله هستند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

روش آماری کاهش متغیرهای مستقل در مدل‌سازی تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، نامیده می‌شود و در بسیاری از زمینه‌های تحقیق علمی استفاده شده است. در روش تحلیل مؤلفه اصلی، متغیرهایی که دارای هم‌بستگی بالایی بوده و در یک فضای چند بعدی توزیع شده‌اند، به‌مجموعه‌ای از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌شوند که هر یک از آن‌ها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی هستند. مؤلفه‌های غیرهمبسته به‌دست آمده مؤلفه‌های اصلی (PC) نامیده می‌شوند (اصغری سراسکانرود و قلعه، ۱۳۹۸). تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های کاهش داده‌های مؤثر بر یک پدیده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). در این روش چندمتغیره، توصیف روابط درونی متغیرها انجام می‌شود (مهتدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ معتمدی و آذری، ۱۳۹۶). در این روش، بین تعداد کثیری از عوامل، ارتباط خاصی تحت یک مدل فرضی ایجاد می‌شود و سپس هر عامل به‌صورت ترکیب خطی از فاکتورهای پنهان تبدیل می‌شود. در این روش متغیرها به‌مجموعه‌ای کوچکتری از عامل‌ها با کم‌ترین اطلاعات از دست‌رفته و مؤثرترین اطلاعات مؤثر بر پدیده تبدیل می‌شوند. در تحلیل عاملی، متغیرهایی که در یک عامل تعریف می‌شوند، به یکدیگر کاملاً وابستگی دارند و این وابستگی، عامل را به‌وجود می‌آورد. از طرفی متغیرهای هر عامل هیچ وابستگی به متغیرهای عامل‌های دیگر ندارد (یزدان‌خواه، ۱۳۸۷). از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

[1]- U.S. Bureau of Reclamation

به‌منظور تعیین مؤثرترین ویژگی‌های رسوبات و هم‌چنین گروه‌بندی آن‌ها استفاده شد.

رگرسیون چندگانه

در این تحقیق از تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش خلاصه‌سازی و کاهنده عوامل، برای انجام تحلیل رگرسیون مورد استفاده قرار گرفت. در این روش تاثیر تعدادی متغیر مستقل روی یک متغیر وابسته را مورد بررسی قرار می‌دهد. در رگرسیون چندگانه، متغیر مستقلی که تاثیر کمتری در ارتباط با متغیر وابسته ندارد از تجزیه و تحلیل حذف شده و به معادله وارد نمی‌شود. در این خصوص، براساس سطح معنی‌داری متغیر مستقلی که مقدار آن بیشتر از ۰/۰۵ باشد تأثیر کمتری بر متغیر وابسته داشته و بنابراین از رابطه رگرسیونی و مدل‌سازی نهایی حذف شدند. شکل کلی رابطه رگرسیون چندگانه به‌صورت رابطه زیر است:

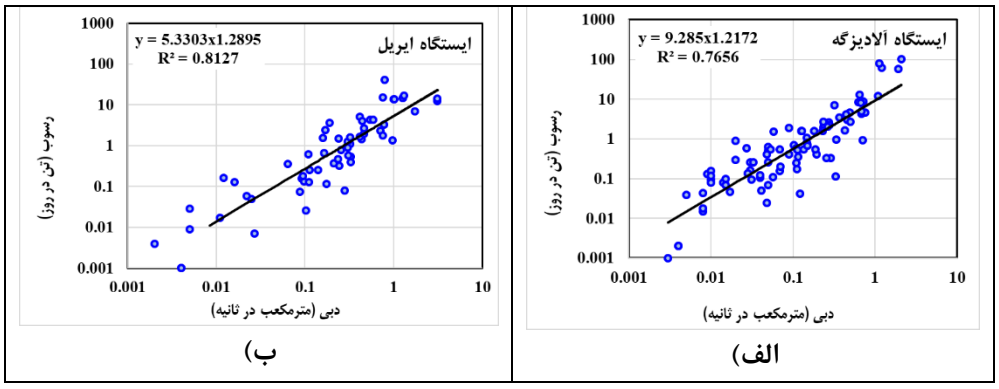
رابطه ۲ ه $$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n + e$$

که در آن، Y، متغیر وابسته (رسوب معلق سالانه)، a : ضریب ثابت و Xn، ....، X2، X1 متغیرهای مستقل هستند که ویژگی‌ها و متغیرهای ژئومورفیک حوزه هستند. هم‌چنین bn ، b1،b2 ضریب مربوط به هر یک از متغیرهای مستقل و e : نشان‌دهنده خطای مدل رگرسیون است (زارع چاهوکی، ۱۳۹۰). یکی از شرایط کاربرد و استفاده از رگرسیون چندگانه در بررسی داده‌ها، نبود هم‌خطی چندگانه بین متغیرهای مستقل است (فغفوری و همکاران، ۱۳۹۶)، که در این پژوهش با استفاده از عامل تورم واریانس بررسی شد.

نتایج و بحث

نتایج منحنی سنجه رسوب

در شکل ۲، منحنی‌های سنجه رسوب ایستگاه‌های آلادیزگه (الف) و ایریل (ب)، نشان داده شده است که بر اساس غلظت رسوب معلق و دبی جریان معادلات منحنی سنجه رسوب برای هریک از ایستگاه‌ها برآورد و ترسیم شد



شکل (۲): منحنی سنجه رسوب ترسیم شده ایستگاه آلادیزگه (الف) و ایریل (ب)

پس از بررسی ارتباط بین غلظت رسوبات معلق و دبی رودخانه معادلات منحنی سنجه رسوب برای ایستگاه‌های مختلف برآورد شد. جدول ۲، نتایج معادلات منحنی‌های سنجه رسوب ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در پژوهش مساعدی و همکاران (۱۳۸۸)، معادله‌های منحنی سنجه رسوب در ایستگاه‌های ورودی به سدهای دز و کرج مشخص شد و بیان شد که معادله‌های سنجه رسوب تولید رسوب را در سد دز حدود ۷۰ درصد و در سد کرج حدود ۹۷ درصد مقادیر مشاهداتی می‌کنند. عسگری و همکاران (۱۳۹۹) نیز در بررسی ارتباط بین دبی و رسوبات معلق ایستگاه‌های استان اردبیل به این

نتیجه رسیدند که در اکثر ایستگاه‌ها روابط نمایی برآورد مناسبی از مقادیر رسوبات معلق ارائه داده است.

جدول (۲): معادلات منحنی‌های سنجه رسوب ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	معادله منحنی سنجه رسوب	R^2	نام ایستگاه	معادله منحنی سنجه رسوب	R^2
آتشگاه	$y = 10.14x^{1.1622}$	0.8296	عموقین	$y = 6.179x^{1.1715}$	0.7723
آبگرم	$y = 8.9912x^{1.7456}$	0.7653	عنبران	$y = 3.6664x^{1.0457}$	0.6242
اکبرداوود	$y = 4.8794x + 2.9034$	0.5205	فیروزآباد	$y = 15.327x^{1.6337}$	0.8284
باروق	$y = 68.153x - 10.001$	0.3157	کوزه تپراقی	$y = 4.9843x^{0.9617}$	0.58
پل الماس	$y = 12.044x - 6.9707$	0.6375	گیلانده	$y = 4.0865x^{1.2182}$	0.7552
پل سلطان	$y = 11.116x^{1.2422}$	0.5073	لای	$y = 3.8554x^{1.052}$	0.3417
درو	$y = 8.6399x^{1.4698}$	0.6732	نمین	$y = 3.172x^{1.1375}$	0.5576
دوست بیگلو	$y = 17.53x^{1.0467}$	0.435	ننه‌کران	$y = 3.2499x + 0.1498$	0.2607
سامیان	$y = 155.24x - 350.94$	0.3322	نوران	$y = 4.2067x^{1.0759}$	0.7509
نئور	$y = 3.8634x^{0.8763}$	0.5629	نیر	$y = 1.465x + 4.1151$	0.1994
سولا	$y = 14.175x - 1.3813$	0.3543	ویلادرق	$y = 4.1743x^{1.1033}$	0.2643
شمس آباد	$y = 6.8688x^{1.3145}$	0.8025	هیر	$y = 7.0586x^{1.4147}$	0.692

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی

جدول ۳ نتایج هم‌بستگی پیرسون بین متغیرهای ژئومورفیک مؤثر بر رسوب معلق در زیرحوزه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی بین (آبراهه اصلی، زمان تمرکز، حداکثر ارتفاع، بارش بیشینه) حدود ۹۹ درصد است. هم‌چنین از بین ۱۴ مؤلفه اصلی در مقادیر ویژه تحیل مؤلفه اصلی مؤلفه اول با مقدار ۴۰/۶۹ درصد از کل واریانس و مقادیر ویژه دوم ۳۰/۶۴ درصد از کل واریانس را به خود اختصاص دادند. در نهایت ۴ مؤلفه اصلی با مقدار ۸۶/۳۹ درصد برای ارزیابی میزان تاثیرگذاری متغیرها در مدل‌سازی رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش‌های دیگر مانند اصغری سراسکانرود و قلعه (۱۳۹۸)، با بررسی ارتباط ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و میزان تولید رسوب در حوزه قرنقو استان آذربایجان شرقی با استفاده تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون چندگانه به این نتیجه رسیدند که چهار عامل مساحت، محیط، طول و ضریب فرم حوزه توانسته‌اند با ۹۲/۲ درصد از واریانس تمامی متغیرهای پژوهش را تبیین کنند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به مطالعه و بررسی چگونگی تولید رسوب تحت شرایط مختلف بارندگی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حوزه آبخیز لائوس پلاتای چین با استفاده از روشهای PCA و رگرسیون چندگانه پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که به‌ترتیب متغیرهای شکل حوزه، ضریب مئاندری رودخانه، طول آبراهه اصلی ، مناطق ارتفاعی، وضعیت بارش و شیب تأثیرات زیادی بر روی رسوبات حمل شده دارند.

جدول (۳): هم‌بستگی پیرسون بین متغیرهای ژئومورفیک مؤثر بر رسوب معلق در زیرحوزه‌های مورد مطالعه

متغیرها	ارتفاع (m)	حداقل ارتفاع (m)	حداکثر ارتفاع (m)	مساحت (km^2)	محیط (km)	آبراهه اصلی (km)	شیب (%)	طول آبراهه‌ها (km)	تراکم زهکشی ($km-km^2$)	بارش متوسط (mm)	بارش بیشینه (mm)	زمان تمرکز (دقیقه)	پوشش‌گیاهی (%)	سازندهای فرسایش‌پذیر (%)	دبی رودخانه (M^3/s)
ارتفاع متوسط حوزه (m)	**۱**	**۰/۵۳**	۰/۳۴	-۰/۱۴	-۰/۲۲	-۰/۰۵	**۰/۶۵**	-۰/۳۱	۰/۰۸	**۰/۷۲**	۰/۳۴	-۰/۰۹	-۰/۱۶	**۰/۵۱**	-۰/۱۰
ارتفاع حداقل حوزه (m)		**۱**	۰/۳۰	-۰/۳۲	-۰/۴۱	-۰/۳۹	**۱**	-۰/۳۲	**۰/۴۲**	**۰/۸۰**	۰/۳۱	-۰/۴۴	-۰/۲۸	**۰/۴۵**	-۰/۰۳
ارتفاع حداکثر حوزه (m)			**۱**	**۰/۴**	**۰/۴۹**	**۰/۵۵**	۰/۲۳	**۰/۴۳**	-۰/۰۴	**۰/۵۵**	**۰/۹۹**	**۰/۴۸**	۰/۱۷	**۰/۵۹**	**۰/۴۳**
مساحت (km^2)				**۱**	**۰/۹۳**	**۰/۹۱**	-۰/۳۲	**۰/۹۵**	-۰/۱۷	-۰/۱۸	**۰/۴۷**	**۰/۹۲**	۰/۳۷	-۰/۲۱	**۰/۴۱**
محیط (km)					**۱**	**۰/۹۰**	-۰/۳۹	**۰/۸۹**	-۰/۲۷	-۰/۲۰	**۰/۴۷**	**۰/۹۰**	**۰/۵۱**	-۰/۲۵	**۰/۴۲**
آبراهه اصلی (km)						**۱**	-۰/۲۸	**۰/۸۱**	-۰/۲۱	-۰/۱۸	**۰/۵۴**	**۰/۹۹**	۰/۳۸	-۰/۱۰	**۰/۴۴**
شیب (%)							**۱**	-۰/۲۹	۰/۳۷	**۰/۷۲**	۰/۲۳	-۰/۳۰	-۰/۰۵	**۰/۴۳**	۰/۲۲
طول آبراهه‌ها (km)								**۱**	-۰/۰۳	-۰/۱۸	**۰/۴۲**	**۰/۸۲**	۰/۳۶	-۰/۲۲	**۰/۵۴**
تراکم زهکشی ($km-km^2$)									**۱**	۰/۳۱	-۰/۰۳	-۰/۲۲	-۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۲۸
بارش متوسط (mm)										**۱**	**۰/۵۵**	-۰/۲۴	-۰/۰۲	**۰/۶۲**	۰/۱۸
بارش بیشینه (mm)											**۱**	**۰/۴۷**	۰/۱۶	**۰/۶۰**	**۰/۴۲**
زمان تمرکز (دقیقه)												**۱**	۰/۴۰	-۰/۱۷	**۰/۴۲**
پوشش‌گیاهی (%)													**۱**	-۰/۲۷	۰/۲۸
سازندهای فرسایش‌پذیر (%)														**۱**	۰/۱۲
دبی رودخانه (M^3/s)															**۱**

اعداد پررنگ در جدول نشان‌دهنده معنی‌داری ضریب همبستگی‌های ارائه شده هستند.

بر اساس جدول ۴، نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و درصد واریانس توجیه شده داده‌ها نشان داده شده است. با توجه به جدول، مقادیر ویژه جدول واریماکس از سمت راست به‌سمت چپ کاهش می‌یابد. هم‌چنین سهم مقادیر ویژه در تبیین واریانس نیز کاهش می‌یابد. بدین‌ترتیب مقادیر ویژه اول با بیش‌ترین سهم ۴۰/۶۹ درصد از کل واریانس و مقادیر ویژه دوم با ۳۰/۶۴ درصد از کل واریانس را تبیین می‌کنند. چنان‌چه در جدول مشاهده می‌شود، هم‌بستگی بین متغیرهایی که در مؤلفه ۱ بیش‌ترین ضریب را دارند زیاد است و در مؤلفه دوم، ۳۰/۶۴ واریانس داده‌ها توجیه می‌شود. هم‌چنین، مؤلفه‌های سوم، چهارم و پنجم به‌ترتیب، ۸۰/۶۶، ۸۶/۳۹ و ۹۰/۱۱ درصد از کل واریانس کل داده‌ها را تفسیر می‌کنند. بنابراین به‌جای این‌که از ۱۴ متغیر برای توضیح تغییرات استفاده شود، از ۴ مؤلفه اصلی که بیش‌ترین تغییرات را توجیه می‌کنند، در مدل‌سازی میزان رسوب در حوزه‌های آبخیز استان استفاده شد

جدول (۴): مقادیر ویژه تحلیل مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه‌ها													
	۱۰/	۵۹/	۳۹/	۸۵/	۵۵/	۴۱/	۳۴/	۲۴/	۱۸/	۱۵/	۰۷/	۰۲/	۰۲/	۰۰۸/
مقادیر ویژه										۰	۱	۲	۳	٤
واریانس تبیین شده (٪)	۰/۶۹	۰/۶۴	۳۲/	۷۲/	۷۲/	۷۶/	۲۸/	۶۴/	۲۵/	۰۵/	۵۱/	۱۹/	۱۳/	۰۵/
واریانس تجمعی (٪)	۰/۶۹	۱/۳۳	۰/۶۶	۶/۳۹	۰/۱۱	۲/۸۷	۵/۱۶	۶/۸۰	۸/۰۶	۹/۱۱	۹/۶۲	۹/۸۱	۹/۹۴	۰۰

در جدول ۵، متغیرها با بیش‌ترین تاثیر به‌صورت پررنگ نشان داده شده‌اند. در مؤلفه اول ۶ متغیر شامل مساحت، محیط، آبراهه اصلی، مجموع طول آبراهه‌ها، زمان تمرکز، و دبی رودخانه از تاثیرگذارترین متغیرهایی هستند که می‌توان گفت در مؤلفه اول با متغیرهایی که مربوط به محیط است بیش‌ترین ارتباط را دارد. متغیر محیط با بیش‌ترین ضریب (۰/۹۰)، در مؤلفه اول از تاثیرگذاری بیش‌تری برخوردار است. در مؤلفه دوم ۷ متغیر مشخص شده در جدول تاثیرگذارترین متغیرها هستند. هم‌چنین در مؤلفه سوم، تراکم زهکشی (۰/۷۲)، در مؤلفه چهارم، پوشش‌گیاهی (۰/۴۵)، دارای بیش‌ترین ضرایب تاثیر بر تولید رسوب هستند.

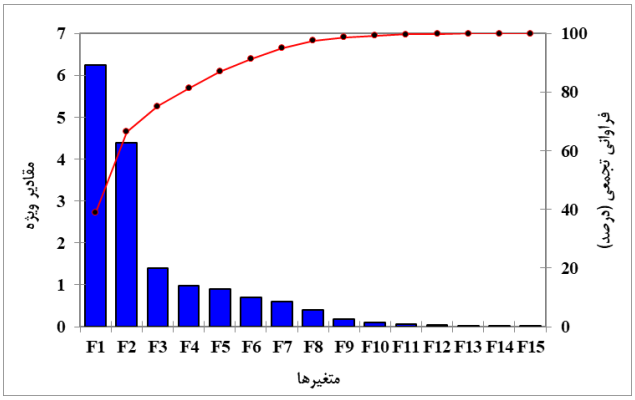
جدول (۵): ضرایب متغیرهای مؤثر در تولید رسوب در هر مؤلفه بعد از چرخش واریماکس

متغیرها	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴
ارتفاع (m)	۰/۰۰	**۰/۸۰**	۰/۰۰	۰/۰۱
حداقل ارتفاع (m)	۰/۱۶	**۰/٦٥**	۰/۰۳	۰/۰۰
حداکثر ارتفاع (m)	۰/۳۴	**۰/٤٧**	۰/۰۶	۰/۰۱
مساحت (km^2)	**۰/۷۹**	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
محیط (km)	**۰/۹۰**	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
آبراهه اصلی (km)	**۰/۸۸**	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲
شیب (%)	۰/۰۵	**۰/۵۲**	۰/۲۱	۰/۰۲
مجموع طول آبراهه‌ها (km)	**۰/٦٧**	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۰۰
تراکم زهکشی ($km-km^2$)	۰/۰۸	۰/۰۴	**۰/۷۲**	۰/۰۶
بارش متوسط (mm)	۰/۰۰	**۰/۸۲**	۰/۰۳	۰/۰۴
بارش بیشینه (mm)	۰/۳۴	**۰/٤٧**	۰/۰۶	۰/۰۱
زمان تمرکز (دقیقه)	**۰/۷۹**	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲
پوشش‌گیاهی (%)	۰/۳۷	۰/۰۳	۰/۰۰	**۰/٤٥**
سازندهای فرسایش‌پذیر (%)	۰/۰۰	**۰/٦٣**	۰/۰۲	۰/۱۰
دبی رودخانه (m^3/s)	**۰/٦٦**	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲

اعداد پررنگ نشان‌دهنده تأثیرگذاری بیش‌تر متغیرها در هر کدام از مولفه‌ها هستند.

در شکل ۳، نمودار تجمعی مقادیر ویژه نشان داده شده است که با در نظرگرفتن مقدار ویژه یک در محور عمودی می‌توان تعداد عامل‌های اصلی و مؤثر را مشخص کرد. نتایج نمودار واریزه‌ای در راستای نتایج جدول ۵ است. بنابراین تغییر ناگهانی شیب بین عامل‌ها می‌تواند مبنایی تکمیلی جهت گزینش عامل‌های اصلی باشد. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد بین عامل دوم و سوم شیب تندی وجود دارد و بعد از عامل چهارم شیب مقدار ویژه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد

.



شکل (۳): نمودار تجمعی مقادیر ویژه در تحلیل مؤلفه اصلی مؤثر بر رسوب‌دهی

نتایج رگرسیون چندگانه

در جدول ۶، سطح معنی‌داری و آماره F ارائه شده که مدل‌های Best Model، Stepwise، Forward و Backward، با فرض وجود رابطه خطی معنی‌دار میان متغیرهای مستقل و وابسته تأیید شدند.

جدول (۶): نتایج تجزیه واریانس مدل‌های رگرسیونی تولید رسوب

مدل	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات خطا	آماره F	سطح معنی‌داری
Best model	۲	۱۹۸۶۷۶۶/۷	۹۹۳۳۸۳/۳	۴۳/۰۷	<۰/۰۰۰۱
Stepwise	۱	۷۰۱۳۲۱/۱	۷۰۱۳۲۱/۱	۸/۱	۰/۰۱۰
Forward	۱	۷۹۲۸۱۴/۸	۷۹۲۸۱۴/۸	۹/۷	۰/۰۰۵
Backward	۸	۲۳۸۹۷۹۹/۵	۲۹۸۷۲۴/۹	۱۳۲/۷	<۰/۰۰۰۱

در جدول ۷، باتوجه به مدل‌های انتخابی در مرحله قبل مقدار ضریب ثابت و ضرایب رابطه رگرسیونی استخراج شدند. بر اساس مقدار معنی‌داری (کم‌تر از ۰/۰۵) و آماره تی در خصوص انتخاب متغیرهای مستقل که باید وارد مدل شوند اقدام شد و متغیرهای غیرمعنی‌دار از رابطه حذف شدند

.

جدول (۷): متغیرهای استخراج شده مدل با روش (Best model)

مدل	منبع	مقدار	خطای استاندارد	t	Pr > |t|	کران پایین (۹۵٪)	کران بالا (۹۵٪)
Best model	ضریب ثابت	۲۶۰۱۶/۲۵۹	۲۸۰۷/۰۲۶	۹/۲۶۸	۰/۰۰۱	۲۰۱۴۱/۰۸۶	۳۱۸۹۱/۴۳۱
	حداکثر ارتفاع (m)	۶/۲۹۸	۰/۶۷۶	۹/۳۲۰	۰/۰۰۱	۴/۸۸۴	۷/۷۱۳
	بارش بیشینه (mm)	−۱۰۶/۰۹۶	۱۱/۴۳۹	−۹/۲۷۵	۰/۰۰۱	−۱۳۰/۰۳۸	−۸۲/۱۵۵
Step wise	ضریب ثابت	−۹۲/۵۷۸	۹۹/۹۹۰	−۰/۹۲۶	۰/۳۶۶	−۳۰۱/۱۵۴	۱۱۵/۹۹۸
	محیط (km)	۱/۸۸۶	۰/۶۶۰	۲/۸۵۸	۰/۰۱۰	۰/۵۱۰	۳/۲۶۲
For ward	ضریب ثابت	−۹۶/۱۱۸	۹۴/۵۸۸	−۱/۰۱۶	۰/۳۲۲	−۲۹۳/۴۲۵	۱۰۱/۱۸۸
	محیط (km)	۲/۰۳۱	۰/۶۵۱	۳/۱۱۹	۰/۰۰۵	۰/۶۷۳	۳/۳۸۹
Backward	ضریب ثابت	۲۴۰۸۷/۳۳۸	۱۱۰۸/۰۸۰	۲۱/۷۳۸	۰/۰۰۱	۲۱۶۹۳/۴۷۷	۲۶۴۸۱/۲۰۰
	حداقل ارتفاع (m)	−۰/۲۲۲	۰/۱۱۴	−۱/۹۵۱	۰/۰۷۳	−۰/۴۶۸	۰/۰۲۴
	حداکثر ارتفاع (m)	۵/۷۷۴	۰/۲۵۹	۲۲/۳۰۹	۰/۰۰۱	۵/۲۱۵	۶/۳۳۳
	مساحت (km^2)	۰/۱۳۰	۰/۰۳۳	۳/۸۹۴	۰/۰۰۲	۰/۰۵۸	۰/۲۰۲
	محیط (km)	−۱/۰۰۶	۰/۴۷۲	−۲/۱۳۳	۰/۰۵۳	−۲/۰۲۵	۰/۰۱۳
	مجموع طول آبراهه‌ها (km)	۰/۲۵۷	۰/۰۸۶	۲/۹۹۴	۰/۰۱۰	۰/۰۷۲	۰/۴۴۳
	بارش متوسط (mm)	۲/۶۳۶	۰/۸۵۰	۳/۱۰۰	۰/۰۰۸	۰/۷۹۹	۴/۴۷۳
	بارش بیشینه (mm)	−۹۹/۴۱۱	۴/۲۷۵	−۲۳/۲۵	۰/۰۰۱	−۱۰۸/۶۴۶	−۹۰/۱۷۶
	سازند فرسایش‌پذیر (%)	۱/۱۰۷	۰/۵۸۸	۱/۸۸۴	۰/۰۸۲	−۰/۱۶۲	۲/۳۷۷

مدل‌سازی تولید رسوب

در جدول ۱۲، همان‌طور که مشاهده می‌شود معادلات منتخب بر اساس مقدار هر یک از متغیرها مقدار ضرایب معادلات استخراج شدند. در روابط روش‌های Stepwise و Forward، عامل محیط به‌عنوان عامل بهتر برای برآورد رسوب معلق انتخاب شد. در روش Backward، عامل‌های حداقل ارتفاع (۰/۰۷۳)، حداکثر ارتفاع (۰/۰۰۰۱>)، مساحت (۰/۰۰۳)، محیط (۰/۰۵۳)، مجموع طول آبراهه‌ها (۰/۰۱۰)، بارش متوسط (۰/۰۰۸)، بارش بیشینه (۰/۰۰۰۱>)، سازندهای فرسایش‌پذیر (۰/۰۸۲)، عوامل تاثیرگذار در برآورد رسوب معلق هستند. رمضانی‌پور و همکاران (۱۳۹۶)، به‌منظور تعیین مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق از تحلیل رگرسیونی و منحنی سنجه رسوب استفاده شد و مشخص شد که پوشش‌گیاهی و اقلیمی با داشتن کم‌ترین میزان خطای برآورد به‌عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند. چانگ و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی ارتباط بین توپوگرافی و فرسایش خاک را در فلات لسی چین با مؤلفه PCA و رگرسیون دریافتند که خصوصیات توپوگرافی حوزه و شاخص توپوگرافی فرسایش از الگوی مشابه برخوردارند و بین شاخص توپوگرافی فرسایش و متغیرهای دبی رسوب حوزه هم‌بستگی مثبت وجود دارد.

جدول (۱۲): معادلات نهایی رگرسیونی برآورد رسوب معلق

رابطه	روش	معادله
۱	Stepwise	$Sed = -92.57 + 1.88 \times Perim$
۲	Forward	$Sed = -96.11 + 2.03 \times Perim$
۳	Backward	$Sed = 24087.33 - 0.22 \times Elevmin + 5.77 \times Elevmax + 0.12 \times Area - 1.00 \times Perim + 0.25 \times Riull + 2.63 \times Pavg - 99.41 \times Pmax + 1.10 \times Geoform$

Elevmin (ارتفاع حداقل)، Elevmax (ارتفاع حداکثر)، Area (مساحت)، Perim (محیط)، Riull (مجموع طول آبراهه‌ها)، Pavg (بارش متوسط)، Pmax (بارش بیشینه)، Geoform (سازندهای فرسایش‌پذیر).

نتیجه‌گیری

با مطالعه و مدل‌سازی رابطه بین ویژگی‌های فیزیوگرافی، ژئومورفولوژیکی، اقلیمی و لیتولوژی هر حوزه با میزان رسوبات معلق این امکان فراهم می‌شود که به‌توان تخمین درستی از میزان رسوبات رودخانه‌ها داشت. تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی میزان رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون چندگانه انجام شد. نتایج مقادیر ویژه تحلیل مؤلفه اصلی، چهار مؤلفه اول با ۸۶/۳۹ درصد بیش‌ترین مقدار رو به‌خود اختصاص دادند. نتایج پژوهش نشان داد که چهار عامل آبراهه اصلی، بارش بیشینه، حداکثر ارتفاع و مساحت مهم‌ترین عوامل در برآورد میزان رسوبات معلق بر اساس روش تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی بودند. هم‌چنین نتایج نشان داد که در مدل‌سازی رگرسیونی به سه روش (گام به گام)، (پیش‌رو) و روش (حذف پس‌رو)، عامل‌های محیط، حداکثر ارتفاع، حداقل ارتفاع، مساحت، مجموعه طول آبراهه‌ها، بارش متوسط، بارش بیشینه، سازندهای فرسایش‌پذیر به‌عنوان عامل‌های برتر وارد مدل‌سازی نهایی شدند. بنابراین با توجه به نتایج قابل قبول این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه کارایی مناسب و قابل قبولی در برآورد و مدل‌سازی میزان رسوبات معلق در حوزهای آبخیز مورد بررسی دارد. پیشنهاد می‌شود که برای برآورد میزان رسوبات معلق در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه علاوه بر عوامل طبیعی نیز از عوامل انسانی که در میزان تخریب اراضی و افزایش تولیدات رسوب تاثیرگذار هستند استفاده شود. هم‌چنین جهت رسیدن به ارتباط کامل‌تر عامل بارندگی با تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز از ویژگی‌های مهم و اصلی بارش چون زمان و شدت بارندگی در مدل‌سازی رگرسیونی بهره گرفته شود. در راستای نتایج پژوهش حاضر می‌توان نسبت به تعیین آبخیزهایی با تولید بالای رسوب اقدام نمود و بر اساس عوامل موثر بر تولید رسوب، نسبت به اجرای اقدامات مدیریتی و سازه‌ای اقدام نمود. علاوه براین، دقت در تعیین متغیرهای موثر بر تولید رسوب در مطالعات مرتبط و برآورد بهتر مقادیر رسوب معلق از دیگر نکات قابل توجه در تحقیق حاضر است.

منابع

اصغری سراسکانرود، ص. و ا. قلعه. ۱۳۹۸. بررسی ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و میزان تولید رسوب (مطالعه موردی: حوزه قرنقو در استان آذربایجان شرقی). نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره هشتم، شماره ۳، ص ۱۶۴-۱۴۶.

آذرم‌دل، ح.، مصطفی‌زاده، ر.، ا قاسمی. ۱۳۸۹. ارزیابی شبکه ایستگاه‌های سنجش کیفیت آب سطحی رودخانه گرگانرود استان گلستان، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جلد ۴، شماره ۱۰، ۶۱-۵۷.

آقابیگی، ن.، اسمعلی، ا.، مصطفی‌زاده، ر. م گلشن. ۱۳۹۸. اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با مدل هیدرولوژیکی IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل، مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۳۸، ص ۱۹۲-۱۸۱.

اسفندیاری درآباد، ف.، مصطفی‌زاده، ر.، پاسبان، ح.، ب نظافت تکله. (۱۴۰۱). تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین اردبیل. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۹، شماره ۹۶-۷۷.

پاک‌نژاد متکی، ح. و ع. فرجی‌راد. ۱۳۸۹. هیدروپلیتیک رودخانه مرزی ارس و تأثیر آن بر امنیت استان اردبیل. فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین، سال هفتم، شماره ۲۸، ص ۹۶-۷۹.

تلوری، ع. ۱۳۸۱. رابطه رسوب‌دهی معلق با برخی از ویژگی‌های آبخیز در سرشاخه‌های کرخه و دز در استان لرستان. فصل‌نامه پژوهش و سازندگی، دوره پانزده، شماره ۵۷-۵۶، ص ۶۱-۵۶.

ثقفیان، ب.، ب. قرمزچشمه، م. سمیعی و ر. عاشقی. ۱۳۸۸.عوامل مؤثر بر رسوب‌دهی معلق حوزه‌های آبخیز جنوب غربی ایران. مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره یک، شماره ۳، ص ۱۵۲-۱۴۰.

حلبیان، ا. و م. حیدری. ۱۳۹۵. برآورد رسوب با استفاده از منحنی سنجه رسوب و بررسی تغییرات دبی آن. جغرافیا. دوره چهاردهم، شماره ۵۱، ص ۱۹۳-۱۲۸.

خروشی، س.، ر. مصطفی‌زاده، ا. اسمعلی عوری و م. رئوف. ۱۳۹۶. ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی شاخص سلامت هیدرولیک رودخانه در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل. اکوهیدرولوژی، دوره چهار، شماره ۲، ص ۳۹۳-۳۷۹.

رمضانی پور، ا.، ا. مساعدی و م. مصداقی. ۱۳۹۶. تعیین مناسب‌ترین روش برای برآورد رسوب معلق بر اساس آماره‌های خطاسنجی (مطالعه موردی: تعدادی از زیرحوزه‌های کشف رود). مدیریت آبخیز، سال هشتم، شماره ۱۵، ص ۱۲۴-۱۱۲.

زارع چاهوکی، م. ۱۳۹۰. تجزیه و تحلیل داده‌ها در تحقیقات منابع طبیعی با استفاده از نرم‌افزار (SPSS). چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، ص ۳۰۹.

طاووسی، ت. و ق. دل‌آرا. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی آب و هوایی استان اردبیل. علمی فنی نیوار، شماره ۷۱-۷۰.

عسگری، ا.، حسینی، س.ز، ر مصطفی‌زاده. ۱۳۹۹. تعیین ارتباط و تغییرات مکانی مقادیر دبی و رسوب معلق در حوزه‌های استان اردبیل، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۸، شماره ۶۱، ص ۱۷۶-۱۴۹.

فغفوری، ز.، ن، آرمان، م، فرجی و ز، خورسندی. ۱۳۹۶. تعیین عوامل موثر بر رسوب‌دهی با استفاده از روش‌های آماری (مطالعه موردی: حوزه سیدآباد. مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره نهم، شماره ۲، ص ۲۰۴-۱۹۰.

مساعدی، ا.، هاشمی نجفی، س ف.، حیدرنژاد، م.، نبی‌زاده، م.، م.ا مشکاتی شهمیرزادی. ۱۳۸۸. برآورد حجم رسوب گذاری در مخازن سدهای کرج و دز و مقایسه آن با نتایج هیدروگرافی. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دوره ۱۶، شماره ۲، ص ۲۷۲-۲۶۱

مصطفی‌زاده، ر.، نبوی، س.، سلیمان‌پور، م، ر آسیابی هیر. ۱۳۹۸. ارزیابی تغییر زمانی و مکانی آب سطحی مازاد در برخی از آبخیزهای استان اردبیل، پژوهش‌های آبخیزداری، دوره ۳۲، شماره ۲، ص ۵۹-۴۳.

معتمدی، ر. و م آذری، محمود. ۱۳۹۶. ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک با رسوب آبخیز (مطالعه موردی: زیرحوضه‌های منتخب خراسان رضوی)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۴، جلد ۲۸، ص ۱۰۱-۸۲.

مهری، س.، ر. مصطفی‌زاده، ا. اسمعلی عوری و ا. قربانی. ۱۳۹۶. تغییرات زمانی و مکانی شاخص جریان پایه در رودخانه‌های استان اردبیل. فیزیک زمین و فضا، دوره چهل و سوم، شماره ۳، ص ۶۳۴-۶۲۳.

نصرتی، ک.، س، ایمنی و آ، طالاری. ۱۳۹۷. تحلیل منطقه‌ای بار رسوب معلق با استفاده از روش رگرسیون مولفه‌های اصلی در حوزه آبخیز سفیدرود. منابع طبیعی ایران، دوره هفتاد و یک، شماره ۳، ص ۸۲۷-۸۰۹.

نصیری خیاوی، ع.، فرجی، ع، ر مصطفی‌زاده. ۱۳۹۸. پاسخ دبی جریان به تغییرات بارندگی با استفاده از شاخص الاستیسیته اقلیمی در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۲۱، سال ۶، ص ۲۲-۱.

هنربخش، ا، ع، نیازی، س، سلطانی کوپایی و پ، طهماسبی. ۱۳۹۸. مدل‌سازی رابطه میزان رسوب و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوزه (مطالعه موردی حوزه سد دز). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۱، ص ۱۱۷- ۱۰۵.

یزدان خواه س .۱۳۸۷. اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۱۰ ص.

AlDahoul, N., Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A.N., Sherif, M., Sefelnasr, A., and Elshafie, A. 2021. Suspended sediment load prediction using long short-term memory neural network. Scientific Reports, 11, Article number: 7826.

Anderson. H.W. 1957. Relating sediment yield to watershed variables. Trans. American. Geophysical. Union. 38 (6): 921–924.

Ares. M.G. Varni, M., Chagas C. 2016. Suspended sediment concentration controlling factors. An analysis for the Argentine Pampas region. Hydrological Science Journal 61 (12): 2237-2248.

Cheng, NN. He. H. M. Yang. S.Y. Lu. Y. J. Jing. Z.W. 2017. Impacts of topography on sediment discharge in Loess Plateau. China. Quaternary International. 440(2): 119-129 .

Cohen. S. Kettner. A.J. Syvitski. J.P.M. Fekete. B.M.2013. WBMsed. a distributed global- scale riverin sediment flux model: Model description and validation. Computers Geosciences Journal. 53 (5): 80-93.

Horowitz. A. 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration. A matter of temporal resolution. Peachtree Business Center. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop. 3p.

Mohtadi, A., Hejazi, R., Hosseini, S.A. and Moemeni, M. 2018. Applying the "main component analysis" technique to the data of the variables affecting stock returns. Journal of Financial Accounting and Audit Research, 37 (2): 25- 52.

Salim. A. H. A. 2014. Geomorphological analysis of the morphometric characteristics that determine the volume of sediment yield of Wadi Al-Arja. South Jordan. Journal of Geographical Sciences. 24(3). 457-47.

Tananaev. N. I. 2017. Applying regression analysis to calculating suspended sediment runoff: Specific features of the metho. Journal of Water Resources. 6: 585- 592.

Uca., Toriman, E., Jaafar, Othman., Maru, Rosmini, Amal, Arfan. and Ansari, Saleh Ahmar. 2018. Daily Suspended Sediment Discharge Prediction Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network. Journal of Physics Conference Series, Ser. 95401203, 1- 20.

Wuttichaikitcharoen.P. Singh Babel.M.2014. Principal component and multiple regression analyses for the estimation of suspended sediment yield in ungauged basins of Northern Thailand. Water 2014, (6), 2412-2435.

Zhang. H.Y. Z.H. Shi. N.F. Fang and M.H. Gua. 2017. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield. Evidence from the Loess Plateau of China. Geomorphology. 234 (4): 19-27.

Modeling of Suspended Sediment Yield in Ardabil Province watersheds using PCA and Multiple Regression Analysis

Fariba Esfandiari Darabad [1] Raoof Mostafazadeh[2*] Behruoz Nezafat Takleh[3], Amir Hesam Pasban[4]

Abstract

Modelling the SSY in Ardabil Province watersheds using Principal Component Analysis (PCA) and Multiple Regression Analysis (MRA) was the aim of the present study. The available suspended sediment data of 29 watersheds were used to develop the SSY estimation models through validation by six watersheds. The 15 different physiographic, climatic, geomorphic, geological variables were used in the modeling after applying PCA. Finaly, the MRA models were evaluated based on the percentage of error, and Adj-R^2 as statistical measures. The results of PCA showed that the first four principal component explain about 86.39% of the total variance, which were selected as the main components for MRA input variables. The most influencial variables includes main river length, maximum precipitation, maximum elevation, and area. According to the results the Best Model with maximum height and maximum precipitation variables, Forward and Stepwise methods with perimeter variable, the Backward method with minimum elevation and maximum elevation, area, perimeter, total main stream length, maximum precipitation, mean precipitation, annual precipitation, and sensitive geological formations were selected. According to the Backward model, Minimum elevation (0.073), maximum elevation (0.001), area (0.002), perimeter (0.053), total river length (0.01), maximum precipitation (0.001), mean precipitation (0.008), and erosive geologic formations (0.082) were the final significant parameters in estimation of SSY. The drainage density and vegetation cover were excluded from the modelling process and the selected variables had a great impact on SSY over the study area, and the results can be generalized to the ungauged watersheds to SSY estimation.

Keywords: Regionalization, Sediment yield, Suspended sediment concentration, Modeling, Sediment rating curve

[1] - Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09120503281, esfandyari@uma.ac.ir
[2] - Associate Professor, Department of Natural Resources and member of Water Management Research Institute, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09144815743, raoofmostafazadeh@uma.ac.ir (Corresponding Author)
[3] - Ph.D Student in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09389497242, behrouznezafat75@gmail.com
[4] - Ph.D Student in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 09380967946, a.hesam773@gmail.com