

Drainage Density Modeling using Precipitation in Different Climates of Kurdistan Province

Kamran Chapi ^{1*}, Shamim Faizi ², Zaniar Fatehi ³

¹ Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

² M.Sc. in Watershed Management, Student Affairs Deputy, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³ M.Sc. in Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering and Management, Tose Danesh Institute of Higher Education, Sanandaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Drainage density is one of the most important geomorphologic indices of watersheds, which has often been used to express the degree of fluvial dissection, rainfall and infiltration capacity, flooding potential, landslide potential, topography evolution, and basin erosion. This index is greatly influenced by climate, vegetation, bedrock geology, time, and morphometric factors among which, the relationship between drainage density and climate is important, firstly in assessing the sensitivity of water resources and watershed hydrology to climate change; secondly, it determines how close to the truth the selection of this index is for climatic and hydrological studies; and thirdly, it reveals whether there is a significant difference in the amount of drainage density in different climates so that it is necessary to consider its variability in the study of flooding, landslide, and erosion potentials. The main objective of this study is to investigate the effects of climate (mean annual precipitation) on the watershed drainage density of Kurdistan Province, Iran through modeling this relationship, as well as drainage density variation with precipitation in different climates. This information can be utilized as a key tool for watershed planning specifically in mitigating environmental crises.

Materials and Methods

Kurdistan province is one of the provinces of western Iran, located between longitudes of 45° 31' and 48° 16' E and latitudes of 34° 44' and 36° 30' N. Its area is about 29137 Km². The mean annual precipitation is 485 mm and the mean annual temperature is 9 °C. This province is an important region since it is a huge source of fresh water for 5 large watersheds in Iran. The west of the province is covered by sparse oak forests, while the east is mainly agriculture and rangelands. The majority of the province belongs to the Sanandaj-Sirjan geological zone and in terms of geomorphology, the entire Kurdistan province is covered by high mountainous areas and hilly regions. Based on long-term precipitation and temperature data of 8 synoptic weather stations of Kurdistan province, the climate was classified into four types, including humid, semi-humid, Mediterranean, and semi-arid climates, according to the De Martonne climatic classifications method by Surfer software. A total of 40, 87, 62, and 57 small watersheds (each less than 50 km² in area) were selected from humid, semi-humid, Mediterranean, and semi-arid climates, respectively. The selected watersheds covered at least 10% - 15% of the total area of each climate zone. Each climate zone included between 40 to 100 watersheds for analysis, which were uniformly distributed across the region. To determine the mean annual precipitation of each watershed, the isohyetal map of the Kurdistan province was prepared using the above-mentioned 8 weather stations in the ArcGIS environment. Drainage densities (D_d) of the 246 watersheds were calculated using the $D_d = \Sigma L/A$ equation. SPSS and Excel were used to analyze the data and to model the relationship between drainage density and mean annual precipitation in different climates of Kurdistan province.

Results and Discussion

Results showed that climate has a significant effect (significance level of 0.0001) on drainage density, such that the mean of drainage density is significantly different in different climates of Kurdistan province. The maximum mean drainage density was 1.71 km/km² occurred in the Mediterranean climate, while this climate showed the minimum coefficient of variation for drainage density (19.9%) and maximum coefficient of variation for precipitation (21.9%). The minimum amount of drainage density was 1.12 km/km², which occurred in a humid climate, while this climate showed a high coefficient of variation for drainage density (but not maximum value) and the lowest coefficient of variation for precipitation (10.2%). The modeling of drainage density with mean annual precipitation revealed a nonlinear behavior of drainage density in different climates. The relationship of drainage density with mean annual precipitation in humid, semi-humid, Mediterranean, and semi-arid regions was

modeled as exponential, linear, and sigmoid functions, respectively. We also came upon this result that the maximum drainage density occurred in mean annual precipitation of 400 mm, and precipitation less than or greater than 400 mm, drainage density decreases. In precipitations less than 400 mm, drainage density increases with an increase in precipitation, and in precipitations more than 400 mm, when precipitation increases, drainage density decreases. The 400 mm precipitation, therefore, is introduced as an Index Precipitation for studying morphometric factors, specifically drainage density, in Kurdistan watersheds and similar regions in future works. The findings of this study are in line with findings of Carlston (1963), Gregory and Gardiner (1975), Gregory (1976), Daniel (1981), Abrahams (1972), Abrahams and Ponczynski (1984), and Moglen et al. (1998) who had previously introduced 1250, 500, 500, 3000, 2000, 280, and 450 mm as Index Precipitation for studying drainage density in different climates at other parts of the world.

Conclusions

The drainage density of 246 small watersheds of Kurdistan Province was investigated, and its relationship with mean annual precipitation was also modeled. The role of climate in the process of changes in drainage density was determined. The findings of this research showed that the climate has a significant effect on the drainage density of watersheds; therefore, in each climate, the relationship between the drainage density and the amount of precipitation has unique behavior and is different. In Mediterranean and semi-arid climates, changes in drainage density are under the control of precipitation, and in semi-humid and humid climates, changes in drainage density are under the control of vegetation cover, which should be investigated in future studies. A close relationship between drainage density and precipitation proved that this index can be used in the studies of climate change impacts on water resources and other natural hazards; however, it is necessary to consider its variability. Such studies can provide important information for official authorities to prepare better watershed management plans.

Keywords: Mean annual precipitation, Watershed, Climatic classification, Kurdistan, Drainage density modeling

Article Type: Research Article

Financial support

This research was carried out with the financial support of the University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. The article's executive and publishing fees were provided through the research grant number: S/2/9/39229 by the corresponding author.

Acknowledgments

This article is derived from a research project confirmed by the University of Kurdistan, Sanandaj, Iran which is hereby acknowledged.

Conflict of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon reasonable request from the corresponding author.

Authors' contribution

Kamran Chapi: Principal investigator of the research project, conceptualization of the research topic and research method, monitoring the research implementation process, preparing the first draft of the article, modifying and finalizing the article; **Shamim Faizi:** Data analysis and elicitation of results; **Zaniar Fatehi:** Preparation of maps, supervision of data analysis.

*Corresponding Author, E-mail: k.chapi@uok.ac.ir

Citation: Chapi, K., Faizi, S., & Fatehi, Z. (2025). Drainage Density Modeling using Precipitation in Different Climates of Kurdistan Province. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2), 160-181.
doi: 10.22098/mmws.2025.16773.1559

Received: 10 February 2025, Received in revised form: 07 March 2025, Accepted: 25 May 2025, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 160-181

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مدل سازی تراکم زهکشی به وسیله بارش در اقلیم های مختلف استان کردستان

کامران چپی^{۱*}، شمیم فیضی^۲، زانیار فاتحی^۳

^۱ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۲ کارشناس ارشد آبخیزداری، معاونت دانشجویی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۳ کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، مؤسسه آموزش عالی توسعه دانش، سنندج، ایران

چکیده

تراکم زهکشی یکی از مهم ترین شاخص های ژئومورفولوژیک برای بیان وضعیت آبراهه ها، پتانسیل سیل خیزی، پتانسیل زمین لغزش، تکامل توپوگرافی و فرسایش حوزه های آبخیز است. این شاخص به وسیله عوامل مختلفی مانند اقلیم، پوشش گیاهی، زمین شناسی، زمان و مورفومتری حوضه تحت تأثیر قرار می گیرد. در این میان، رابطه تراکم زهکشی و اقلیم اولاً در تعیین حساسیت منابع آب به تغییر اقلیم از اهمیت ویژه ای برخوردار است، دوماً مشخص می کند که انتخاب این شاخص برای بررسی های اقلیمی و هیدرولوژیکی چقدر به واقعیت نزدیک است و سوماً تعیین می کند که آیا در اقلیم های مختلف، مقدار تراکم زهکشی تفاوت معنی دار دارد که لازم باشد این تغییرات در بررسی پتانسیل سیل خیزی، زمین لغزش و فرسایش خاک در نظر گرفته شود. به منظور مدل سازی تراکم زهکشی در اقلیم مختلف، استان کردستان بر اساس اقلیم نمای دومارتن، به چهار تیپ اقلیمی مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه ای و نیمه خشک تقسیم شده که از آن ها به ترتیب ۴۰، ۸۷، ۶۲ و ۵۷ حوزه آبخیز انتخاب شدند. تراکم زهکشی حوضه ها از رابطه هورتون و بارش متوسط سالانه به عنوان مهم ترین شاخص اقلیمی، از نقشه هم بارش استان کردستان تعیین شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل های آماری نشان داد که نوع اقلیم اثر معنی داری بر روی میزان تراکم زهکشی دارد. بیش ترین میانگین تراکم زهکشی با مقدار ۱/۷۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع در اقلیم مدیترانه ای و کم ترین آن با مقدار ۱/۱۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع در اقلیم مرطوب بوده است. همچنین، حداکثر تراکم زهکشی در بارش متوسط سالانه ۴۰۰ میلی متر اتفاق می افتد و در بارش های کم تر و بیش تر، تراکم زهکشی کاهش می یابد. مدل سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه در اقلیم های مختلف مشخص کرد که تراکم زهکشی در هر اقلیم رفتار متفاوتی دارد، به طوری که نوع مدل در اقلیم مرطوب، نمایی، در اقلیم نیمه مرطوب، خطی و در اقلیم های مدیترانه ای و نیمه خشک، سیگموئید (S-shaped curve) است. یافته های این تحقیق مؤید این حقیقت است که استفاده از شاخص تراکم زهکشی در مطالعات سیل خیزی، زمین لغزش و فرسایش حوزه های آبخیز انتخاب درستی است و توجه به تغییرات آن در اقلیم های مختلف، صحت مطالعات را افزایش می دهد. یافته ها همچنین آشکار می کنند که تعیین تراکم زهکشی با صحت بالا بر اساس بارش امکان پذیر است که البته رعایت احتیاط ضروری است.

واژه های کلیدی: بارش متوسط سالانه، حوزه آبخیز، طبقه بندی اقلیمی، کردستان، مدل سازی تراکم زهکشی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: k.chapi@uok.ac.ir

استناد: چپی، کامران، فیضی، شمیم، و فاتحی، زانیار (۱۴۰۴). مدل سازی تراکم زهکشی به وسیله بارش در اقلیم های مختلف استان کردستان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۱۶۰-۱۸۱.

doi: 10.22098/mmws.2025.16773.1559

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۶۰ تا ۱۸۱.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



۱- مقدمه

حوزه‌های آبخیز^۱ به‌عنوان تنها سیستم‌های مؤثر در برنامه‌ریزی توسعه کشاورزی و منابع طبیعی محسوب می‌شوند (Brooks and Eckman, 2000) که در حقیقت واحدهای طبیعی برنامه‌ریزی منطقی برای توسعه پایدار محیط زیست از دیدگاه اقتصادی- اجتماعی است (Thurow and Juo, 1995). برنامه‌ریزی حوزه آبخیز برای رسیدن به توسعه پایدار زیست‌محیطی بستگی زیادی به شناخت کامل منابع حوزه، ویژگی‌های هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، کلیماتولوژیکی و فیزیکی حوضه و کشف روابط و تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین عناصر مختلف آن دارد (Sukristiyanti et al., 2018; Sarkar et al., 2022; TorreFranca and Otadoy, 2024).

یکی از ویژگی‌های مهم حوزه‌های آبخیز که نقش کنترل‌کننده‌ای در تنظیم روابط هیدرولوژیک، ژئومورفولوژیک، کلیماتولوژیک و مدیریت مخاطرات طبیعی دارد، شبکه‌های زهکشی حوضه‌ها و ویژگی‌های مورفومتریکی آن‌ها است (Sajadi, 2018; Sajadi et al., 2021; Sajadi et al., 2022). ویژگی‌های مورفومتریکی شبکه‌های زهکشی سطحی یک حوزه آبخیز چارچوب مهمی برای درک جریان انرژی و چرخه‌های مواد غذایی هستند (Thurow and Juo, 1995). شبکه‌های زهکشی نه تنها برای هیدرولوژیست‌ها بلکه برای زمین‌شناسان، ژئومورفولوژیست‌ها، مهندسين کشاورزی و دیگر متخصصین محیط زیست از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. این شبکه‌ها، تلفیقی از پاره‌ای خصوصیات چشم‌اندازها مانند اقلیم، توپوگرافی، خاک و سنگ، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی هستند (Doornkamp and King, 1971; Rai et al., 2017; Lin et al., 2021; Pande et al., 2021).

تراکم زهکشی^۲ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های زهکشی، منعکس‌کننده شرایط اقلیمی غالب، بافت خاک، کاربری اراضی، تکتونیک و همچنین اثرات متقابل تمامی این فاکتورهاست که انعکاس آن‌ها در ناهمواری‌ها مشاهده می‌شود. این پارامتر ژئومورفیک در حقیقت نقش قلب را در حوزه‌های آبخیز بازی می‌کند و تنظیم‌کننده روابط بین اقلیم، ژئومورفولوژی و هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی است (Moglen et al., 1998; Fenta et al., 2017; Ahmed et al., 2021; Jothimani et al., 2022).

تراکم زهکشی که از تقسیم مجموع طول آبراهه‌های یک حوزه آبخیز بر مساحت آن به‌دست می‌آید، اغلب به‌عنوان شاخصی برای بیان وضعیت آبراهه‌های یک حوزه آبخیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Horton, 1932; Horton, 1945). Zinke (1960).

Dingman (1978) اظهار کرده‌اند که تراکم زهکشی، پارامتر مناسبی برای تشریح بارندگی و ظرفیت نفوذپذیری خاک بوده و می‌تواند به‌عنوان یک ویژگی کمی فیزیکی در حوزه‌های آبخیز مورد توجه قرار گیرد. Gregory and Walling (1968) توضیح داده‌اند که تراکم زهکشی بیان دینامیک نهاده‌های مختلف ورودی به داخل یک سیستم زهکشی است، مخصوصاً نهاده‌هایی که انعکاسی از خصوصیات حوزه‌های زهکشی هستند و به‌واسطه تراکم زهکشی است که این خصوصیات بر روی ستاده‌های آب و رسوب اثر می‌گذارند. ارتباط نزدیک بین تراکم زهکشی و فرایندهای فرسایشی ایجاد شده به‌وسیله اقلیم می‌تواند شاخص مهمی برای تفسیر تاریخچه و فرایندهای تکاملی چشم‌اندازها باشد (Tucker and Bras, 1998; Clubb et al., 2016). علاوه بر این رابطه تراکم زهکشی و بالآمدگی تکتونیک یک منطقه به این معنی است که تراکم زهکشی هم‌چنین می‌تواند تاریخچه ژئومورفیک و تکتونیک یک منطقه را تفسیر نماید (Tucker et al., 2001; Singh, 2018; Derikvand, 2024). Sajadi et al. (2020) از عوامل موفق‌تری و مهم‌تر از همه تراکم زهکشی در نحوه تکامل سیستم آبراهه‌های یک حوزه آبخیز استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که تکامل حوزه‌های آبخیز منطقه قروه و دهگلان در استان کردستان بخشی تابع اقلیم و بخشی تابع تکتونیک حوزه است. تراکم زهکشی، گستردگی و پراکنش رودخانه‌های یک حوزه آبخیز را توصیف می‌کند که خود رودخانه به‌عنوان عامل تکامل یک توپوگرافی عمل می‌نماید و این ویژگی مهم چشم‌اندازها یعنی تکامل توپوگرافی به‌وسیله تراکم زهکشی به‌صورت کمی درمی‌آید (Moglen et al., 1998; Krishnan and Ramasamy, 2024).

تراکم زهکشی هم به‌صورت مستقیم و هم به‌صورت غیرمستقیم بر روی ویژگی‌های سیلاب در حوزه‌های آبخیز کنترل دارد. از اثرات مستقیم می‌توان گفت که تراکم زهکشی زیاد باعث افزایش دبی سیلابی از طریق تأثیر بر زمان تمرکز حوزه آبخیز می‌شود (Merz and Blöschl, 2008; Dang and Nguyen, 2018). اثر غیرمستقیم تراکم زهکشی بر روی سیلاب بدین صورت است که چون این عامل یک شاخص زمین‌شناسی محسوب می‌شود، مقدار کم آن دلیل بر وجود سنگ‌های غیرقابل نفوذ بر روی دامنه‌ها است که افزایش دبی سیلابی را به دنبال دارد (Pallard et al., 2009; Bogale, 2021; Odoh and Nwokeabia, 2024). عوامل مورفومتریکی از جمله تراکم زهکشی در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های یک حوزه آبخیز اصلی در مبارزه با فرسایش هم مورد استفاده عملی و کاربردی قرار گرفته

². Drainage density

¹. Watersheds

عبور می کند، بارش بیش تر موجب افزایش پوشش گیاهی بیش تر نمی شود و در این حالت، بارش و تراکم زهکشی رابطه مستقیم و مثبتی با هم خواهند داشت (Bandara, 1974). Abrahams (1972) در پژوهشی برای استرالیا ثابت کرد که مقدار تراکم زهکشی در مناطق با بارش های ۲۸۰ میلی متر حداکثر و در مناطق با بارش های ۱۰۰۰ میلی متر حداقل است و با افزایش بارش از ۱۰۰۰ میلی متر و کاهش از ۲۸۰ میلی متر، مقدار تراکم زهکشی کم می شود. تراکم زهکشی معمولاً در مناطق خشک با پوشش گیاهی کم، بیش تر است و با افزایش احتمال بارش های سنگین، زیادت ر می شود (Gregory, 1976) و همچنین در مناطقی که دارای عکس العمل های هیدرولوژیکی سریع هم هستند، زیاد است (Melton, 1957). Gregory and Gradiner (1975) و Gregory (1976) که در مطالعات خود از بارش متوسط سالانه به عنوان شاخص اقلیم استفاده کردند، تغییرپذیری زیادی را در تراکم زهکشی در رژیم های اقلیمی خشک مشاهده نمودند و نتیجه گرفتند که هر چه اقلیم مرطوب تر باشد، میزان این تغییرپذیری کم تر خواهد شد. آن ها سه نوع رفتار متفاوت را برای تغییرپذیری تراکم زهکشی پیشنهاد نمودند بدین صورت که در بارش های متوسط سالانه کم تر از ۵۰۰ میلی متر، تراکم زهکشی با افزایش بارش، زیاد می شود؛ در بارش های ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی متر با افزایش بارش، تراکم زهکشی کم می شود و در بارش های بیش تر از ۱۰۰۰ میلی متر، تراکم زهکشی با بارش رابطه مثبت ضعیفی برقرار می کند. رابطه تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه یک رابطه معکوس است و این رابطه فقط در مناطق بیابانی مستقیم است (Rinaldo et al., 1984). Abrahams and Ponczynski (1995) اظهار کرده اند که حداکثر تراکم زهکشی در دوره های مرطوب اتفاق می افتد که تنش برشی فرسایش پایین است و برعکس در دوره های خشک که تنش برشی فرسایش زیاد است، تراکم زهکشی حداقل است. Moglen et al. (1998) نتیجه گرفتند که در شرایط بیابانی و نیمه بیابانی با بارش سالانه مؤثر کم تر از ۲۵۰ میلی متر، تراکم زهکشی با افزایش بارش زیاد می شود ولی در شرایط اقلیمی مرطوب با بارش سالانه مؤثر بیش تر از ۲۵۰ میلی متر، مقدار تراکم زهکشی با افزایش بارش کم می شود.

شناخت رابطه تراکم زهکشی و اقلیم اولاً در تعیین حساسیت منابع آب به تغییر اقلیم از اهمیت ویژه ای برخوردار است، دوماً مشخص می کند که انتخاب این شاخص برای بررسی های اقلیمی و هیدرولوژیکی چقدر به واقعیت نزدیک است و سوماً تعیین می کند که آیا در اقلیم های مختلف، مقدار تراکم زهکشی تفاوت معنی دار دارد که لازم باشد این تغییرات در بررسی پتانسیل سیل خیزی، زمین لغزش و فرسایش خاک در نظر گرفته شوند. تعیین رابطه بین تراکم زهکشی و بارش یک منطقه از دیدگاه هیدرولوژی،

است (Gajbhiye et al., 2014). اخیراً عامل تراکم زهکشی در اکثر مطالعات بررسی مخاطرات طبیعی حوزه های آبخیز از جمله سیل خیزی (Azadtalab et al., 2020; Ahmadi et al., 2023)، زمین لغزش (Mandal et al., 2021; Mao et al., 2024)، فرسایش خاک (Nguyen and Chen, 2021; Avand et al., 2023)، افت آب های زیرزمینی (Jaafarzadeh et al., 2021)، و فرونشست زمین (Kumar et al., 2023) به عنوان یک عامل تأثیرگذار مهم در مدل سازی مکانی مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل محکمی برای اهمیت آن است.

همان گونه که در بالا اشاره شد، تراکم زهکشی یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار در مطالعات متعدد و متنوع مربوط به مدیریت حوزه های آبخیز است. برای شناخت بهتر این عامل، لازم و ضروری است که تأثیرپذیری آن را از عوامل مختلف هم بررسی نمود. محققین متعددی عوامل کنترل کننده تراکم زهکشی را بررسی نموده و نشان داده اند که تراکم زهکشی با فاکتورهای اقلیم (Chorley, 1957; Chorley and Morgan, 1962; Gregory and Gardiner, 1975; Chadwick et al., 2003; Smith et al., 2013; Bujak-Ozga et al., 2023)، پوشش گیاهی (Melton, 1958; Collins and Bras, 2010; Sangireddy et al., 2016; Tassew et al., 2023)، زمین شناسی سنگ بستر (Tanaka, 1957; Smith, 1958; Wilson, 1971; Kelson and Wells, 1989; Talling and Sowter, 1999; Lodes et al., 2024)، زمان (Tokunaga, 1978)، و فاکتورهای مورفومتریکی (Strahler, 1952; Montgomery and Dietrich, 1988; Montgomery and Dietrich, 1989; Oguchi, 1997; Waikar and Nilawar, 2014; Adhikari, 2020) رابطه داشته و از آن ها تأثیر می پذیرد.

در بین عوامل تأثیرگذار بر روی تراکم زهکشی، عامل اقلیم بیش تر از سایر عوامل مورد بررسی قرار گرفته و در بین عوامل اقلیمی، بارش متوسط سالانه، تأثیر زیادی بر تراکم زهکشی دارد. Tucker and Slingerland (1997) بیان کرده اند که تغییرات بارش بر روی تراکم زهکشی حوزه های آبخیز تأثیر دارد اما این رابطه یک رابطه ساده و مستقیم نیست (Horton, 1945)؛ یعنی تراکم زهکشی فقط تابع ساده ای از بارندگی نیست بلکه بیان کننده روابط متقابل بین اقلیم، زمین شناسی و پوشش گیاهی است (Strahler, 1964). Melton (1957) با مطالعه بر روی ۸۰ حوزه آبخیز با اقلیم های مختلف در جنوب غربی آمریکا، رابطه معکوسی بین شاخص بارش مؤثر تورنتوایت (P-E Index) و تراکم زهکشی پیدا کرد. در مناطق پر بارش، پوشش گیاهی کنترل زیادی بر روی تراکم زهکشی دارد، به طوری که وقتی مقدار بارش از یک آستانه خاصی (در مورد سریلانکا مقدار ۱۲۷۰ تا ۱۵۲۰ میلی متر در سال)

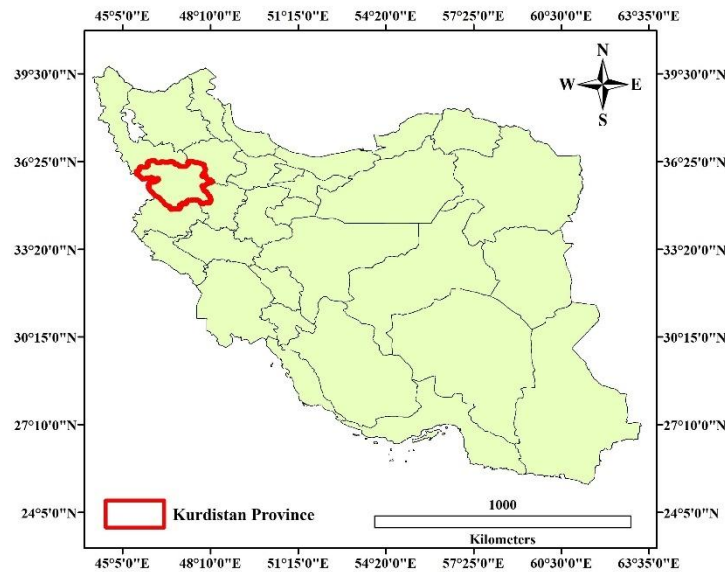
سمت غرب کشور وارد این منطقه می‌شوند (Kurdistan Meteorological Bureau, 2024). بیشتر گستره استان از دیدگاه زمین‌شناسی در دو زون ایران مرکزی و سنج-سیرجان قرار دارد و تنها بخش کوچکی از آن در جنوب در زون رانده شده زاگرس واقع شده است (Kurdistan Management and Planning Organization, 2018). ویژگی‌های متفاوت زمین‌شناسی در زون‌های مذکور سبب پدیدار شدن خصوصیات ژئومورفولوژیکی نسبتاً متفاوت در هر زون شده است. از لحاظ ژئومورفولوژی، استان کردستان به دو بخش کوهستانی غربی و دشتی نسبتاً مسطح شرقی تقسیم‌بندی می‌شود. از سنج، مرکز استان، به طرف شمال و غرب یعنی شهرستان‌های سقز، بانه، سروآباد، مریوان و کامیاران جزو بخش کوهستانی غربی هستند که یکنواختی و سستی جنس زمین، باعث بوجود آمدن کوه‌های گنبدی شکل با شیب یکنواخت و ملایم همراه با دره‌های باز شده است. بخش شرقی شامل دشت‌های قروه و دهگلان و بخشی از دیواندره است که تحت تأثیر پدیده‌های فرسایشی و انحلال بوده و پدیده‌های ژئومورفولوژیکی خاصی ایجاد نموده است. اشکال ایجادکننده برجستگی‌ها در این بخش‌ها، تپه‌های کم‌ارتفاع، متشکل از مارن‌های رنگارنگ (قرمز و خاکستری) بوده که بخش‌هایی از واحدهای متشکل از آهک‌های الیگومیوسن، با ایجاد پوشش بر روی این مارن‌ها در زیر، سبب تشکیل محدوده‌های کوچک با مقاومت بالاتر شده و یا خود سبب ایجاد این برجستگی‌ها شده‌اند (Kurdistan Management and Planning Organization, 2018). خاک‌های مناطق مختلف استان کردستان به غیر از مناطق غرب استان (نظیر شهرستان‌های مریوان و بانه) عمدتاً آهکی بوده و دارای مقادیر زیادی کربنات کلسیم تجمع یافته است که به فرم رشته‌های پراکنده در خاک، دانه‌های کوچک و بزرگ سخت و یا حتی به صورت لایه‌های نسبتاً ضخیم و سخت در افق‌های تحتانی خاک گسترش دارد. بافت خاک‌های استان عمدتاً از سنگین تا نسبتاً سنگین متغیر بوده و در سه گروه اصلی خاک‌های رسی، رسی لومی و لوم قرار دارد (Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, 2024a). پوشش گیاهی استان در مناطق غربی عمدتاً جنگل‌های بلوط ایرانی است که با حرکت به سمت مرکز استان به مراتع و کشاورزی متمرکز تبدیل می‌شود و در شرق استان به کشاورزی دیم با راندامان کم و مراتع تخریب شده تبدیل می‌شود (Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, 2024b).

ژئومورفولوژی و حتی زمین‌شناسی بسیار مهم است چون چنین روابطی نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های محلی، منطقه‌ای و ملی بازی می‌کنند و در توجیه وقوع بعضی مخاطرات طبیعی مانند سیلاب و زمین‌لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی رابطه بین تراکم زهکشی و اقلیم و تأثیر بارش بر تغییرات آن و مدل‌سازی این رابطه تا به حال در مقیاس ملی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است و در مقیاس استانی، در استان کردستان انجام نشده است. به همین دلیل، هدف مطالعه حاضر، بررسی رابطه بین تراکم زهکشی به‌عنوان یک شاخص مورفومتریک مهم حوزه‌های آبخیز و بارش متوسط سالانه به‌عنوان یک شاخص اقلیمی مهم به‌منظور نشان دادن نقش اقلیم بر رفتار تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف استان کردستان از طریق مدل‌سازی این رابطه است. با انجام این پژوهش، انتظار می‌رود رفتارهای متفاوت تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف به خوبی شناخته شود تا از آن بتوان در برنامه‌ریزی آبخیز استفاده نمود و همچنین با در نظر گرفتن تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف و پیش‌بینی رفتار آن، نقشه‌های دقیق‌تری از سیل‌خیزی، فرسایش‌پذیری و حرکت‌های توده‌ای ارائه کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، کل گستره استان کردستان بوده که بین عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}44'$ تا $36^{\circ}30'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $45^{\circ}31'$ تا $48^{\circ}16'$ شرقی در محدوده سلسله جبال زاگرس در غرب ایران قرار گرفته است (Environmental Protection Department of Kurdistan Province, 2024 (شکل ۱). مساحت استان ۲۹۱۳۷ کیلومتر مربع است که بلندترین نقطه ارتفاعی آن، کوه‌های چلچمه با ارتفاع ۳۴۷۳ متر از سطح دریای آزاد و پایین‌ترین نقطه ارتفاعی آن دریاچه زریبار مریوان با ارتفاع کم‌تر از ۱۰۰۰ متر است (Tabatabaei and Ghasriani, 1992). قرار داشتن استان در معرض جریان‌های آب و هوایی غربی مدیترانه‌ای و شرایط ویژه توپوگرافی (تغییرات شدید ارتفاع) موجب تنوع اقلیمی زیادی در استان کردستان شده است. میانگین سالانه دما در ارتفاعات منطقه حدود ۸ درجه سانتی‌گراد و در محدوده‌های پست جنوب و جنوب غربی استان حدود ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداکثر بارندگی سالانه در ارتفاعات غرب و شمال غربی منطقه به میزان تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و حداقل آن در نواحی شمال شرقی به ۲۱۰ میلی‌متر می‌رسد. عمده بارش‌های استان کردستان با متوسط ۴۸۵ میلی‌متر متأثر از جریان‌های مدیترانه‌ای است که از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کردستان بر روی نقشه ایران

Figure 1- Geographical poition of Kurdistan province on the map of Iran

۲-۲- جمع آوری داده‌ها و اطلاعات

داده‌های اقلیمی در این مطالعه شامل بارش (برحسب میلی‌متر) و دمای هوا (بر حسب درجه سانتی‌گراد) هستند که از ۸ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اداره کل هواشناسی استان کردستان (<http://www.kurdistanmet.ir>) برای دوره زمانی تأسیس ایستگاه تا پایان سال ۱۳۹۸ هجری شمسی (سال ۲۰۱۹ میلادی) اخذ شد (جدول ۱). برای رسم نقشه حوزه‌های آبخیز استان

کردستان، از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (<https://www.ncc.gov.ir>) استفاده شد. تراکم زهکشی (D_d) از رابطه هورتون به صورت زیر محاسبه شد:

$$D_d = \frac{\sum L}{A} \quad (۱)$$

که در آن، $\sum L$ ، مجموع طول آبراهه‌های حوزه آبخیز بر حسب کیلومتر و A ، مساحت حوزه آبخیز بر حسب کیلومتر مربع است.

جدول ۱- مشخصات هشت ایستگاه سینوپتیک استان کردستان (اداره کل هواشناسی استان کردستان، ۱۴۰۳)

Table 1- Characteristics of eight synoptic weather station of Kurdistan province (Kurdistan Meteorological Bureau, 2025)

Climate Type	Mean Annual Precipitation (mm)	Mean Annual Temperature (°C)	Starting Year	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Station
Mediterranean	433.5	14.3	1338	1373	35.25	47.01	Sanandaj
Humid	910.0	13.6	1370	1287	35.49	46.15	Marivan
Semi-arid	302.1	11.8	1366	1883	35.88	47.62	Bijar
Semi-humid	410.4	12.1	1340	1523	36.22	46.31	Saqqez
Semi-arid	296.9	12.5	1368	1906	35.17	47.78	Qorveh
Mediterranean	240.4	8.6	1368	2142	36.06	46.91	Zarrineh
Humid	229.1	14.3	1378	1600	36.01	45.89	Baneh
Mediterranean	506.5	16.2	1385	1404	34.79	46.89	Kamyaran

۲-۳- طبقه‌بندی اقلیمی استان کردستان

به منظور تعیین تیپ‌های اقلیمی استان کردستان، از روش دومارتن (De Martonne, 1926) استفاده شد. ضریب خشکی (I_{DM}) اقلیم‌نمای دومارتن بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$I_{DM} = \frac{PCP}{T + 10} \quad (۲)$$

که در آن، PCP ، بارش متوسط سالانه به میلی‌متر و T ، میانگین دمای سالانه هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد است. بر اساس ضریب خشکی دومارتن، تیپ اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی استان کردستان، بر مبنای جدول شماره ۲ تعیین شد.

جدول ۲- تعیین تیپ اقلیمی یک منطقه بر اساس ضریب

خشکی دومارتن (De Martonne, 1926)

Table 2- Determination of climate type of a region based on De Martonne aridity index (De Martonne, 1926)

Climate Type	De Martonne Aridity Index
Arid	$I_{DM} < 10$
Semi-arid	$10 < I_{DM} < 19.9$
Mediterranean	$20 < I_{DM} < 23.9$
Semi-humid	$24 < I_{DM} < 27.9$
Humid	$28 < I_{DM} < 34.9$
Very humid	$35 < I_{DM}$

۲-۴- آماده سازی و تجزیه و تحلیل آماری داده ها

نرمال بودن داده های اقلیمی و تراکم زهکشی با استفاده از روش کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948) و با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Excel کنترل شد. نقشه های اقلیمی با استفاده از نرم افزارهای GIS و Surfer ترسیم شدند. نرم افزار Surfer یکی از نرم افزارهای مهندسی عمران برای کارهای نقشه برداری و تحلیل ناهمواری های توپوگرافیک است (Ali, 2024). از روش کریجینگ^۱ برای تهیه نقشه هم بارش^۲ استان کردستان استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر نوع تیپ اقلیمی بر روی تراکم زهکشی، چهار تیپ اقلیمی مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه ای و نیمه خشک به عنوان تیمار در قالب یک طرح کاملاً تصادفی نامتعادل مورد مطالعه قرار گرفتند. مقایسه آماری میانگین های تراکم زهکشی در تیپ های اقلیمی مختلف، با روش توکی (Tukey, 1949) بررسی شد، چون احتمال اشتباه نوع اول در این آزمون بسیار کم تر از سایر آزمون ها است و همچنین آزمون سخت گیری است، به طوری که اگر نتیجه این آزمون، وجود تفاوت معنی دار را بین میانگین های دو گروه اثبات کند، سایر آزمون ها هم قطعاً این نتیجه را تأیید می نمایند. در این روش، از آماره زیر بهره گرفته می شود:

$$q_s = \frac{|Y_A - Y_B|}{SE} \quad (3)$$

که در آن، Y_A و Y_B میانگین دو جمعیت آماری (در این مطالعه، تراکم زهکشی حوزه های آبخیز در اقلیم های مختلف) و SE خطای استاندارد مجموع میانگین ها است. این آزمون آماری در سطح خطای ۵ درصد انجام شد.

۲-۵- شاخص های ارزیابی و انتخاب مدل

در مطالعه حاضر، به منظور انتخاب بهترین مدل بیانگر رابطه بین تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه در اقلیم های مختلف استان کردستان، شاخص های زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

۲-۵-۱- معیار اطلاعات آکائیکه^۳

این شاخص برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط آکائیکه (Akaike, 1974) معرفی شد که رابطه آن به صورت زیر است:

$$AIC = 2k - 2Ln\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (4)$$

که در آن، k ، تعداد پارامترهای مدل بوده و از جمع تعداد متغیرهای مستقل به اضافه یک به دست می آید؛ RSS ، مجموع مربعات باقیمانده و n ، تعداد مشاهدات است. هر چقدر مقدار این معیار بیش تر باشد، دلیل بر عملکرد بهتر مدل دارد.

۲-۵-۲- ضریب همبستگی پیرسون^۴

این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

که در آن x_i و y_i داده های مشاهداتی به ترتیب متغیر مستقل و متغیر وابسته و $\bar{x}$ و $\bar{y}$ ، میانگین داده های مشاهداتی به ترتیب متغیر مستقل و وابسته هستند. این ضریب بین ۱- و ۱+ متغیر است و هر چه مقدار آن به قدر مطلق ۱ نزدیک تر باشد، عملکرد مدل بهتر بوده است.

۲-۵-۳- ضریب تبیین^۵

ضریب تبیین نشان می دهد که چند درصد تغییرات متغیرهای وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل تبیین می شود. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (6)$$

در این رابطه، RSS ، مجموع مربعات باقیمانده و TSS ، مجموع مربعات است. مقدار آن بین صفر و ۱ متغیر است و هر چه به ۱ نزدیک تر باشد، مدل بهتر عمل کرده است.

۲-۵-۴- ضریب تبیین تعدیل شده^۶

تفاوت مهم ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده این است که ضریب تبیین فرض می کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می کند. بنابراین درصد نشان داده شده توسط ضریب تبیین با فرض تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است، در صورتی که درصد نشان داده شده توسط ضریب تبیین تعدیل شده فقط حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر متغیر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تبیین حتی با وجود مقدار بالا قابل تشخیص نیست، در صورتی که می توان به مقدار برآورد شده ضریب تبیین تعدیل شده اعتماد کرد. ضریب تبیین تعدیل شده از رابطه زیر به دست می آید:

$$Adj. R^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1} \quad (7)$$

که در آن، p ، تعداد متغیرهای مستقل در مدل است. هرچه تفاوت بین R^2 و $Adj. R^2$ کم تر باشد نشان می دهد که متغیرهای مستقل که به مدل اضافه شده اند به درستی انتخاب شده اند.

4. Pearson's Correlation Coefficient (r)

5. Coefficient of determination (R^2)

6. Adjusted Coefficient of Determination ($Adj. R^2$)

1. Kriging

2. Iso-hyetal

3. Akaike Information Criterion (AIC)

۲۰۱۴; Di Lazzaro et al., 2001). بنابراین در این مطالعه، حوزه‌های آبخیز کوچک تا مساحت ۵۰ کیلومتر مربع مورد بررسی قرار گرفتند. سپس در هر تیپ اقلیمی، مبادرت به مشخص نمودن تعداد کافی حوزه آبخیز شد به طوری که در اقلیم‌های مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه خشک به ترتیب ۴۰، ۸۷، ۶۲ و ۵۷ حوزه آبخیز (مجموعاً ۲۴۶ حوزه آبخیز کوچک) در روی نقشه‌های توپوگرافی رقومی استان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ انتخاب شد (شکل ۲). نحوه انتخاب حوزه‌های آبخیز طوری بود که اولاً حداقل ۱۰ تا ۱۵ درصد مساحت آن تیپ اقلیمی را پوشش دهد (Sheng, 1990)، دوماً تعداد حوزه‌های آبخیز در هر تیپ اقلیمی بین ۴۰ تا ۱۰۰ حوزه باشد (Al-neama et al., 2022) و سوماً از تمام سطح آن تیپ اقلیمی به صورت تقریباً منظم و یکنواخت، نمونه جمع‌آوری شود (García and Camarasa, 1999). در مرحله بعد با استفاده از داده‌های بارش درازمدت ۸ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان کردستان و به کمک نرم‌افزار ArcGIS و روش کریجینگ، منحنی‌های هم‌بارش استان کردستان با گام بارشی ۵۰ میلی‌متری رسم شد (شکل ۳). از انطباق نقشه موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبخیز با نقشه هم‌بارش استان، بارش متوسط سالانه تمامی ۲۴۶ حوزه آبخیز برآورد و استخراج شد. تراکم زهکشی تمامی حوزه‌های آبخیز با استفاده از رابطه $D_d = \Sigma L/A$ محاسبه شد و داده‌های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. رابطه بین تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه در هر اقلیم، مدل سازی شد و بهترین مدل برازش یافته از بین تمامی توابع ریاضی و آماری پیشنهادی توسط نرم‌افزار SPSS با استفاده از شاخص‌های مناسب، انتخاب شد. سطح خطای مدل سازی‌های انجام شده کمتر از ۰/۰۰۱ (سطح معنی داری ۹۹/۹ درصد) در نظر گرفته شد. نمودار جریانی روش تحقیق این مطالعه در شکل شماره ۴ ترسیم شده است.

۲-۵-۵- خطای استاندارد تخمین^۱

این شاخص، بزرگی خطای پیش‌بینی را در شبیه‌سازی داده‌های متغیر وابسته توصیف می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{est} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n}} \quad (8)$$

که در آن $\hat{y}$ ، مقدار پیش‌بینی شده متغیر وابسته توسط مدل است. هر چه مقدار این ضریب کم‌تر و نزدیک‌تر به صفر باشد، نشان‌دهنده صحت بیش‌تر مدل در شبیه‌سازی است.

۲-۵-۶- آماره F

این شاخص برای مقایسه واریانس دو گروه مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (9)$$

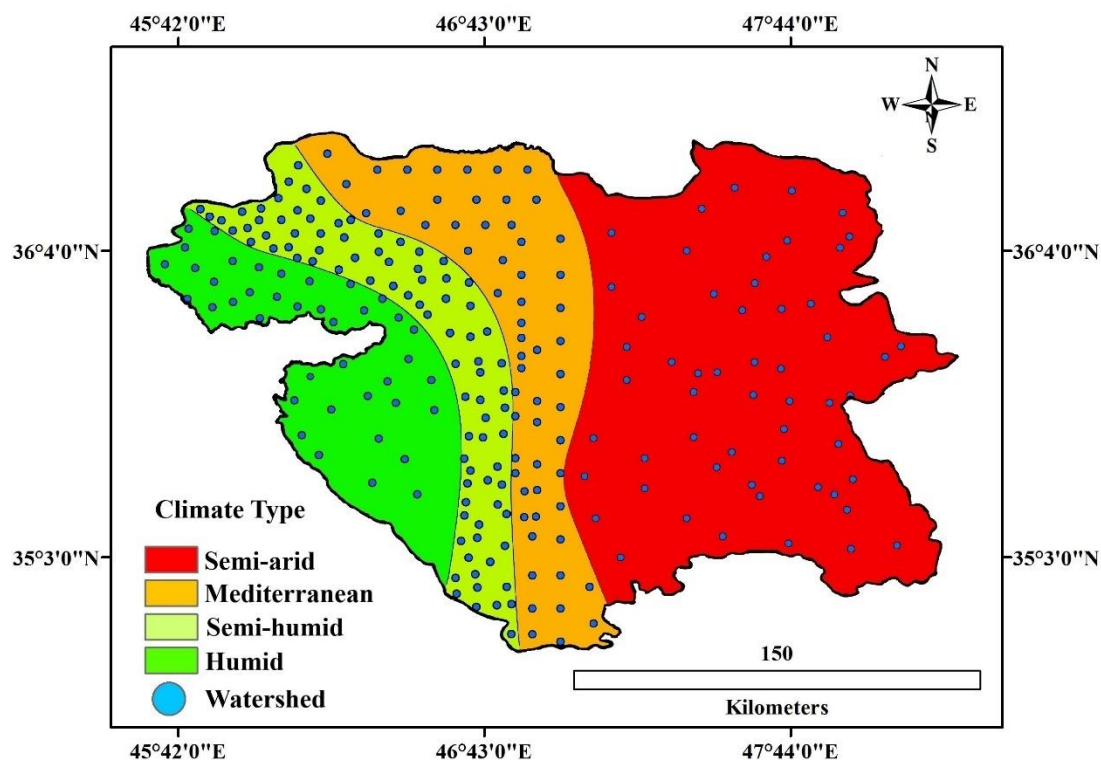
که در آن، MSR، میانگین مربعات کل و MSE، میانگین مربعات خطاست. هر چه این آماره بزرگ‌تر باشد، مدل مورد نظر عملکرد بهتری داشته است (Shahabedini et al., 2018).

۲-۶- روش کار

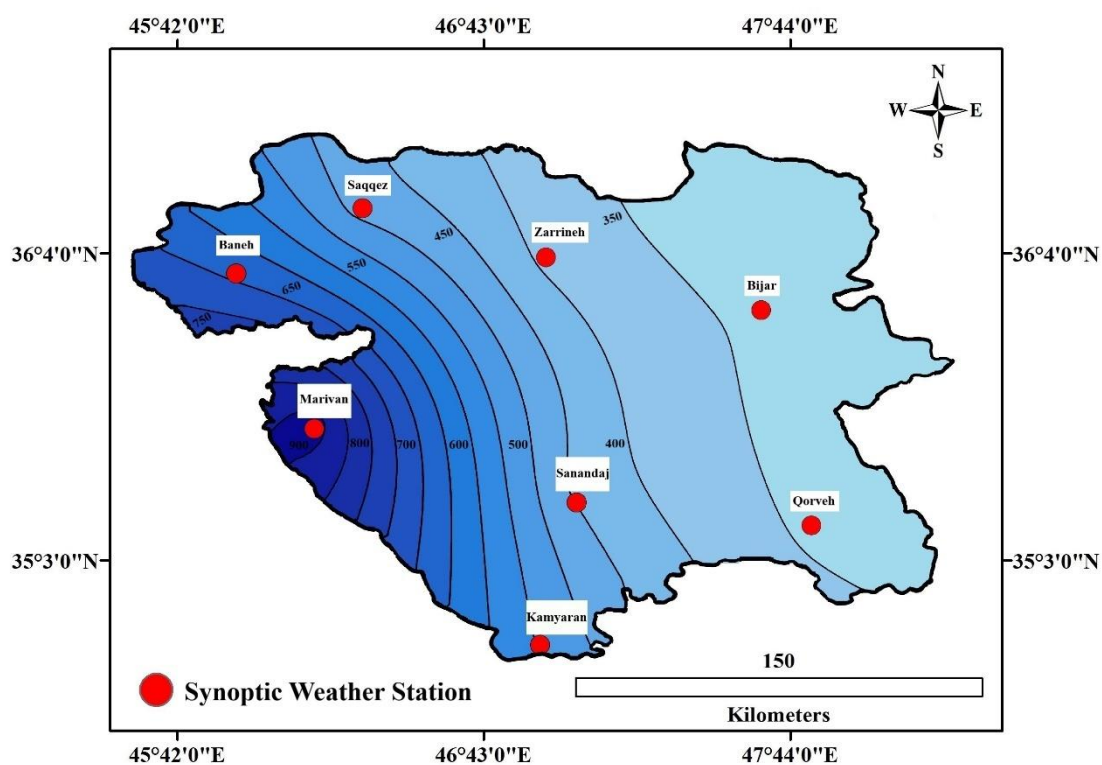
ابتدا نقشه طبقه‌بندی اقلیمی استان کردستان با مطالعه پارامترهای دمای متوسط سالانه و بارش متوسط سالانه در ۸ ایستگاه سینوپتیک سنندج، مریوان، بیجار، سقز، قروه، زرینه اوباتو، بانه و کامیاران (جدول ۱) و با استفاده از روش دومارتن توسط نرم‌افزار Surfer تهیه شد که نتیجه آن، تفکیک ۴ تیپ اقلیمی مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه خشک بود که نقشه آن‌ها در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

چون تعیین مقدار تراکم زهکشی در حوزه‌های آبخیز بزرگ کار سختی است و همواره با خطای زیادی مواجه است، پیشنهاد شده است که مطالعه تراکم زهکشی در حوزه‌های آبخیز کوچک و متوسط انجام پذیرد تا خطای کم‌تری ایجاد شود (Tucker et

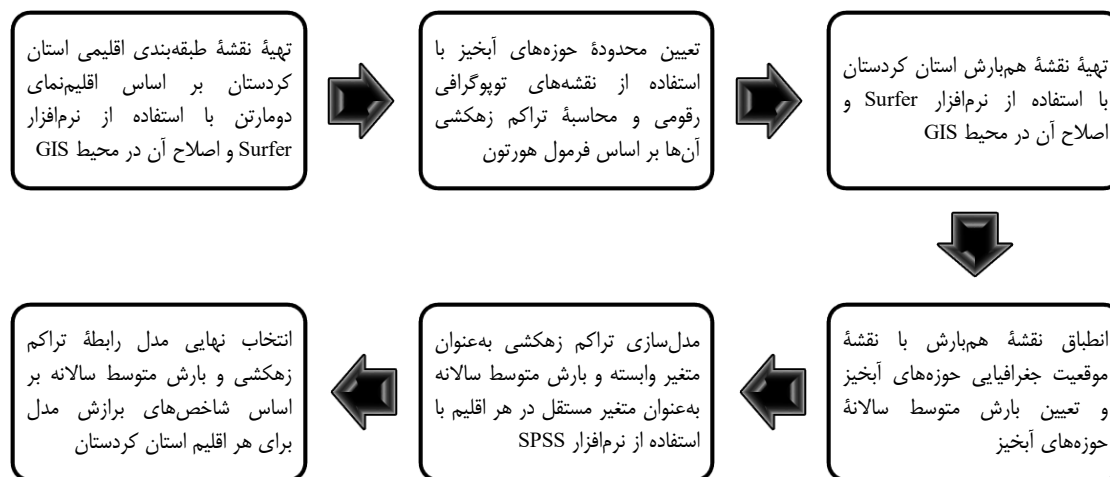
¹. Standard error of the estimate (σ_{est})



شکل ۲- نقشه طبقه بندی اقلیمی استان کردستان و پراکنش حوزه های آبخیز مورد مطالعه به تفکیک تیپ های اقلیمی
Figure 2- Climatic classification map of Kurdistan province and the geographical position of watersheds under investigation in different climates



شکل ۳- نقش z هم بارش استان کردستان و موقعیت ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک مورد استفاده
Figure 3- Iso-Hyetal map of Kurdistan province and the geographical position of the used synoptic weather stations



شکل ۴- نمودار جریان‌ی مدل‌سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه در اقلیم‌های مختلف استان کردستان

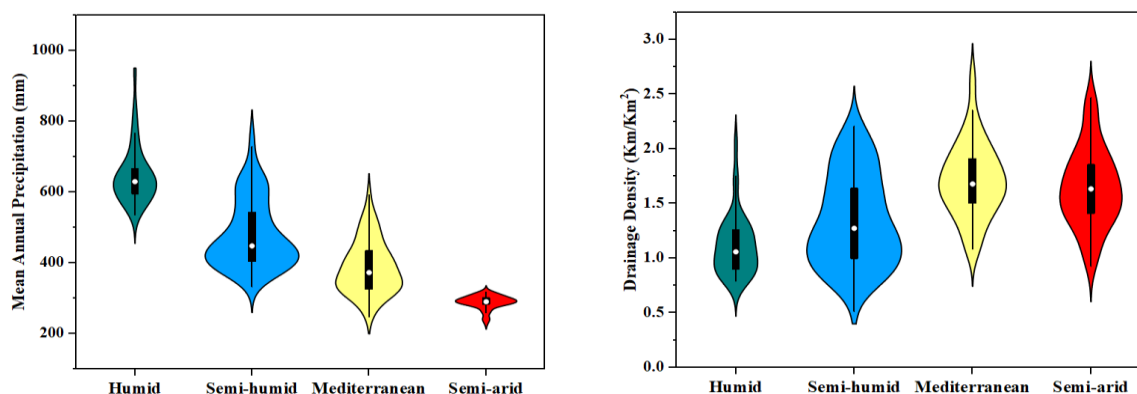
Figure 4- Study flowchart of drainage density modeling based on mean annual precipitation in different climates of Kurdistan province

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نرمال بودن داده‌های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه

بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در سطح خطای ۵ درصد نشان داد که داده‌های تراکم زهکشی در اقلیم‌های مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک نرمال هستند ولی در اقلیم نیمه‌مرطوب نرمال نیستند. علت آن وجود یک فراوانی تراکم زهکشی پیرامون میانه داده‌ها در اقلیم مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک ولی وجود دو فراوانی متفاوت تراکم زهکشی در اقلیم نیمه‌مرطوب است (شکل ۵). همچنین داده‌های

بارش متوسط سالانه غیر از اقلیم مدیترانه‌ای، در سایر اقلیم‌ها نرمال نبودند که علت آن وجود دو دسته فراوانی متفاوت بارش در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک و چولگی زیاد داده‌های بارش به سمت چارک چهارم در اقلیم مرطوب است (شکل ۵). به‌منظور نرمال‌سازی داده‌ها، توابع ریاضی متعددی آزمون شد که نهایتاً تابع Idf.Normal در محیط نرم‌افزار SPSS، قادر به نرمال‌سازی تمامی داده‌های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه بود. مقادیر P آزمون در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد قبل و بعد از نرمال‌سازی داده‌های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه در اقلیم‌های مختلف استان کردستان در جدول شماره ۳ آمده است.



شکل ۵- نمودار ویولنی تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه در اقلیم مختلف استان کردستان

Figure 5- Violin graph of drainage density and mean annual precipitation in different climates of Kurdistan province

جدول ۳- مقادیر P آزمون نرمال بودن کولموگوروف-اسمیرنوف برای داده های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه اقلیم های مختلف قبل و بعد از نرمال سازی در سطح معنی داری ۹۵ درصد

Table 3- P values of Kolmogorov-Smirnov normality test for drainage density and mean annual precipitation in different climates before and after normalization of data at the significance level of 95%

P values for normalization of mean annual precipitation				P values for normalization of drainage density				P value
Semi-arid	Mediterranean	Semi-humid	Humid	Semi-arid	Mediterranean	Semi-humid	Humid	Climate type
0.002	0.064	0.000	0.004	0.200	0.200	0.035	0.159	Before Normalization
0.200	---	0.200	0.200	---	---	0.200	---	After Normalization

(۱۰/۲ درصد) را به خود اختصاص داده است. از مقایسه جداول شماره ۴ و ۵ می توان نتیجه گرفت که بیش ترین تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم نیمه مرطوب بوده که خود این اقلیم دارای بیش ترین تغییرات بارش بوده است ولی کم ترین تغییرات تراکم زهکشی مربوط به اقلیم مرطوب است در حالی که این اقلیم دارای کم ترین تغییرات بارش نبوده است. این نتایج تأییدی بر گفته های Horton (1945) و De Wit and Stankiewicz (2006) است که رابطه بین بارش و تراکم زهکشی را ساده و مستقیم نمی دانند و همچنین مؤید این گفته استرالر است که تراکم زهکشی تابع ساده ای از بارش نیست و در اقلیم مختلف رفتاری کاملاً متفاوت دارد (Strahler, 1964). نتایج هم چنین بیانگر این است که دامنه تغییرات تراکم زهکشی و دامنه تغییرات بارش در اقلیم نیمه مرطوب، بیش ترین مقدار خود را دارد ولی کم ترین دامنه تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم مرطوب بود در حالی که کم ترین دامنه تغییرات بارش در اقلیم نیمه خشک بوده است.

جدول ۴- خصوصیات تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف استان کردستان

Table 4- Characteristics of drainage density in different climates of Kurdistan province

Coefficient of Variation (%)	Standard Deviation	Deariange Density Range (Km/Km ²)	Minimum Drainage Density (Km/Km ²)	Maximum Drainage Density (Km/Km ²)	Mean Drainage Density (Km/Km ²)	Climate Type
24.11	0.27	1.27	0.79	2.06	1.12	Humid
31.34	0.42	1.70	0.51	2.21	1.34	Semi-humid
19.88	0.34	1.60	1.08	2.68	1.71	Mediterranean
21.82	0.36	1.54	0.93	2.47	1.65	Semi-arid
24.13	0.35	1.53	0.83	2.35	1.45	Mean

جدول ۵- خصوصیات بارش متوسط سالانه در اقلیم های مختلف استان کردستان

Table 5- Characteristics of precipitation in different climates of Kurdistan province

Coefficient of Variation (%)	Standard Deviation	Precipitation Range (mm)	Minimum Annual Precipitation (mm)	Maximum Annual Precipitation (mm)	Mean Annual Precipitation (mm)	Climate Type
10.17	64.79	387	525	912	637	Humid
19.06	102.16	465	350	815	536	Semi-humid
21.93	91.70	445	335	780	418	Mediterranean
13.10	45.59	187	303	490	348	Semi-arid
15.68	76.06	372	378	750	485	Mean

هم تفاوت معنی دار دارند. مقایسه میانگین تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف به روش Tukey (1949) ثابت کرد (جدول ۷) که میانگین تراکم زهکشی فقط در اقلیم های مدیترانه ای و نیمه خشک با هم تفاوت معنی دار (سطح احتمال ۵ درصد) ندارند،

۳-۲- وضعیت تراکم زهکشی و بارش استان کردستان

نتایج تجزیه و تحلیل توصیفی تراکم زهکشی و داده های بارش متوسط سالانه در جداول شماره ۴ و ۵ آمده است. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، اقلیم مدیترانه ای با متوسط تراکم زهکشی ۱/۷۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع و اقلیم مرطوب با متوسط تراکم زهکشی ۱/۱۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع به ترتیب دارای بیش ترین و کم ترین تراکم زهکشی در استان کردستان بوده اند که این مسأله را می توان به تخریب بی رویه پوشش گیاهی در اقلیم مدیترانه ای و وجود پوشش گیاهی نسبتاً مناسب در اقلیم مرطوب نسبت داد. بیش ترین تراکم زهکشی در اقلیمی اتفاق افتاده است که کم ترین ضریب تغییرات تراکم زهکشی (۱۹/۹ درصد) را دارد و بیش ترین ضریب تغییرات بارش متوسط سالانه (۲۱/۹ درصد) را دارد. کم ترین تراکم زهکشی در اقلیمی اتفاق افتاده است که دارای ضریب تغییرات تراکم زهکشی زیاد (نه حداکثر) بوده ولی کم ترین ضریب تغییرات بارش متوسط سالانه

۳-۳- تجزیه و تحلیل آماری تراکم زهکشی

نتایج تجزیه واریانس داده ها (جدول ۶) نشان داد که نوع تیپ اقلیمی اثر معنی داری (سطح خطای ۰/۰۰۰۱) بر روی تراکم زهکشی دارد یعنی مقادیر تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف با

در سایر اقلیم، تفاوت معنی دار بین میانگین های تراکم زهکشی دیده می شود (شکل ۶).

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر نوع تیپ اقلیمی بر روی تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف استان کردستان

Table 6- Analysis of variance of climate type effect on drainage density in different climates of Kurdistan province

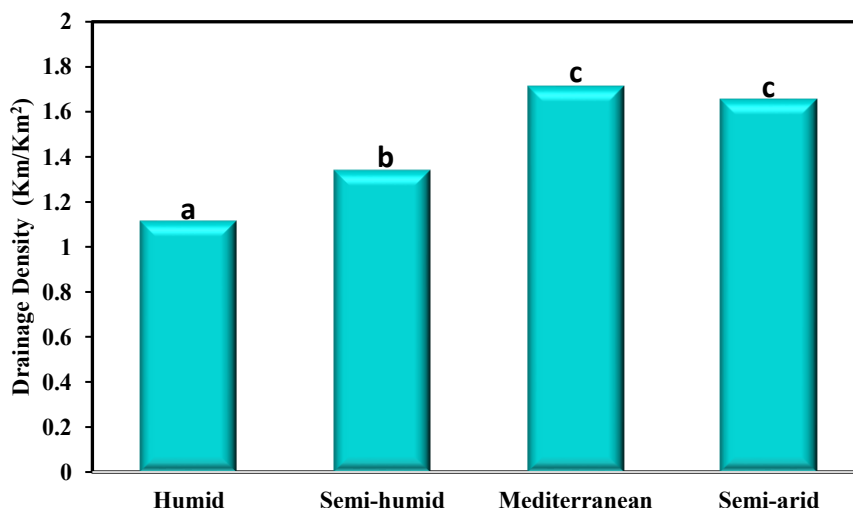
P value	Calculated F	Mean of Squares (MS)	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (df)	Source of Variation (SOV)
0.0001	29.985	4.028 0.134	12.084 32.509	3 242	Between Climates Within Climate (Error)
			44.593	245	Total

جدول ۷- مقایسه میانگین تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف استان کردستان به روش توکی

Table 7- Comparison of drainage density means in different climates of Kurdistan province using Tukey method

Semi-arid	Mediterranean	Semi-humid	Humid	
0.5388 *	0.5973 *	0.2246 *	—	Humid
0.3142 *	0.3727 *	—	—	Semi-humid
0.0585 n.s	—	—	—	Mediterranean
—	—	—	—	Semi-arid

* معنی دار در سطح خطای ۵ درصد؛ n.s غیر معنی دار



شکل ۶- مقایسه میانگین های تراکم زهکشی در اقلیم های مختلف استان کردستان

Figure 6- Comparison of drainage density means in different climates of Kurdistan province

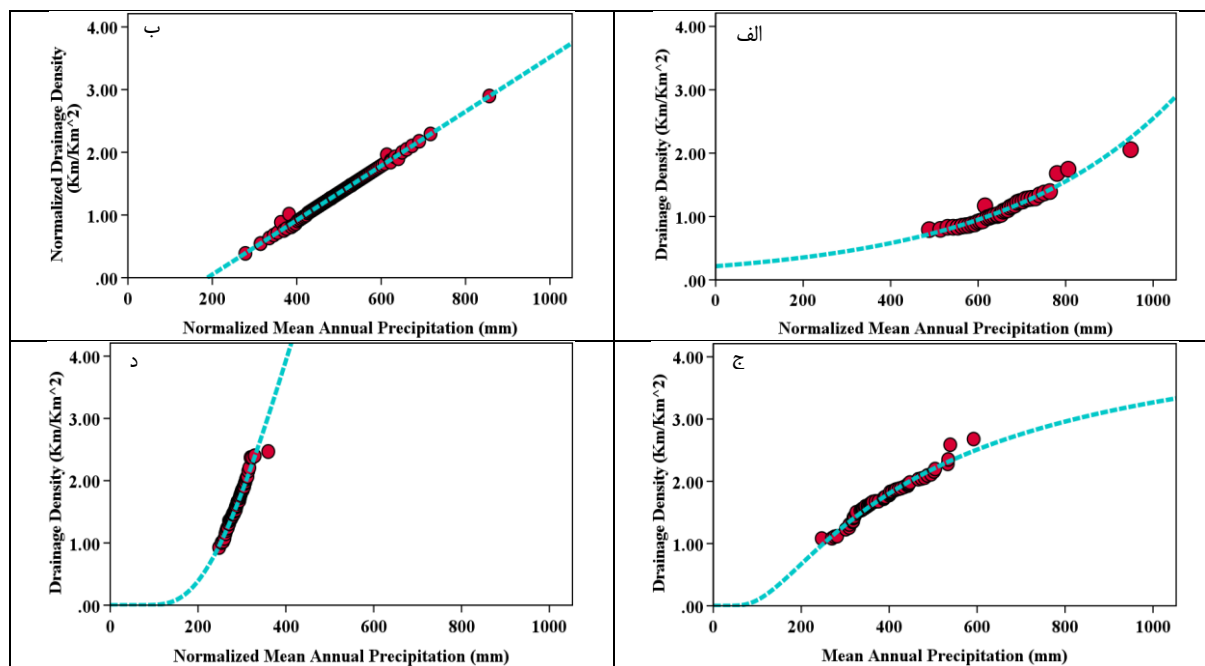
به منظور انتخاب بهترین مدل برازش یافته به رابطه تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه در اقلیم مختلف، شاخص های زیادی به کار گرفته شد که در بخش مواد و روش ها معرفی شدند و در جداول ۸ تا ۱۱ مقادیر آن ها آمده است. در اقلیم مرطوب، بهترین مدل برازش یافته به رابطه تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه، مدل های ترکیبی، رشد، نمایی و لجستیک بودند که از لحاظ تمامی شاخص های انتخاب مدل یکسان بودند، ولی با توجه به مرسوم تر بودن مدل نمایی، نهایتاً مدل نمایی پیشنهاد شد (جدول ۸ و شکل ۷ الف). در اقلیم نیمه مرطوب، بهترین مدل، مدل های خطی، درجه دوم و درجه سوم بودند چون دارای معیار اطلاعات

۳-۴- مدل سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه

به منظور مدل سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه، در هر تیپ اقلیمی، تمامی مدل های آماری و ریاضی ممکن پیشنهادی توسط نرم افزار SPSS (۱۱ مدل) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج (شکل ۷) نشان می دهند که رفتار تراکم زهکشی حوزه های آبخیز در اقلیم های مختلف استان کردستان متفاوت است و با توجه به مقادیر P آزمون در جداول ۸ تا ۱۱، تمامی مدل های آزمون شده در سطح خطای ۰/۰۰۱ معنی دار هستند؛ بدین معنی که همه مدل ها دارای اعتبار لازم می باشند.

بود هر چند که ضرایب همبستگی، تبیین و تبیین تعدیل شده آن با ضرایب مشابه مدل های درجه دوم و سوم یکسان بودند (جدول ۱۰ و شکل ۷ ج). در اقلیم نیمه خشک، مدل سیگموئید از نظر تمامی شاخص های انتخاب مدل عملکرد بهتری داشت و بنابراین به عنوان مدل نهایی انتخاب شد (جدول ۱۱ و شکل ۷ د). توابع ریاضی مدل های معرفی شده به تفکیک اقلیمی در جدول شماره ۱۲ ارائه شده اند.

آکائیکه، ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب تعدیل شده یکسان بودند، اما چون خطای استاندارد تخمین مدل خطی کمتر و آماره F آن، بیش تر از توابع درجه دوم و درجه سوم بود، در نهایت مدل خطی پیشنهاد شد (جدول ۹ و شکل ۷ ب). در اقلیم مدیترانه ای، مدل سیگموئید^۱ (S-shaped Curve) به عنوان مدل نهایی انتخاب شد، چون شاخص های آکائیکه، خطای استاندارد تخمین و آماره F این مدل از سایر مدل ها بهتر



شکل ۷- مدل سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه حوزه های آبخیز استان کردستان در الف) اقلیم مرطوب، ب) اقلیم نیمه مرطوب، ج) اقلیم مدیترانه ای و د) اقلیم نیمه خشک

Figure 7- Modeling drainage density based on mean annual precipitation of Kurdistan province watersheds in a) humid, b) semi-humid, c) Mediterranean, and d) semi-arid climates

جدول ۸- شاخص های مختلف ارزیابی مدل سازی تراکم زهکشی با استفاده از بارش متوسط سالانه در اقلیم مرطوب استان کردستان

Table 8- Different criteria of evaluating drainage density modeling using mean annual precipitation in humid climate of Kurdistan province

P value	F	σ_{est}	Adj. R^2	R^2	r	AIC	Model Type
<0.001	524.35	0.07	0.931	0.93	0.97	14.63	Linear
<0.001	316.87	0.09	0.890	0.89	0.94	13.71	Logarithmic
<0.001	195.33	0.11	0.833	0.84	0.91	12.87	Inverse
<0.001	356.89	0.06	0.948	0.95	0.97	15.25	Quadratic
<0.001	356.89	0.06	0.948	0.95	0.97	15.25	Cubic
<0.001	711.05	0.05	0.948	0.95	0.97	16.01	Compound
<0.001	566.57	0.06	0.935	0.98	0.97	15.57	Power
<0.001	358.89	0.07	0.902	0.90	0.95	14.73	Sigmoid
<0.001	711.05	0.05	0.948	0.95	0.97	16.01	Growth
<0.001	711.05	0.05	0.948	0.95	0.97	16.01	Exponential
<0.001	711.05	0.05	0.948	0.95	0.97	16.01	Logistic

¹. Sigmoid

جدول ۹- شاخص های مختلف ارزیابی مدل سازی تراکم زهکشی با استفاده از بارش متوسط سالانه در اقلیم نیمه مرطوب استان کردستان

Table 9- Different criteria of evaluating drainage density modeling using mean annual precipitation in semi-humid climate of Kurdistan province

P value	F	σ_{est}	Adj. R^2	R^2	r	AIC	Model Type
<0.001	17347.75	0.03	0.99	0.99	0.99	18.01	Linear
<0.001	2993.37	0.07	0.97	0.97	0.98	14.54	Logarithmic
<0.001	865.35	0.13	0.91	0.91	0.95	12.19	Inverse
<0.001	8581.05	0.03	0.99	0.99	0.99	18.01	Quadratic
<0.001	5659.46	0.03	0.99	0.99	0.99	18.01	Cubic
<0.001	1139.80	0.09	0.93	0.93	0.96	13.58	Compound
<0.001	4313.03	0.05	0.98	0.98	0.99	16.14	Power
<0.001	8501.78	0.03	0.99	0.99	0.99	17.48	Sigmoid
<0.001	1139.80	0.09	0.93	0.93	0.96	13.59	Growth
<0.001	1139.80	0.09	0.93	0.93	0.96	13.59	Exponential
<0.001	1139.80	0.09	0.93	0.93	0.96	13.59	Logistic

جدول ۱۰- شاخص های مختلف ارزیابی مدل سازی تراکم زهکشی با استفاده از بارش متوسط سالانه در اقلیم مدیترانه ای استان کردستان

Table 10- Different criteria of evaluating drainage density modeling using mean annual precipitation in Mediterranean climate of Kurdistan province

P value	F	σ_{est}	Adj. R^2	R^2	r	AIC	Model Type
<0.001	1978.83	0.06	0.97	0.97	0.98	15.39	Linear
<0.001	2016.72	0.06	0.97	0.97	0.98	15.42	Logarithmic
<0.001	1092.29	0.08	0.95	0.95	0.97	14.25	Inverse
<0.001	1052.43	0.06	0.97	0.97	0.99	15.54	Quadratic
<0.001	1052.43	0.06	0.97	0.97	0.99	15.54	Cubic
<0.001	876.48	0.05	0.93	0.94	0.97	15.96	Compound
<0.001	1697.26	0.04	0.97	0.97	0.98	17.21	Power
<0.001	2129.99	0.03	0.97	0.97	0.99	17.67	Sigmoid
<0.001	876.48	0.05	0.93	0.94	0.97	15.96	Growth
<0.001	876.48	0.05	0.93	0.94	0.97	15.96	Exponential
<0.001	876.48	0.05	0.93	0.94	0.97	15.96	Logistic

جدول ۱۱- شاخص های مختلف ارزیابی مدل سازی تراکم زهکشی با استفاده از بارش متوسط سالانه در اقلیم نیمه خشک استان کردستان

Table 11- Different criteria of evaluating drainage density modeling using mean annual precipitation in semi-arid climate of Kurdistan province

P value	F	σ_{est}	Adj. R^2	R^2	r	AIC	Model Type
<0.001	1431.22	0.07	0.96	0.96	0.98	14.72	Linear
<0.001	1792.24	0.06	0.97	0.97	0.98	15.15	Logarithmic
<0.001	1818.05	0.06	0.97	0.97	0.98	15.18	Inverse
<0.001	993.96	0.06	0.97	0.97	0.99	15.40	Quadratic
<0.001	1031.15	0.06	0.97	0.97	0.99	15.46	Cubic
<0.001	885.26	0.05	0.94	0.94	0.97	15.71	Compound
<0.001	1387.09	0.04	0.96	0.96	0.98	16.57	Power
<0.001	2198.59	0.03	0.97	0.98	0.99	17.46	Sigmoid
<0.001	885.26	0.05	0.94	0.94	0.97	15.71	Growth
<0.001	885.26	0.05	0.94	0.94	0.97	15.71	Exponential
<0.001	885.26	0.05	0.94	0.94	0.97	15.71	Logistic

جدول ۱۲- بهترین مدل برازش یافته معرف رابطه تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه در اقلیم مختلف استان کردستان

Table 12- Best-fitted model representing the relationship of drainage density and mean annual precipitation in different climates of Kurdistan province

Climate Type	Best Fitted Model	Model Type
Humid	$D_d = 0.217e^{0.002 P}$	Exponential
Semi-humid	$D_d = 0.004 P - 0.815$	Linear
Mediterranean	$D_d = e^{(1.580 - \frac{395.802}{P})}$	Sigmoid
Semi-arid	$D_d = e^{(3.680 - \frac{924.680}{P})}$	Sigmoid

آبخیز کردستان تحت کنترل اقلیم بوده است و دوماً هر اقلیم باعث رفتار متفاوتی می شود، به طوری که میزان تأثیرگذاری اقلیم در تراکم زهکشی متفاوت است و این نتیجه با یافته های Horton

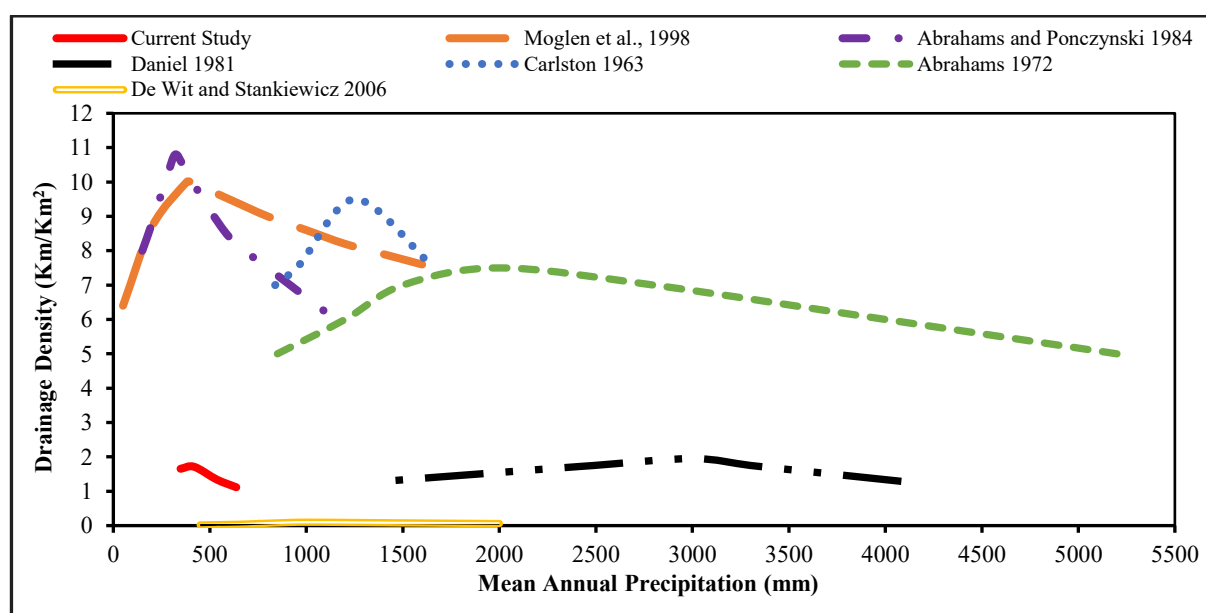
این نتایج بیانگر این واقعیت است که اولاً اقلیم (بارش) نقش کنترل کنندگی بسیار بالایی در تراکم زهکشی حوزه های آبخیز استان کردستان دارد که این با یافته های سجادی (Sajadi, 2018) کاملاً انطباق دارد زیرا تکامل سیستم آبراهه ای حوزه های

(1945)، (1964) Strahler و (2022) Luijendijk مطابقت دارد.

۳-۵- روند تغییرات تراکم زهکشی با بارش

مطالعه روند تغییرات تراکم زهکشی بر حسب بارش متوسط سالانه (شکل ۱۱) بیانگر این مطلب است که در استان کردستان، حداکثر تراکم زهکشی در بارش متوسط ۴۰۰ میلی متر اتفاق می افتد. این بارش به عنوان بارش معرف برای ارزیابی تراکم زهکشی در استان کردستان معرفی می شود، بدین معنی که هر چه بارش از این مقدار بیش تر یا کم تر شود، مقدار تراکم زهکشی کم تر می شود. روند تغییرات تراکم زهکشی حوزه های آبخیز استان کردستان با روند تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم نیمه خشک ایالات متحده آمریکا مشابهت دارد چون Abrahams and Ponczynski (1984) و Moglen et al. (1998) ثابت کرده اند که این روند در ایالات متحده حاکم است فقط با این تفاوت که در بعضی ایالات، بارش معرف ۴۵۰ میلی متر است و در بعضی ایالات دیگر ۲۸۰ میلی متر است، بدین معنی که تراکم زهکشی در این بارش ها حداکثر و با کاهش و یا افزایش این مقدار، کم می شود (شکل ۸). روند تغییرات تراکم زهکشی با بارش در اقلیم

نیمه مرطوب و مرطوب هم از الگوی اقلیم خشک و نیمه خشک پیروی می کند. Gregory and Gardiner (1975) و Gregory (1976) اظهار کرده اند که حداکثر تراکم زهکشی در بارش سالانه ۵۰۰ میلی متر (اقلیم نیمه مرطوب) اتفاق می افتد و در بارش های کم تر و بیش تر از این حد، تراکم زهکشی کم می شود. در اقلیم مرطوب، مطالعات (1963) Carlston، (1981) Daniel، (1984) Abrahams and Ponczynski (شکل ۸) و (2016) Sangireddy et al. نشان داده است که تراکم زهکشی با بارش تغییر می کند، به طوری که مقدار آن در بارش های به ترتیب ۱۲۵۰، ۳۰۰۰، ۲۸۰ و ۱۰۰۰ میلی متری به حداکثر می رسد و با افزایش و کاهش بارش از این میزان، مقدار تراکم زهکشی کاهش می یابد. الگوی تغییرات تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه در قاره آفریقا هم مشابه با اقلیم های مرطوب، نیمه مرطوب و نیمه خشک سایر مناطق دنیا بوده با این تفاوت که مقادیر تراکم زهکشی بسیار کم تر است و حداکثر آن در بارش ۱۰۰۰ میلی متری اتفاق می افتد (De Wit and Stankiewicz, 2006) که در شکل شماره ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- تغییرات تراکم زهکشی با بارش در استان کردستان و مقایسه آن با نتایج سایر مطالعات
Figure 8- Variability of drainage density in Kurdistan province in comparison with other studies

۴- نتیجه گیری

تراکم زهکشی ۲۴۶ حوزه آبخیز کوچک استان کردستان مورد بررسی قرار گرفت و رابطه آن با بارش متوسط سالانه مدل سازی شد و همچنین نقش اقلیم در روند تغییرات تراکم زهکشی مشخص گردید. یافته های این تحقیق نشان داد که اقلیم اثر

معنی داری بر روی تراکم زهکشی حوزه های آبخیز دارد، به طوری که در هر اقلیم، رابطه بین تراکم زهکشی و مقدار بارش دارای رفتار منحصر به فردی بوده و متفاوت است. تنها در اقلیم های مرطوب و نیمه مرطوب، نوع مدل ارتباطی بین تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه نزدیک به خطی و یا خطی و مستقیم بود

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه کردستان است که بدین وسیله تشکر و سپاسگزاری می شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

داده ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به صورت زیر است:

کامران چپی: مجری طرح پژوهشی، طرح موضوع پژوهش و روش تحقیق، نظارت بر روند اجرای تحقیق، تهیه و آماده سازی داده ها، تهیه پیش نویس مقاله، اصلاح و نهایی سازی مقاله؛ شمیم فیضی: تجزیه و تحلیل داده ها و استخراج نتایج؛ زانبار فاتحی: تهیه و تنظیم نقشه ها، نظارت بر تجزیه و تحلیل داده ها.

منابع

- آزادطلب، مهناز، شهبابی، هیمین، شیرزادی، عطاله، و چپی، کامران (۱۳۹۹). پهنه بندی خطر سیلاب در شهر سنندج با استفاده از مدل های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی. *مطالعات شهری*، ۹ (۳۶)، ۲۷-۴۰. doi: 10.34785/J011.2021.801
- اداره کل حفاظت محیط زیست استان کردستان (۱۴۰۳). موقعیت جغرافیایی استان کردستان. اقتباس از سایت اداره کل حفاظت محیط زیست کردستان.
- اداره کل هواشناسی کردستان (۱۴۰۳). ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک. اقتباس از سایت اداره کل هواشناسی کردستان.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان کردستان (۱۳۹۷). بازننگری و تهیه سند آمایش استان کردستان، گزارش فصل اول: تحلیل وضعیت استان؛ تحلیل وضعیت منابع طبیعی و محیط زیست، ۲۳۴ صفحه. طباطبائی، محمد و قصریانی، فرهنگ (۱۳۷۱). منابع طبیعی کردستان (جنگلها و مراتع). چاپ اول، واحد انتشارات بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی، ۷۶۷ صفحه.
- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان (۱۴۰۳ الف). سیمای خاک های استان کردستان. اقتباس از سایت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان.
- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان (۱۴۰۳ ب). منابع طبیعی استان کردستان. اقتباس از سایت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان.

که آن هم به دلیل پوشش گیاهی متراکم است که بارش بیش تر باعث افزایش بیش تر پوشش گیاهی نمی شود و در نتیجه این رفتار حاصل می شود. همچنین ثابت شد که حداکثر تراکم زهکشی در بارش متوسط سالانه ۴۰۰ میلی متر (اقلیم نیمه مرطوب) اتفاق می افتد. در بارش های کم تر از ۴۰۰ میلی متر (اقلیم های مدیترانه ای و نیمه خشک) و بیش تر از ۴۰۰ میلی متر (اقلیم مرطوب)، با افزایش بارش، مقدار تراکم زهکشی کاهش یافته است. علت کاهش تراکم زهکشی در بارش های بالاتر و پایین تر از حد متوسط ۴۰۰ میلی متر را می توان به نقش پوشش گیاهی به عنوان یک فاکتور کنترل کننده تراکم زهکشی نسبت داد. در بارش های کم تر از ۴۰۰ میلی متر، علیرغم کاهش پوشش گیاهی (افزایش فرسایش پذیری)، اثر فرسایش پذیری بارش کم می شود، در حالی که در بارش های بیش تر از ۴۰۰ میلی متر، علیرغم افزایش اثر فرسایش پذیری بارش، به دلیل افزایش پوشش گیاهی (کاهش فرسایش پذیری) مقدار تراکم زهکشی کاهش می یابد. پوشش گیاهی هم باعث افزایش مقاومت سطحی و هم باعث افزایش انتقال دهی (ترانسمیسیویته) می شود که افزایش این دو عامل باعث کاهش تراکم زهکشی می شود. همچنین تشدید هوازدهی در اقلیم های مرطوب باعث افزایش ضخامت رگولیت می شود که خود این عامل منجر به افزایش انتقال دهی و کاهش تراکم زهکشی می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در اقلیم های مدیترانه ای و نیمه خشک، تغییرات تراکم زهکشی تحت کنترل بارش و در اقلیم های نیمه مرطوب و مرطوب، تغییرات تراکم زهکشی تحت کنترل پوشش گیاهی است که جا دارد در مطالعات آینده اثر پوشش گیاهی بر روی تراکم زهکشی بررسی شود. رابطه بسیار نزدیک تراکم زهکشی و بارش ثابت نمود که این شاخص می تواند در مطالعات تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب و سایر مخاطرات طبیعی مانند مدل سازی سیلاب، زمین لغزش، فرسایش خاک و مکان یابی آب های زیرزمینی با اطمینان کامل مورد استفاده قرار بگیرد، ولی لازم است در به کارگیری آن در اقلیم های مختلف، تغییرات آن را مد نظر قرار داد. این نوع مطالعات می توانند کمک شایانی به برنامه ریزان حوزه های آبخیز نمایند تا در طرح های کاربردی و آمایش سرزمین مناطق مختلف از آن ها بهره ببرند و مسیر توسعه حوزه آبخیز و کل منطقه را هموارتر نمایند.

حامی مالی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه کردستان انجام شده است. هزینه اجرایی و انتشار مقاله از محل گرنت پژوهشی شماره ۲/۹/۳۹۲۳۹/ص نویسنده مسئول بوده است.

References

- Abrahams, A. D. (1972). Drainage densities and sediment yields in eastern Australia. *Australian Geographical Studies*, 10(1), 19-41. doi: 10.1111/j.1467-8470.1972.tb00127.x
- Abrahams, A. D., & Ponczynski, J. J. (1984). Drainage density in relation to precipitation intensity in the USA. *Journal of Hydrology*, 75(1-4), 383-388. doi: 10.1016/0022-1694(84)90061-1
- Adhikari, S. (2020). Morphometric analysis of a drainage basin: A study of Ghatganga River, Bajhang District, Nepal. *The Geographic Base*, 7, 127-144.
- Ahmadi, S., Amjadi, H., Chapi, K., Soodmand Afshar, R., & Ebrahimi, B. (2023). Fuzzy flash flood risk and vulnerability assessment for the city of Sanandaj, Kurdistan Province, Iran. *Natural Hazards*, 115(1), 237-259. doi: 10.1007/s11069-022-05552-z
- Ahmed, A., Alrajhi, A., & Alquwaizany, A. S. (2021). Identification of groundwater potential recharge zones in flinders ranges, South Australia using remote sensing, GIS, and MIF techniques. *Water*, 13(18), 2571. doi: 10.3390/w13182571
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716-723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705
- Ali, A. M. (2024). Making Different Topographic Maps with the Surfer Software Package. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1), 12556-12560.
- Al-neama, S. N., Yang, S., & Yahya, B. M. (2022). Evaluation of surface run-off potential of basins in Nineveh governorate, Iraq based on morphometric analysis, using RS and GIS. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1753-1768. doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.313
- Arabameri, A., Pal, S. C., Rezaie, F., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Blaschke, T., & Ngo, P. T. T. (2021). Comparison of multi-criteria and artificial intelligence models for land-subsidence susceptibility zonation. *Journal of Environmental Management*, 284, 112067. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112067
- Avand, M., Mohammadi, M., Mirchooli, F., Kavian, A., & Tiefenbacher, J. P. (2023). A new approach for smart soil erosion modeling: integration of empirical and machine-learning models. *Environmental Modeling & Assessment*, 28(1), 145-160. doi: 10.1007/s10666-022-09858-x
- Azadtalab, M., Shahabi, H., Shirzadi, A., & Chapi, K. (2020). Flood hazard mapping in Sanandaj using combined models of statistical index and evidential belief function. *Motaleate Shahri*, 9(36), 27-40. doi: 10.34785/J011.2021.801 [In Persian]
- Bandara, C. M. (1974). Drainage density and effective precipitation. *Journal of Hydrology*, 21(2), 187-190. doi: 10.1016/0022-1694(74)90036-5
- Bogale, A. (2021). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 11(7), 122. doi: 10.1007/s13201-021-01447-9
- Brooks, K. N., & Eckman, K. (2000). Global Perspective of Watershed Management, In *Land Stewardship in the 21st Century: The Contributions of Watershed Management: Conference Proceedings, Tucson, Arizona, March 13-16, 2000* (p. 11). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Bujak-Ozga, I., van Meerveld, H. J., Rinaldo, A., & von Freyberg, J. (2023). Short-term dynamics of drainage density based on a combination of channel flow state surveys and water level measurements. *Hydrological Processes*, 37(12), e15041. doi: 10.1002/hyp.15041
- Carlston, C. W. (1963). Drainage density and streamflow. US Government Printing Office.
- Chadwick, O. A., Gavenda, R. T., Kelly, E. F., Ziegler, K., Olson, C. G., Elliott, W. C., & Hendricks, D. M. (2003). The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chemical Geology*, 202(3-4), 195-223. doi: 10.1016/j.chemgeo.2002.09.001
- Chorley, R. J. (1957). Climate and morphometry. *The Journal of Geology*, 65(6), 628-638. doi: 10.1086/626468
- Chorley, R. J., & Morgan, M. A. (1962). Comparison of morphometric features, Unaka Mountains, Tennessee and North Carolina, and Dartmoor, England. *Geological Society of America Bulletin*, 73(1), 17-34. doi: 10.1130/0016-7606(1962)73[17: COMFUM]2.0.CO;2
- Clubb, F. J., Mudd, S. M., Attal, M., Milodowski, D. T., & Grieve, S. W. (2016). The relationship between drainage density, erosion rate, and hilltop curvature: Implications for sediment transport processes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(10), 1724-1745. doi: 10.1002/2015JF003747
- Collins, D. B. G., & Bras, R. L. (2010). Climatic and ecological controls of equilibrium drainage density, relief, and channel concavity in dry lands. *Water Resources Research*, 46(4). doi: 10.1029/2009WR008615
- Dang, M. T., & Nguyen, D. B. (2018). Application of GIS technology to establish a drainage density hierarchical map for flood hazard zoning in Lam

- River basin. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 59, 32-42.
- Daniel, J. R. K. (1981). Drainage density as an index of climatic geomorphology. *Journal of Hydrology*, 50, 147-154.
doi: 10.1016/0022-1694(81)90065-2
- De Martonne, E. (1926). Aerisme, et indices d'aridite. *Comptesrendus de L'Academie des Sciences*, 182, 1395-1398.
- Derikvand, S. (2024). Analysis of the development of drainage basins during active fold growth (Chenareh anticline, Zagros fold-and-thrust belt, Iran). *Geopersia*, 14(2), 419-438.
doi: 10.22059/geope.2024.373766.648748
- De Wit, M., & Stankiewicz, J. (2006). Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science*, 311(5769), 1917-1921.
doi: 10.1126/science.1119929
- Di Lazzaro, M., Zarlenga, A., & Volpi, E. (2014). A new approach to account for the spatial variability of drainage density in rainfall-runoff modelling. *Boletin Geologico y Minero*, 125(3), 301-313.
- Dingman, S. L. (1978). Drainage density and streamflow: A closer look. *Water Resources Research*, 14(6), 1183-1187.
doi: 10.1029/WR014i006p01183
- Doornkamp, J. C., & King, C. A. (1971). *Numerical analysis in geomorphology: an introduction*. 1st Edition; Edward Arnold, 372 pages.
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272730993792>
- Environmental Protection Department of Kurdistan Province. (2024). Geographical position of Kurdistan province. Accessed on 6 January 2024. [In Persian]
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., Haregeweyn, N., & Woldearegay, K. (2017). Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. *Applied Water Science*, 7(7), 3825-3840.
doi: 10.1007/s13201-017-0534-4
- Gajbhiye, S., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2014). Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. *Applied Water Science*, 4(1), 51-61.
doi: 10.1007/s13201-013-0129-7
- García, M. J. L., & Camarasa, A. M. (1999). Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a dem: comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1(3-4), 187-195.
doi: 10.1016/S0303-2434(99)85012-0
- Gao, H., Liu, F., Yan, T., Qin, L., & Li, Z. (2022). Drainage density and its controlling factors on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 9, 755197.
doi: 10.3389/feart.2021.755197
- Gregory, K. J. (1976). Drainage networks and climate. Pp. 289-315. In: Derbyshire E (eds). *Geomorphology and climate*, John Wiley, New York.
- Gregory, K. J., & Gardiner, V. (1975). Drainage density and climate, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 19(3), 287-298.
doi: 10.1127/zfg/19/1975/287
- Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1968). The variation of drainage density within a catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 13(2), 61-68.
doi: 10.1080/02626666809493583
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361. doi: 10.1029/TR013i001p00350
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370. doi: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
- Jaafarzadeh, M. S., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Rouhani, H. (2021). Groundwater recharge potential zonation using an ensemble of machine learning and bivariate statistical models. *Scientific Reports*, 11(1), 5587. doi: 10.1038/s41598-021-85205-6
- Jothimani, M., Abebe, A., & Berhanu, G. (2022, March). Application of remote sensing, GIS, and drainage morphometric analysis in groundwater potential assessment for sustainable development in Iyenda River Catchment, Konso Zone, Rift Valley, Southern Ethiopia. 2021 International Conference on Innovative and Sustainable Technologies in Civil Engineering, 24-25 September 2021, Bapatla, India, doi: 10.1088/1755-1315/982/1/012032
- Kashiwaya, K. (1983). A mathematical model for the temporal change of drainage density. *Transactions of Japanese Geomorphological Union*, 4, 25-31.
- Kelson, K. I., & Wells, S. G. (1989). Geologic influences on fluvial hydrology and bedload transport in small mountainous watersheds, northern New Mexico, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14(8), 671-690.
doi: 10.1002/esp.3290140803
- Kolmogorov, A. N. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giorn Dell'inst Ital Degli Att*, 4, 89-91.
- Krishnan, A., & Ramasamy, J. (2024). Morphometric assessment and prioritization of the South India Moyar river basin sub-watersheds using a geo-computational approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 8(2), 129-139. doi: 10.1080/24749508.2022.2109819
- Kumar, M., Singh, P., & Singh, P. (2023). Machine learning and GIS-RS-based algorithms for mapping the groundwater potentiality in the

- Bundelkhand region, India. *Ecological Informatics*, 74, 101980. doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.101980
- Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. (2024a). Soil landscapes of Kurdistan province. Accessed on 8 January 2024. [In Persian]
- Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. (2024b). Natural resources of Kurdistan province. Accessed on 8 January 2024. [In Persian]
- Kurdistan Management and Planning Organization. (2018). Review and preparation of land-use planning of Kurdistan province. First chapter report: Kurdistan province situation analysis; Environment and natural resources analysis, pp. 234. [In Persian]
- Kurdistan Meteorological Bureau. (2024). Synoptic weather station. Accessed on 6 January 2024. [In Persian]
- Lin, P., Pan, M., Wood, E. F., Yamazaki, D., & Allen, G. H. (2021). A new vector-based global river network dataset accounting for variable drainage density, *Scientific Data*, 8(1), 28. doi: 10.1038/s41597-021-00819-9
- Lodes, E., Scherler, D., Wittmann, H., Schleicher, A. M., Stammeier, J. A., Loyola Lafuente, M. A., & Grigusova, P. (2024). Influence of lithology and biota on stream erosivity and drainage density in a semi-arid landscape, Central Chile. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(11), e2024JF007684. doi: 10.1029/2024JF007684
- Luijendijk, E. (2022). Transmissivity and groundwater flow exert a strong influence on drainage density. *Earth Surface Dynamics*, 10(1), 1-22. doi: 10.5194/esurf-10-1-2022
- Mandal, K., Saha, S., & Mandal, S. (2021). Applying deep learning and benchmark machine learning algorithms for landslide susceptibility modelling in Rorachu river basin of Sikkim Himalaya, India. *Geoscience Frontiers*, 12(5), 101203. doi: 10.1016/j.gsf.2021.101203
- Mao, Y., Li, Y., Teng, F., Sabonchi, A. K., Azarafza, M., & Zhang, M. (2024). Utilizing hybrid machine learning and soft computing techniques for landslide susceptibility mapping in a drainage basin. *Water*, 16(3), 380. doi: 10.3390/w16030380
- Melton, M. (1957) An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties and Geomorphology. Department of Geology, Columbia University, Technical Report, 11, Project NR 389-042. Office of Navy Research, New York.
- Melton, M. A. (1958). Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *The Journal of Geology*, 66(4), 442-460. doi: 10.1086/626527
- Merz, R., & Blöschl, G. (2008). Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44(8). doi: 10.1029/2007WR006744
- Moglen, G. E., Eltahir, E. A., & Bras, R. L. (1998). On the sensitivity of drainage density to climate change. *Water Resources Research*, 34(4), 855-862. doi: 10.1029/97WR02709
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1988). Where do channels begin? *Nature*, 336(6196), 232. doi: 10.1038/336232a0
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*, 25(8), 1907-1918. doi: 10.1029/WR025i008p01907
- Nguyen, K. A., & Chen, W. (2021). DEM-and GIS-based analysis of soil erosion depth using machine learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(07), 452. doi: 10.3390/ijgi10070452
- Odoh, B. I., & Nwokeabia, C. N. (2024). Impact of Drainage Density and Geological Factors on Flood Risk: A Comprehensive Study of Abia State. *Researchers Journal of Science and Technology*, 4(5), 1-21.
- Oguchi, T. (1997). Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(2), 107-120. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199702)22:2%3C107::AID-ESP680%3E3.0.CO;2-U
- Pallard, B., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). A look at the links between drainage density and flood statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1019-1029. doi: 10.5194/hess-13-1019-2009
- Pande, C., Moharir, K., & Pande, R. (2021). Assessment of morphometric and hypsometric study for watershed development using spatial technology—a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *International Journal of River Basin Management*, 19(1), 43-53. doi: 10.1080/15715124.2018.1505737
- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 7, 217-232. doi: 10.1007/s13201-014-0238-y
- Rinaldo, A., Dietrich, W. E., Rigon, R., Vogel, G. K., & Rodriguez-Iturbe, I. (1995). Geomorphological signatures of varying climate. *Nature*, 374(6523), 632. doi: 10.1038/374632a0
- Ruhe, R. V. (1952). Topographic discontinuities of the Des Moines lobe. *American Journal of Science*, 250(1), 46-56.
- Sajadi, P. (2018). Modeling of Qorveh-Dehgolan basin (Kurdistan-Iran) response to hydrological variability. Ph.D. Thesis, Jawaharlal Nehru University, New Delhi, New Delhi-110067, India.

- Sajadi, P., Singh, A., Mukherjee, S., & Chapi, K. (2020). Influence of structural lineaments on drainage morphometry in Qorveh-Dehgolan basin, Kurdistan, Iran. *Geocarto International*, 35(15), 1722-1749. doi: 10.1080/10106049.2019.1573927
- Sajadi, P., Singh, A., Mukherjee, S., Luo, P., Chapi, K., & Salari, M. (2021). Multivariate statistical analysis of relationship between tectonic activity and drainage behavior in Qorveh-Dehgolan basin Kurdistan, Iran. *Geocarto International*, 36(5), 540-562. doi: 10.1080/10106049.2019.1611948
- Sajadi, P., Singh, A., Mukherjee, S., Sang, Y. F., Chapi, K., & Salari, M. (2022). Drainage network extraction and morphometric analysis in an Iranian basin using integrating factor analysis and geospatial techniques. *Geocarto International*, 37(3), 896-925. doi: 10.1080/10106049.2020.1750060
- Salvi, S., Tiwari, H., & Bobade, S. (2025). Morphometric evaluation of Manjara watershed, Latur district, Maharashtra, India: a GIS approach. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(3), 106. doi: 10.1007/s41062-025-01862-w
- Sangireddy, H., Carothers, R. A., Stark, C. P., & Passalacqua, P. (2016). Controls of climate, topography, vegetation, and lithology on drainage density extracted from high resolution topography data. *Journal of Hydrology*, 537, 271-282. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.051
- Sarkar, P., Kumar, P., Vishwakarma, D. K., Ashok, A., Elbeltagi, A., Gupta, S., & Kuriqi, A. (2022). Watershed prioritization using morphometric analysis by MCDM approaches. *Ecological Informatics*, 70, 101763. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101763
- Shahabedini, S., Ghahramany, L., Pulido, F., Khosravi, S., & Moreno, G. (2018). Estimating leaf biomass of pollarded lebanon oak in open silvopastoral systems using allometric equations. *Trees*, 32, 99-108. doi: 10.1007/s00468-017-1614-7
- Sheng, T. C. (1990). *Watershed management field manual*. Watershed survey and planning (No. 13/6), FAO, Rome, Italy.
- Singh, C. K. (2018). *Geospatial applications for natural resources management*. 1st Edition; CRC Press. 309 pages.
- Smirnov, N. (1948). Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *The annals of mathematical statistics*, 19(2), 279-281. doi: 10.1214/aoms/1177730256
- Smith, K. G. (1958). Erosional processes and landforms in badlands national monument, South Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 69(8), 975-1008. doi: 10.1130/0016-7606(1958)69[975: EPALIB]2.0.CO;2
- Smith, V. B., David, C. H., Cardenas, M. B., & Yang, Z. L. (2013). Climate, river network, and vegetation cover relationships across a climate gradient and their potential for predicting effects of decadal-scale climate change. *Journal of Hydrology*, 488, 101-109. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.050
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142. doi: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117: HAAOET]2.0.CO;2
- Strahler, A. (1964) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. Pp. 439-476, In: Chow V (ed). *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Sukristiyanti, S., Maria, R., & Lestiana, H. (2018). Watershed-based morphometric analysis: a review, Global Colloquium on GeoSciences and Engineering, 18-19 October 2017, Bandung, Indonesia. doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012028/meta
- Tabatabaei, M., & Ghasriani, F. (1992). Natural resources of Kurdistan (Forests and Rangelands). 1st Edition; Jahad-e-Daneshgahi publishing office, 767 pages. [In Persian]
- Talling, P. J., & Sowter, M. J. (1999). Drainage density on progressively tilted surfaces with different gradients, Wheeler Ridge, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9), 809-824. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<809: AID-ESP13>3.0.CO;2-R
- Tanaka, S. (1957). The drainage-density and rocks (Granitic and Paleozoic) in the Setouchi sea coast region, Western Japan. *Geographical Review of Japan*, 30(7), 564-578.
- Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2023). Assessment and analysis of morphometric characteristics of Lake Tana sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *International Journal of River Basin Management*, 21(2), 195-209. doi: 10.1080/15715124.2021.1938091
- Thurow, T. L., & Juo, A. S. (1995). The rationale for using a watershed as the basis for planning and development. Pp. 93-116. In: Anthony S R Juo and Russell D Freed (eds). *Agriculture and the environment: Bridging food production and environmental protection in developing countries*, ASA Special Publications. doi: 10.2134/asaspecpub60.c6
- Tokunaga, E. (1978). Consideration on the composition of drainage networks and their evolution. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, (13), 1-27.
- Torre Franca, I., & Otadoy, R. E. (2024). GIS-based watershed characterization and morphometric analysis in Bohol Watersheds, Philippines. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 8(4), 527-538. doi: 10.1080/24749508.2022.2158554
- Tucker, G. E., & Bras, R. L. (1998). Hillslope processes, drainage density, and landscape

- morphology. *Water Resources Research*, 34(10), 2751-2764. <https://doi.org/10.1029/98WR01474>
- Tucker, G. E., & Slingerland, R. (1997). Drainage basin responses to climate change. *Water Resources Research*, 33(8), 2031-2047. doi: 10.1029/97WR00409
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., & Bras, R. L. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36(3-4), 187-202. doi: 10.1016/S0169-555X(00)00056-8
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 99-114.
- Waikar, M. L., & Nilawar, A. P. (2014). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2(2014), 179-184.
- Wilson, L. (1971). Drainage density, length ratios, and lithology in a glaciated area of southern Connecticut. *Geological Society of America Bulletin*, 82(10), 2955-2956. doi: 10.1130/0016-7606(1971)82[2955:DDLRLAL]2.0.CO;2
- Zhao, R., Arabameri, A., & Santosh, M. (2024). Land subsidence susceptibility mapping: a new approach to improve decision stump classification (DSC) performance and combine it with four machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 15443-15466. doi: 10.1007/s11356-024-32075-w
- Zinke, P. J. (1960). Photo Interpretation in Hydrology and Watershed Management. Pp. 539-560. In: *Manual of Photographic Interpretation*. American Society of Photogrammetry.