

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.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



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; Torre Franca 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 زیرحوزه‌های یک حوزه آبخیز اصلی در مبارزه با فرسایش هم مورد استفاده عملی و کاربردی قرار گرفته

². Drainage density

¹. Watersheds

است (Gajbhiye et al., 2014). اخیراً عامل تراکم زهکشی در اکثر مطالعات بررسی مخاطرات طبیعی حوزه‌های آبخیز از جمله سیل‌خیزی (Azadtalab et al., 2020; Ahmadi et al., 2023)، زمین‌لغزش (Mandal et al., 2021; Mao et al., 2024)، فرسایش خاک (Nguyen and Chen, 2021; Avand et al., 2023)، افت آب‌های زیرزمینی (Jaafarzadeh et al., 2021; Arabameri et al., 2023) و فرونشست زمین (Kumar et al., 2023; Zhao et al., 2024) به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار مهم در مدل‌سازی مکانی مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل محکمی برای اهمیت آن است.

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، تراکم زهکشی یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار در مطالعات متعدد و متنوع مربوط به مدیریت حوزه‌های آبخیز است. برای شناخت بهتر این عامل، لازم و ضروری است که تأثیرپذیری آن را از عوامل مختلف هم بررسی نمود. محققین متعددی عوامل کنترل‌کننده تراکم زهکشی را بررسی نموده و نشان داده‌اند 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; Melton, 1958; Collins and Bras, 2010; Sangireddy et al., 2016; Tassew et al., 2023)، زمین‌شناسی سنگ بستر (Tanaka, 1957; Smith, 1958; Wilson, 1971; Kelson and Wells, 1989; Talling and Sowter, 1999; Lodes et al., 2024)، زمان (Tokunaga, 1978; Ruhe, 1952)، و فاکتورهای مورفومتری (Strahler, 1952; Montgomery and Dietrich, 1988; Montgomery and Dietrich, 1989; Oguchi, 1997; Waikar and Nilawar, 2014; Adhikari, 2020) رابطه داشته و از آن‌ها تأثیر می‌پذیرد.

در بین عوامل تأثیرگذار بر روی تراکم زهکشی، عامل اقلیم بیش‌تر 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 کرده‌اند که تغییرات بارش بر روی تراکم زهکشی حوزه‌های آبخیز تأثیر دارد اما این رابطه یک رابطه ساده و مستقیم نیست (Horton, 1945)؛ یعنی تراکم زهکشی فقط تابع ساده‌ای از بارندگی نیست بلکه بیان‌کننده روابط متقابل بین اقلیم، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی است (Strahler, 1964). Melton (1957) با مطالعه بر روی ۸۰ حوزه آبخیز با اقلیم‌های 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، به‌طوری که وقتی مقدار بارش از یک آستانه

خاصی (در مورد سریلانکا مقدار ۱۲۷۰ تا ۱۵۲۰ میلی‌متر در سال) عبور می‌کند، بارش بیش‌تر موجب افزایش پوشش گیاهی بیش‌تر نمی‌شود 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 بارش‌های ۲۸۰ میلی‌متر حداکثر و در مناطق با بارش‌های ۱۰۰۰ میلی‌متر حداقل است و با افزایش بارش از ۱۰۰۰ میلی‌متر و کاهش از ۲۸۰ میلی‌متر، مقدار تراکم زهکشی کم می‌شود. تراکم زهکشی معمولاً در مناطق خشک با پوشش گیاهی کم، بیش‌تر است و با افزایش احتمال بارش‌های سنگین، زیاده‌تر می‌شود (Gregory, 1976) و هم‌چنین در مناطقی که دارای عکس‌العمل‌های هیدرولوژیکی سریع هم هستند، زیاد است (Melton, 1957). Gregory and Gradiner (1975) به‌عنوان شاخص اقلیم استفاده کردند، تغییرپذیری زیادی را در تراکم زهکشی در رژیم‌های اقلیمی خشک مشاهده نمودند و نتیجه گرفتند که هر چه اقلیم مرطوب‌تر باشد، میزان این تغییرپذیری کم‌تر خواهد شد. آن‌ها سه نوع رفتار متفاوت را برای تغییرپذیری تراکم زهکشی پیشنهاد نمودند بدین صورت که در بارش‌های متوسط سالانه کم‌تر از ۵۰۰ میلی‌متر، تراکم زهکشی با افزایش بارش، زیاد می‌شود؛ در بارش‌های ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر با افزایش بارش، تراکم زهکشی کم می‌شود و در بارش‌های بیش‌تر از ۱۰۰۰ میلی‌متر، تراکم زهکشی با بارش رابطه مثبت ضعیفی برقرار می‌کند. 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 کرده‌اند که حداکثر تراکم زهکشی در دوره‌های مرطوب اتفاق می‌افتد که تنش برشی فرسایش پایین است و برعکس در دوره‌های خشک که تنش برشی فرسایش زیاد است، تراکم زهکشی حداقل است. Moglen et al. (1998) نتیجه گرفتند که در شرایط بیابانی و نیمه‌بیابانی با بارش سالانه مؤثر کم‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر، تراکم زهکشی با افزایش بارش زیاد می‌شود ولی در شرایط اقلیمی مرطوب با بارش سالانه مؤثر بیش‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر، مقدار تراکم زهکشی با افزایش بارش کم می‌شود.

شناخت رابطه تراکم زهکشی و اقلیم اولاً در تعیین حساسیت منابع آب به تغییر اقلیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، دوماً مشخص می‌کند که انتخاب این شاخص برای بررسی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی چقدر به واقعیت نزدیک است و سوماً تعیین می‌کند که آیا در اقلیم‌های مختلف، مقدار تراکم زهکشی تفاوت معنی‌دار دارد که لازم باشد این تغییرات در بررسی پتانسیل سیل‌خیزی، زمین‌لغزش و فرسایش خاک در نظر گرفته شوند. تعیین رابطه بین

تراکم زهکشی و بارش یک منطقه از دیدگاه هیدرولوژی، 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 مورفومتریکی 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 $34^{\circ}/44'$ 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

سمت غرب کشور وارد این منطقه می‌شوند (Kurdistan Meteorological Bureau, 2024). بیشتر گستره استان از دیدگاه زمین‌شناسی در دو زون ایران مرکزی و سندج-سیرجان قرار دارد و تنها بخش کوچکی از آن در جنوب در زون رانده‌شده 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 سندج، 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 به‌صورت 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 راندمان کم و مراتع تخریب شده تبدیل می‌شود (Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, 2024b).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کردستان بر روی نقشه ایران

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

۲-۲- جمع آوری داده ها و اطلاعات

داده های اقلیمی در این مطالعه شامل بارش (بر حسب میلی متر) و دمای هوا (بر حسب درجه سانتی گراد) 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 حوزه های آبخیز استان

کردستان، از نقشه های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری 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 آبراهه های 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	Saqez
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

۳-۲- طبقه بندی اقلیمی استان کردستان

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

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

که در آن، PCP ، بارش متوسط سالانه به میلی متر و T ، میانگین دمای سالانه هوا بر حسب درجه سانتی گراد است. بر اساس ضریب خشکی دومارتن، تیپ اقلیمی ایستگاه های 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)

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).

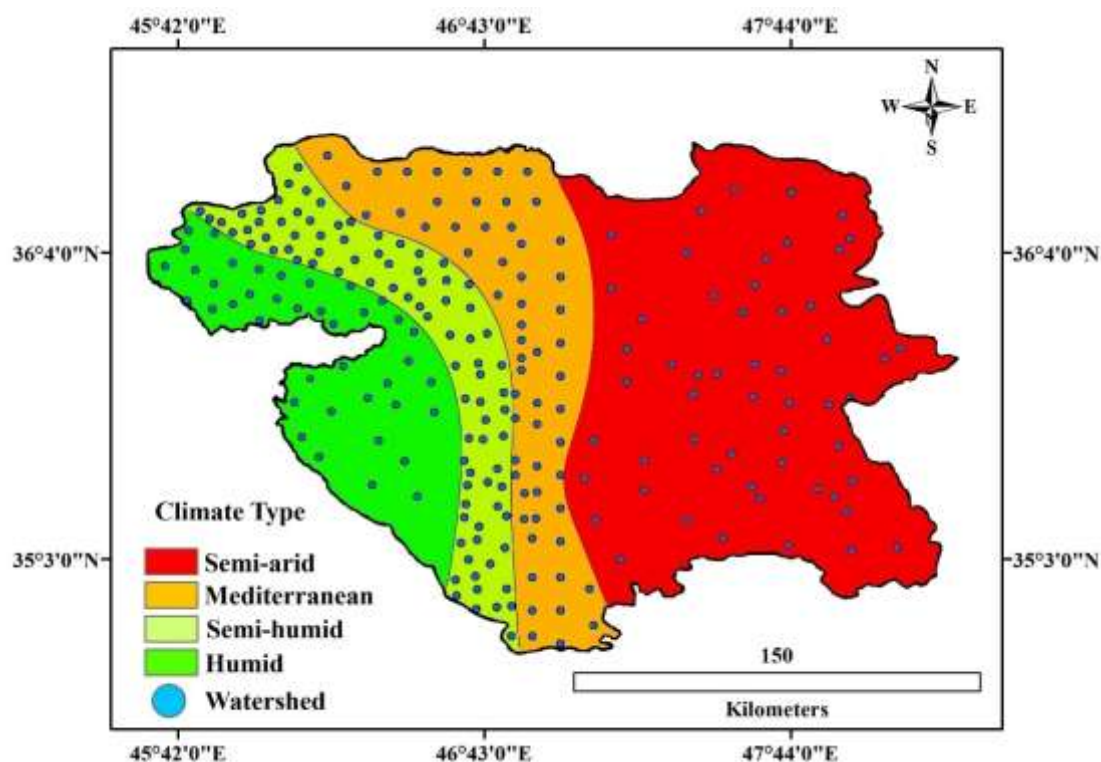
۲-۶- روش کار

ابتدا نقشه طبقه‌بندی اقلیمی استان کردستان با مطالعه پارامترهای دمای متوسط سالانه و بارش متوسط سالانه در ۸ ایستگاه سینوپتیک سندج، مریوان، بیجار، سقز، قروه، زربنه، 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، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک بود که نقشه آن‌ها در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

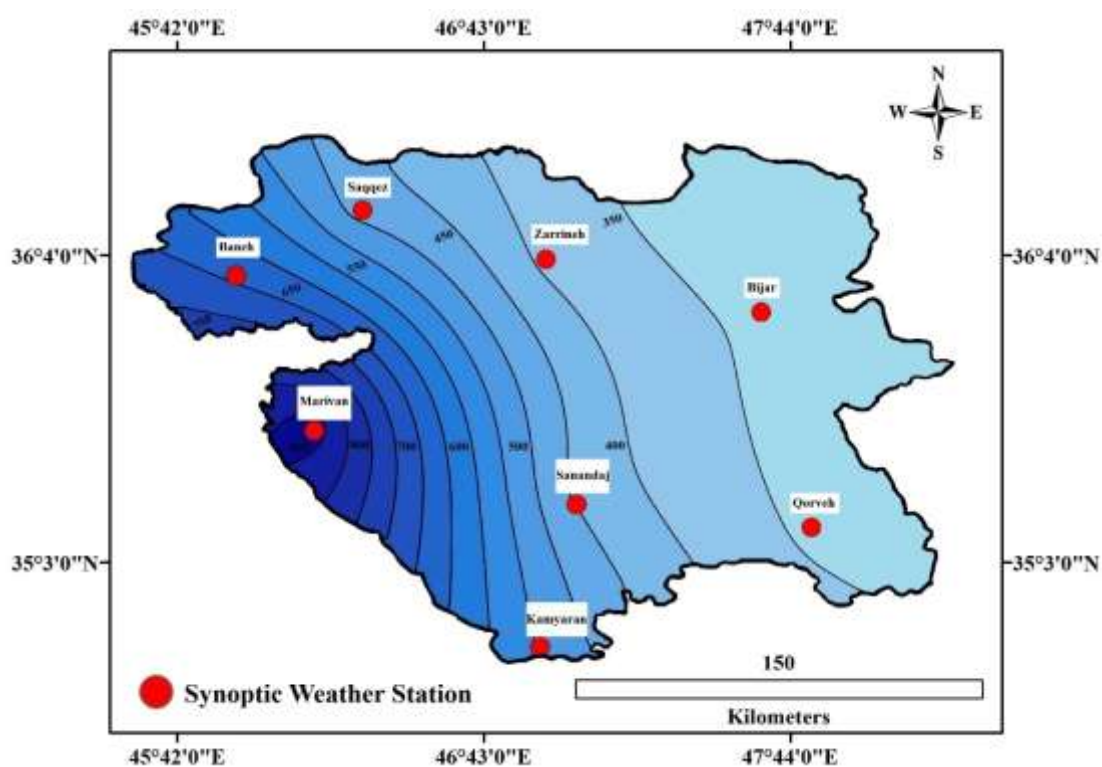
چون تعیین مقدار تراکم زهکشی در حوزه‌های آبخیز بزرگ کار سختی است و همواره با خطای زیادی مواجه است، پیشنهاد شده است که مطالعه تراکم زهکشی در حوزه‌های آبخیز کوچک و متوسط انجام پذیرد تا خطای کم‌تری ایجاد شود (Tucker et

al., 2001; Di Lazzaro et al., 2014). 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 به‌طوری که در اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک به‌ترتیب 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 به‌صورت 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، مدل‌سازی شد و بهترین مدل برازش‌یافته از بین تمامی توابع ریاضی و آماری پیشنهادی توسط نرم‌افزار SPSS با استفاده از شاخص‌های مناسب، انتخاب شد. سطح خطای مدل‌سازی‌های انجام‌شده کم‌تر از ۰/۰۱ (سطح معنی‌داری ۹۹/۹ درصد) در نظر گرفته شد. نمودار جریانی روش تحقیق این مطالعه در شکل شماره ۴ ترسیم شده است.

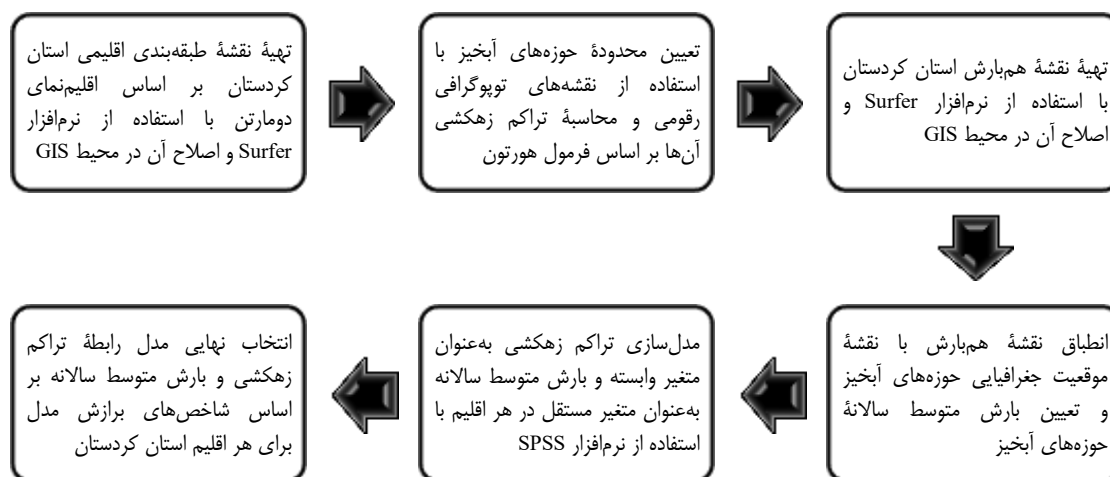
^۱. Standard error of the estimate (σ_{est})



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 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



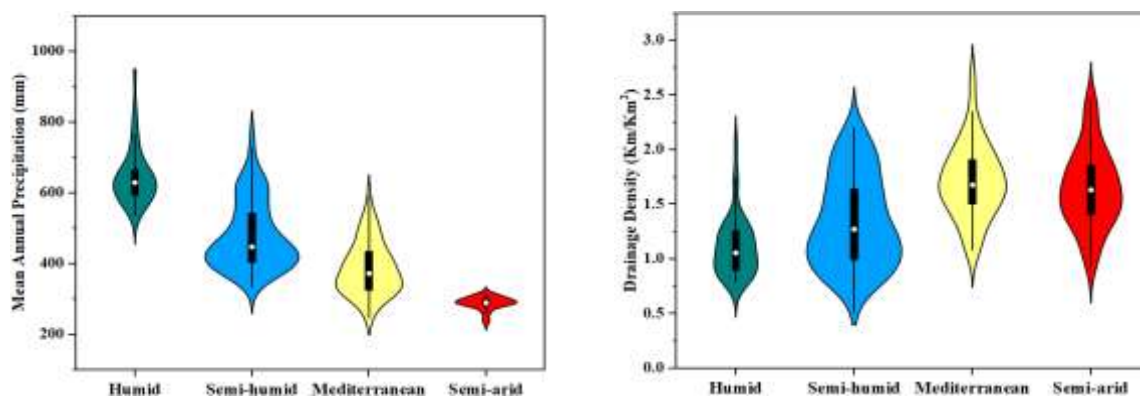
شکل ۴- نمودار جریان‌ی مدل‌سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه در اقلیم‌های مختلف استان کردستان
Figure 4- Study flowchart of drainage density modeling based on mean annual precipitation in different climates of Kurdistan province

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 نرمال‌بودن کولموگوروف-اسمیرنوف برای داده‌های تراکم زهکشی و بارش متوسط سالانه اقلیم‌های مختلف قبل و بعد از نرمال‌سازی در سطح معنی‌داری 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 می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌ترین تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم نیمه‌مرطوب بوده که خود این اقلیم دارای بیش‌ترین تغییرات بارش بوده است ولی کم‌ترین تغییرات تراکم زهکشی مربوط به اقلیم مرطوب است در حالی که این اقلیم دارای کم‌ترین تغییرات بارش نبوده است. این نتایج تأییدی بر گفته‌های Horton (1945) و De Wit and Stankiewicz (2006) است که رابطه بین بارش و تراکم زهکشی را ساده و مستقیم نمی‌دانند و همچنین مؤید این گفته استرالر است که تراکم زهکشی تابع ساده‌ای از بارش نیست و در اقلیم مختلف رفتاری کاملاً متفاوت دارد (Strahler, 1964). نتایج هم‌چنین بیانگر این است که دامنه تغییرات تراکم زهکشی و دامنه تغییرات بارش در اقلیم نیمه‌مرطوب، بیش‌ترین مقدار خود را دارد ولی کم‌ترین دامنه تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم مرطوب بود در حالی که کم‌ترین دامنه تغییرات بارش در اقلیم نیمه‌خشک بوده است.

جدول ۴- خصوصیات تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف استان کردستان

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

Coefficient of Variation (%)	Standard Deviation	Drainage 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 اقلیم‌های 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 معنی‌دار دارند. مقایسه میانگین تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف به روش Tukey (1949) ثابت کرد (جدول ۷) که میانگین تراکم زهکشی فقط در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک با هم تفاوت معنی‌دار (سطح احتمال ۵ درصد) ندارند،

۳-۲- وضعیت تراکم زهکشی و بارش استان کردستان

نتایج تجزیه و تحلیل توصیفی تراکم زهکشی و داده‌های بارش متوسط سالانه در جداول شماره ۴ و ۵ آمده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، اقلیم مدیترانه‌ای با متوسط تراکم زهکشی ۱/۷۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع و اقلیم مرطوب با متوسط تراکم زهکشی ۱/۱۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع به‌ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین تراکم زهکشی در استان کردستان بوده‌اند که این مسأله را می‌توان به تخریب بی‌رویه پوشش گیاهی در اقلیم مدیترانه‌ای و وجود پوشش گیاهی نسبتاً مناسب در اقلیم مرطوب نسبت داد. بیش‌ترین تراکم زهکشی در اقلیمی اتفاق افتاده است که کم‌ترین ضریب تغییرات تراکم زهکشی (۱۹/۹ درصد) را دارد و بیش‌ترین ضریب تغییرات بارش متوسط سالانه (۲۱/۹ درصد) را دارد. کم‌ترین تراکم زهکشی در اقلیمی اتفاق افتاده است که دارای ضریب تغییرات تراکم زهکشی زیاد (نه حداکثر) بوده ولی کم‌ترین ضریب تغییرات بارش متوسط سالانه

۳-۳- تجزیه و تحلیل آماری تراکم زهکشی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۶) نشان داد که نوع تیپ اقلیمی اثر معنی‌داری (سطح خطای ۰/۰۰۰۱) بر روی تراکم زهکشی دارد یعنی مقادیر تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف با

در سایر اقلیم، تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های تراکم زهکشی دیده می‌شود (شکل ۶).

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

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

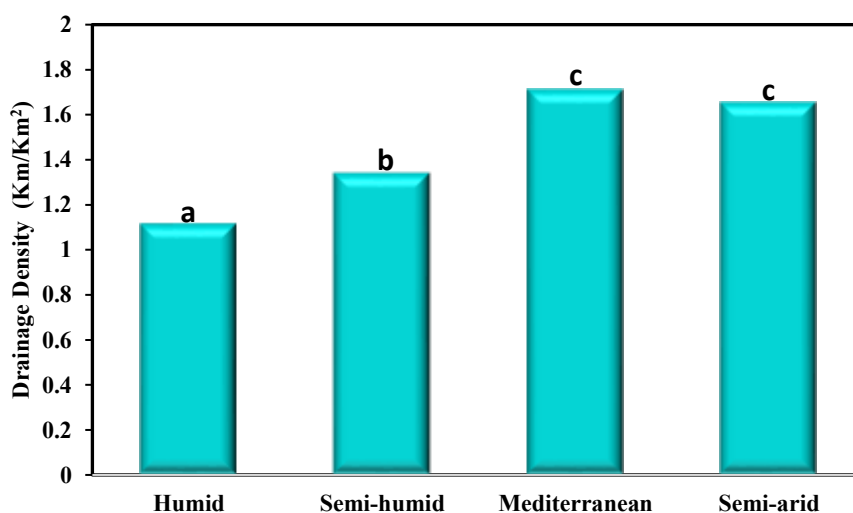
P value	Calculated F	Mean of Squares (MS)	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (df)	Source of Variation (SOV)
0.0001	29.985	4.028 0.134	12.084 32.509	3 242	Between Climates Within Climate (Error)
			44.593	245	Total

جدول ۷- مقایسه میانگین تراکم زهکشی در اقلیم‌های 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

* معنی‌دار در سطح خطای ۵ درصد؛ n.s غیر معنی‌دار



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های تراکم زهکشی در اقلیم‌های مختلف استان کردستان

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

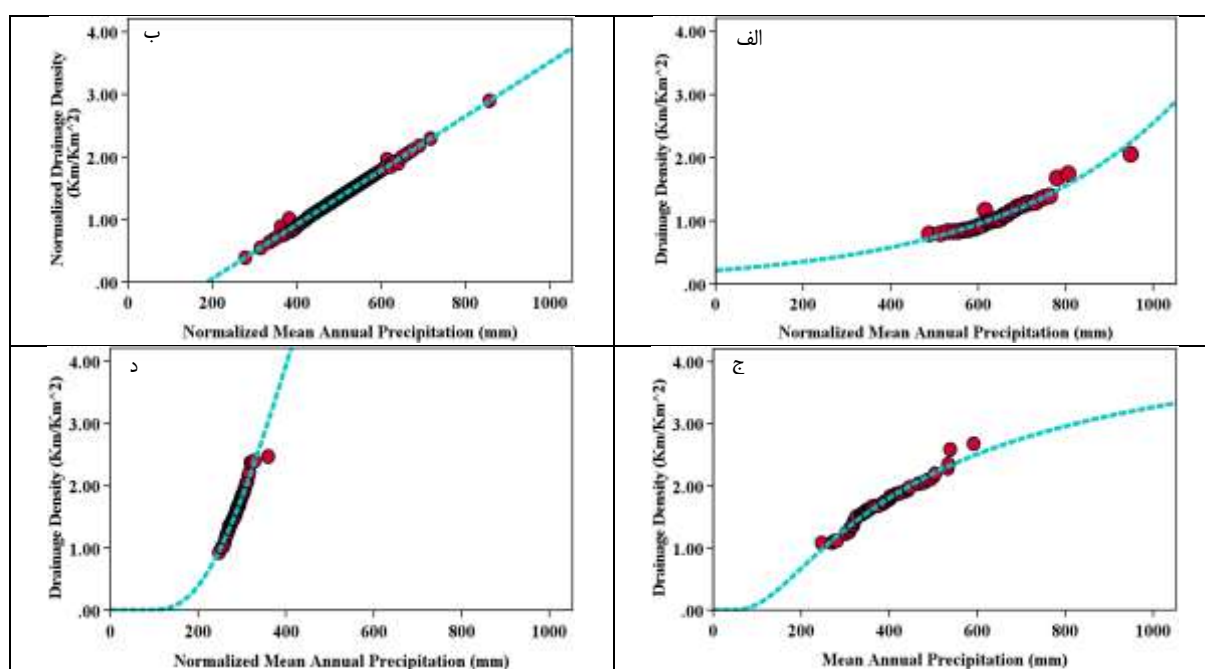
هستند؛ بدین معنی که همه مدل‌ها دارای اعتبار لازم می‌باشند. به‌منظور انتخاب بهترین مدل برازش‌یافته به رابطه تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه در اقلیم مختلف، شاخص‌های زیادی به کار گرفته شد که در بخش مواد و روش‌ها معرفی شدند و در جداول ۸ تا ۱۱ مقادیر آن‌ها آمده است. در اقلیم مرطوب، بهترین مدل برازش‌یافته به رابطه تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه، مدل‌های ترکیبی، رشد، نمایی و لجستیک بودند که از لحاظ تمامی شاخص‌های انتخاب مدل یکسان بودند، ولی با توجه به مرسوم‌تر بودن مدل نمایی، نهایتاً مدل نمایی پیشنهاد شد (جدول

۳-۴- مدل‌سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه

به‌منظور مدل‌سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه، در هر تیپ اقلیمی، تمامی مدل‌های آماری و ریاضی ممکن پیشنهادی توسط نرم‌افزار SPSS (۱۱ مدل) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج (شکل ۷) نشان می‌دهند که رفتار تراکم زهکشی حوزه‌های آبخیز در اقلیم‌های مختلف استان کردستان متفاوت است و با توجه به مقادیر P آزمون در جداول ۸ تا ۱۱، تمامی مدل‌های آزمون‌شده در سطح خطای ۰/۰۰۱ معنی‌دار

خطای استاندارد تخمین و آماره F این مدل از سایر مدل‌ها بهتر بود هر چند که ضرایب همبستگی، تبیین و تبیین تعدیل‌شده آن با ضرایب مشابه مدل‌های درجه دوم و سوم یکسان بودند (جدول ۱۰ و شکل ۷ ج). در اقلیم نیمه‌خشک، مدل سیگموئید از نظر تمامی شاخص‌های انتخاب مدل عملکرد بهتری داشت و بنابراین به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد (جدول ۱۱ و شکل ۷ د). توابع ریاضی مدل‌های معرفی‌شده به تفکیک اقلیمی در جدول شماره ۱۲ ارائه شده‌اند.

۸ و شکل ۷ الف). در اقلیم نیمه‌مرطوب، بهترین مدل، مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم بودند چون دارای معیار اطلاعات آکائیکه، ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌شده یکسان بودند، اما چون خطای استاندارد تخمین مدل خطی کمتر و آماره F آن، بیش‌تر از توابع درجه دوم و درجه سوم بود، در نهایت مدل خطی پیشنهاد شد (جدول ۹ و شکل ۷ ب). در اقلیم مدیترانه‌ای، مدل سیگموئید^۱ (S-shaped Curve) به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد، چون شاخص‌های آکائیکه،



شکل ۷- مدل‌سازی تراکم زهکشی بر اساس بارش متوسط سالانه حوزه‌های آبخیز استان کردستان در الف) اقلیم مرطوب، ب) اقلیم نیمه‌مرطوب، ج) اقلیم مدیترانه‌ای و د) اقلیم نیمه‌خشک

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- شاخص‌های مختلف ارزیابی مدل‌سازی 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	$D_d = e^{\left(1.580 - \frac{395.802}{P}\right)}$	Sigmoid
Semi-arid	$D_d = e^{\left(3.680 - \frac{924.680}{P}\right)}$	Sigmoid

2018) کاملاً انطباق دارد زیرا تکامل سیستم آبراهه ای حوزه های
آبخیز کردستان تحت کنترل اقلیم بوده است و دوماً هر اقلیم باعث
رفتار متفاوتی می شود، به طوری که میزان تأثیرگذاری اقلیم در

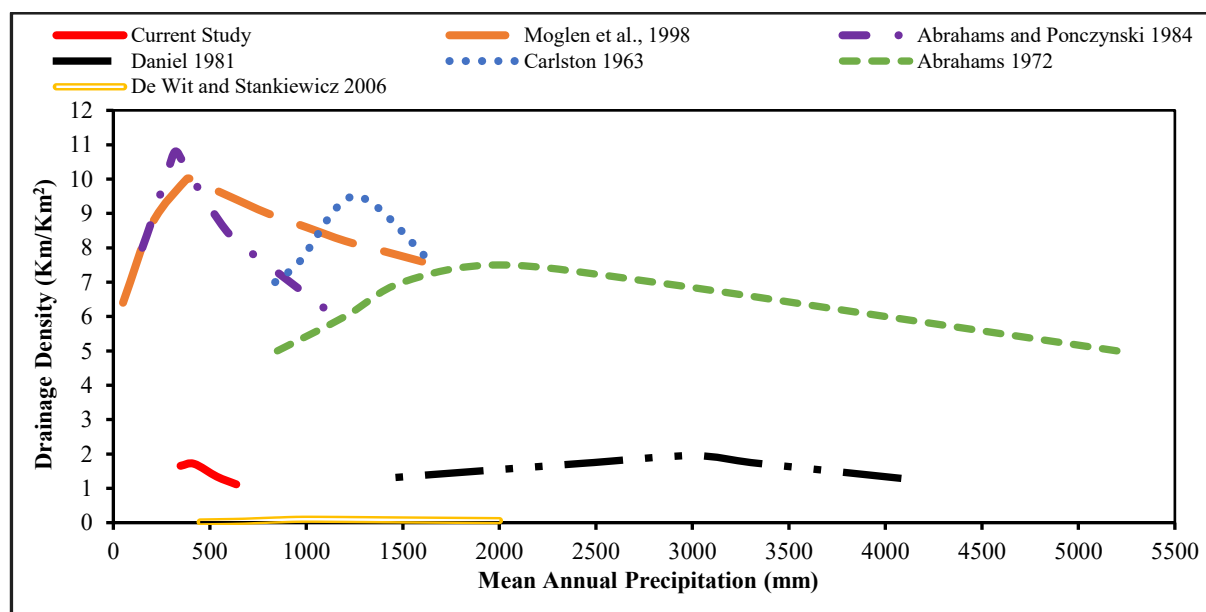
این نتایج بیانگر این واقعیت است که اولاً اقلیم (بارش) نقش
کنترل کنندگی بسیار بالایی در تراکم زهکشی حوزه های آبخیز
استان کردستان دارد که این با یافته های سجادی (Sajadi,

تراکم زهکشی متفاوت است و این نتیجه با یافته‌های Horton (1945)، Strahler (1964) و Lujendijk (2022) 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 میلی‌متر اتفاق می‌افتد. این بارش به عنوان بارش معرف برای ارزیابی تراکم زهکشی در استان کردستان معرفی می‌شود، بدین معنی که هر چه بارش از این مقدار بیش‌تر یا کم‌تر شود، مقدار تراکم زهکشی کم‌تر می‌شود. روند تغییرات تراکم زهکشی حوزه‌های آبخیز استان کردستان با روند تغییرات تراکم زهکشی در اقلیم نیمه‌خشک ایالات متحده آمریکا مشابهت دارد چون Abrahams and Ponczynski (1984) و Moglen et al. (1998) ثابت کرده‌اند که این روند در ایالات متحده حاکم است فقط با این تفاوت که در بعضی ایالات، بارش معرف ۴۵۰ میلی‌متر است و در بعضی ایالات دیگر ۲۸۰ میلی‌متر است، بدین معنی که تراکم زهکشی در این بارش‌ها حداکثر و با کاهش و یا افزایش این مقدار، کم

می‌شود (شکل ۸). روند تغییرات تراکم زهکشی با بارش در اقلیم نیمه‌مرطوب و مرطوب هم از الگوی اقلیم خشک و نیمه‌خشک پیروی می‌کند. Gregory and Gardiner (1975) و Gregory (1976) اظهار کرده‌اند که حداکثر تراکم زهکشی در بارش سالانه ۵۰۰ میلی‌متر (اقلیم نیمه‌مرطوب) اتفاق می‌افتد و در بارش‌های کم‌تر و بیش‌تر از این حد، تراکم زهکشی کم می‌شود. در اقلیم مرطوب، مطالعات (Carlston 1963)، Abrahams and Ponczynski (1984)، Daniel (1981) و (Shankar et al. 2016) نشان داده است که تراکم زهکشی با بارش تغییر می‌کند، به‌طوری که مقدار آن در بارش‌های به‌ترتیب ۱۲۵۰، ۳۰۰۰، ۲۸۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متری به حداکثر می‌رسد و با افزایش و کاهش بارش از این میزان، مقدار تراکم زهکشی کاهش می‌یابد. الگوی تغییرات تراکم زهکشی با بارش متوسط سالانه در قاره آفریقا هم مشابه با اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک سایر مناطق دنیا بوده با این تفاوت که مقادیر تراکم زهکشی بسیار کم‌تر است و حداکثر آن در بارش ۱۰۰۰ میلی‌متری اتفاق می‌افتد (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- نتیجه‌گیری

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

معنی‌داری بر روی تراکم زهکشی حوزه‌های آبخیز دارد، به‌طوری که در هر اقلیم، رابطه بین تراکم زهکشی و مقدار بارش دارای رفتار منحصر به فردی بوده و متفاوت است. تنها در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب، 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 بدین‌وسیله تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها 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 به‌صورت زیر است:
کامران چپی: مجری طرح پژوهشی، طرح موضوع پژوهش و روش تحقیق، نظارت بر روند اجرای تحقیق، تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، تهیه پیش‌نویس مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله؛ شمیم فیضی: تجزیه و تحلیل داده‌ها و استخراج نتایج؛ زانیا فاتحی: تهیه و تنظیم نقشه‌ها، نظارت بر تجزیه و تحلیل داده‌ها.

منابع

- آزادطلب، مهناز، شهابی، هیمین، شیرزادی، عطاله، و چپی، کامران (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر سنندج با استفاده از مدل‌های 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). ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک. اقتباس از سایت اداره کل هواشناسی کردستان.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کردستان (۱۳۹۷). بازنگری 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 (۱۴۰۳الف). سیمای خاک‌های 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 (۱۴۰۳ب). منابع طبیعی استان کردستان. اقتباس از سایت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان.

که آن هم به‌دلیل پوشش گیاهی متراکم است که بارش بیش‌تر باعث افزایش بیش‌تر پوشش گیاهی نمی‌شود و در نتیجه این رفتار حاصل می‌شود. هم‌چنین ثابت شد که حداکثر تراکم زهکشی در بارش متوسط سالانه ۴۰۰ میلی‌متر (اقلیم نیمه‌مرطوب) اتفاق می‌افتد. در بارش‌های کم‌تر از ۴۰۰ میلی‌متر (اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک) و بیش‌تر از ۴۰۰ میلی‌متر (اقلیم مرطوب)، با افزایش بارش، مقدار تراکم زهکشی کاهش یافته است. علت کاهش تراکم زهکشی در بارش‌های بالاتر و پایین‌تر از حد متوسط ۴۰۰ میلی‌متر را می‌توان به نقش پوشش گیاهی به‌عنوان یک فاکتور کنترل‌کننده تراکم زهکشی نسبت داد. در بارش‌های کم‌تر از ۴۰۰ میلی‌متر، علیرغم کاهش پوشش گیاهی (افزایش فرسایش‌پذیری)، اثر فرسایش‌پذیری بارش کم می‌شود، در حالی که در بارش‌های بیش‌تر از ۴۰۰ میلی‌متر، علیرغم افزایش اثر فرسایش‌پذیری بارش، به‌دلیل افزایش پوشش گیاهی (کاهش فرسایش‌پذیری) مقدار تراکم زهکشی کاهش می‌یابد. پوشش گیاهی هم باعث افزایش مقاومت سطحی و هم باعث افزایش انتقال‌دهی (ترانسمیسویتی) می‌شود که افزایش این دو عامل باعث کاهش تراکم زهکشی می‌شود. هم‌چنین تشدید هوازدگی در اقلیم‌های مرطوب باعث افزایش ضخامت رگولیت می‌شود که خود این عامل منجر به افزایش انتقال‌دهی و کاهش تراکم زهکشی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک، تغییرات تراکم زهکشی تحت کنترل بارش و در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب 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 می‌تواند در مطالعات تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب و سایر مخاطرات طبیعی مانند مدل‌سازی سیلاب، زمین‌لغزش، فرسایش خاک و مکان‌یابی آب‌های زیرزمینی با اطمینان کامل مورد استفاده قرار بگیرد، ولی لازم است در به‌کارگیری آن در اقلیم‌های مختلف، تغییرات آن را مد نظر قرار داد. این نوع مطالعات می‌توانند کمک شایانی به برنامه‌ریزان حوزه‌های آبخیز نمایند تا در طرح‌های کاربردی و آمایش سرزمین مناطق مختلف از آن‌ها 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 ۳۹۲۲۹/۲/۹/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'aridité. *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. *Boletín Geológico 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 für 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:DDLRL]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.