Analysis and Modeling of the Relationship between Monthly Discharge and Geomorphometric Characteristics (Case Study: Kashafrood Watershed)

Mousa Abedini [1] *, Fahimeh Pour Farrash Zadeh [2] , Mortaza Gharachorlu [3]

1- professor, Physical Geography Department, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, Iran

(*Corresponding Author Email: abedini@ma.ac.ir)

2- Ph.D. student of geomorphology, Physical Geography Department, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, Iran

3- Ph.D. of geomorphology, Physical Geography Department, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, Iran

Extended abstract:

1. Introduction

Predicting and obtaining information about stream flows is vital for many practical applications such as water allocation, long-term planning, catchment management operation, flood forecasting, optimization of hydropower production, designing hydraulic structures, and so on. On these accounts, experts have always attempted to accurately estimate river flows and provide contributions to the existing methods. It is possible to establish a relationship between discharges of catchments based on sufficient statistics and their geometry characteristics by using regional analysis and multivariate regression in a relatively homogeneous region in order to estimate discharges of the catchments without statistics or with insufficient statistics in that region. Owing to the need for a better modeling of water discharges in terms of seasonal variations, the present study tried to regionally estimate the monthly mean, minimum, and maximum discharges in Kashfarud Watershed based on geomorphometric variables in order to: (1) examine the possibility of scientific and useful generalization of surface water quantity in the whole watershed and (2) identify and determine important geomorphometric factors influencing the water discharge variations of Kashfarud sub-watersheds. Kashfarud as a vital flow in this region, including Mashhad plain, has played an important role in supplying water to the inhabitants of Mashhad metropolis and other surrounding cities such as Chenaran and Torqabeh. Besides, extensive engineering facilities, such as Golestan, Torogh, Kardeh, and Ardak dams, have been built on the tributaries of this river.

2. Methodology

The research was grounded upon statistical analysis, including correlation and regression tests. For this study, we made use of monthly average (low, medium, high) discharge data and resolution of 30-

m DEM. The discharge data were measured in 10-gauge stations of 10 sub-watersheds over 20 year (1997-2017). In this regard, we considered the monthly discharge values of 10 stations located in 10 sub-basins during the water years of 1997-2016. The research proceeded as follows: after selecting the common statistical period, we calculated the monthly average flows recorded in the stations over 20 years. Next, 2 months with the highest and lowest flows were selected in each station. Also, we considered the values of the two selected months besides the average monthly discharges in the stations (average of 12 months) as the dependent variables. Afterwards, we embarked upon to calculate the independent geomorphometric variables (16 variables), which were determined by using DEM in the GIS environment. The independent variables included perimeter, area, minimum elevation, average elevation, maximum elevation, elevation range, average slope, maximum slope, mii ttraam ll mii ttraam lgggt ttt ll ttraam lgggt rr ii ggg ssss ity mmmmm rgggssss index, Gravilius coefficient, elongation, and concentration time. After calculating the values of the 3 dependent and 16 independent variables for each station, we tested them based on a two-way correlation to find out which variables had a significant relationship by means of the correlation matrix. The significance level of the correlation relationships was ≤ 0.05. Finally, we presented an estimate model of the dependent variables via the independent variables. This was done based on the dependent and independent variables that had significant correlation relationships.

3. Discussion

The results of the correlation analysis showed no significant relationships between the minimum monthly discharges and the independent variables. This was probably due to the dryness condition and small variance in the low monthly discharge rates among the sub-watersheds. In contrast, significant relationships were obtained among the monthly mean and maximum discharges and 6 geomorphometric variables including the average elevation, maximum elevation, elevation range, average slope, drainage density, and roughness ratio. The correlation coefficients of all significant relationships were above 0.6, indicating a close and strong relationship between these variables. The direct correlation of altitude, slope, and roughness with monthly mean and maximum discharges indicated that on the one hand, the monthly discharges of the sub-watersheds were strongly dependent on the altitude variables dominating the other environmental factors while on the other hand, the roughness intensity and active dynamics associated with the variables of altitude played an important role in water flowing and transporting from upstream to downstream of the catchments so that the speed of hydrological responses of the catchments increased by the rise of roughness severity. In contrast, the negative correlation between the drainage density and the dependent variables was unexpected and probably associated with hydroclimatic conditions indicating characteristics of the dry

and geologic conditions, permeability of some formations, and presence of joints and fissures in the rocks. The predictive regression models of the monthly mean and maximum discharges had good accuracies and efficiencies and could explain 80 and 90% of variances of the monthly average and maximum discharges, respectively.

4. Conclusion

Modeling the spatial variations of discharges in watersheds requires consideration of hydrological limit values both daily and seasonally, along with normal and average values. By adopting such an approach, the present study aimed at modeling monthly water discharges in Kashfarud sub-watersheds based on geomorphometric variables. The multivariate regression analysis among the independent variables including the average and maximum monthly flows and 16 independent geomorphometric variables revealed that the regression models could be obtained through the variables of average elevation, maximum elevation, elevation range, average slope, drainage density, and roughness ratio. These factors could explain the major parts of variance of the independent variables. It is possible to generalize the monthly mean and maximum discharges achieved in this study to other sub-watersheds through the resulting models with respect to the low estimation errors and high accuracies. However, generalization the monthly minimum discharges is not possible due to the lack of a significant correlation between this variable and geomorphometric variables. It is necessary to estimate the monthly minimum discharges in Kashfarud Watershed by reconstructing and converting the data or extending other predictive models. Reliable estimations of low water discharges provide us with information about water supply for the environment and water quality management for sustainability of healthy ecosystems. Also, owing to the role of small mountain catchments in the occurrence of peak flows, prioritization of watershed management measures in such catchments is incumbent to reduce the risk of floods.

Keywords: correlation, discharge, geometric characteristics, Kashafrood, regression

References:

- Aryal, S. K., Zhang, Y., & Chiew, F. (2020). Enhanced low flow prediction for water and environmental management. *Journal of Hydrology*, 584: 124658.
- Besaw, L. E., Rizzo, D. M., Bierman, P. R., & Hackett, W. R. (2010). Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 386(1-4): 27-37.
- Georgakakos, A. P., Yao, H., & Georgakakos, K. P. (2014). Ensemble stream flow prediction adjustment for upstream water use and regulation. *Journal of Hydrology*, 519: 2952-2966.

- Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Forecasting daily stream flow for basins with different physical characteristics through data-driven methods. *Journal of Water Resources Management*, 32(10): 3405-3422.
- Mohamoud, Y. M. (2008). Prediction of daily flow duration curves and stream flow for ungauge catchments using regional flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4): 706-724.
- Swain, J. B., & Patra, K.C. (2017). Stream flow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology*, 554: 420-433.
- Wanders, N. and Wada, Y. (2015). Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 526: 208-220.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۲، پیاپی ۸۴، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۰، ص ٤٤- ۲۹
وصـول: ۱٤۰۰/۳/۷ پـذیرش: ۱٤۰۰/۷/۱۱

مقاله پژوهشی

تحلیل و مدل‌سازی روابط بین دبی ماهانه و خصوصیات ژئومورفومتری حوضه‌ها نمونهٔ پژوهش: حوضهٔ آبریز کشف‌رود

موسی عابدینی *، استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
abedini@ma.ac.ir
فهیمه پورفراش‌زاده، دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
pourfarrash@uma.ac.ir
مرتضی قراچورلو، دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
morchorloo@gmail.com

چکیده

مدل‌سازی جریان آب برای بسیاری از فعالیت‌ها مانند کنترل سیلاب یا خشکسالی و بهره‌برداری درست از منابع آب ضروری است. این پژوهش با هدف تحلیل و مدل‌سازی تغییرات مکانی دبی ماهانهٔ حوضه ها در ارتباط با تغییرات خصوصیات ژئومورفومتری آنها در حوضهٔ آبریز کشف رود واقع در استان خراسان رضوی انجام شد. کم و کیف این ارتباط با اجرای آزمون‌های همبستگی و رگرسیون چندمتغیره بین دبی‌های کمینه، بیشینه و متوسط ماهانه به‌عنوان متغیرهای وابسته و ۱٦ متغیر مستقل ژئومورفومتری شامل محیط، مساحت، ارتفاع حداکثر، ارتفاع حداقل، ارتفاع متوسط، دامنهٔ ارتفاعی، شیب حداکثر، شیب متوسط، شیب آبراههٔ اصلی، طول آبراههٔ اصلی، مجموع طول آبراهه ها، تراکم زهکشی، نسبت ناهمواری شیوم، ضریب گراویلیوس، کشیدگی و زمان تمرکز مشخص شد. سطح معناداری روابط، ۰/۰۵ و کمتر در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد روابط معناداری بین دبی کمینهٔ ماهانه و متغیرهای مستقل وجود ندارد که احتمالاً ناشی از وضعیت خشکی و تغییرات اندک دبی کم آبی در بین زیرحوضه‌هاست. درمقابل وجود روابط معنادار بین دبی‌های متوسط و بیشینهٔ ماهانه و شش متغیر ژئومورفومتری شامل ارتفاع حداکثر، ارتفاع متوسط، اختلاف ارتفاع، شیب متوسط، تراکم زهکشی و نسبت ناهمواری به ارائهٔ مدل‌های رگرسیونی از تغییرات مکانی دو متغیر وابسته انجامید. دو مدل حاصل از دقت و کارایی خوبی برخوردار و قادر به تبیین ۹۰ درصد واریانس دبی حداکثر ماهانه و ۸۰ درصد واریانس دبی متوسط ماهانه بودند. خصوصیات ارتفاعی و ناهمواری به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیات هندسی حوضه‌ها در تبیین تغییرات مکانی دبی ماهانه شناخته شدند. به‌علاوه برخلاف انتظار، رابطهٔ معناداری بین مساحت حوضه و دبی‌های میانگین و حدی ماهانه به دست نیامد.

واژه‌های کلیدی: دبی، خصوصیات هندسی، همبستگی، رگرسیون، کشف‌رود

*نویسنده مسؤول

2252- 0910/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses BY-NC-ND 4.0)

http://dx.doi.org/10.22108/gep.2021.128899.1426 20.1001.1.20085362.1400.32.4.2.9

۱. مقدمه

حوضه‌های آبریز، مجموعه‌های سازمندی به شمار می‌آیند که می‌توان آنها را اساسی‌ترین واحد طبیعی در مطالعات منطقه‌ای به شمار آورد. حوضه‌های رودخانه‌ای واحدهایی طبیعی هستند و در طول مسیر آنها منابع عمدهٔ آبی تکوین و تشکیل می‌شود، ذخیره‌کننده‌ها و سدها در مسیر همین گذرگاهها بنا می‌شوند و تأمین آب را به عهده دارند و نیروی هیدروالکتریک را نیز تدارک می‌بینند (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۹۰: ۲۳۳)؛ بنابراین نیروی حیات حوضه‌های آبریز به تغییرات مکانی و زمانی گذر آب در داخل آنها وابسته است. موضوع تغییرات آب‌دهی رودخانه‌ها با توجه به تغییرات اقلیمی اخیر و پیرو آن بروز رخدادهای حدی هیدرولوژیک در قالب خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها از یک سو و بهره‌برداری‌های انسانی نادرست و بی‌رویه از منابع آب حوضه‌های آبریز از سوی دیگر، به‌صورت یک چالش نگران‌کننده درآمده است. بی‌دلیل نیست که مسائل مربوط به بحران و مدیریت آب از دیدگاه سازمان ملل متحد پس از مشکل جمعیت، دومین مسئلهٔ اصلی جهان شناخته شده است (رشید سرخ‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۳: ۹۷). در همین زمینه مدل‌سازی وندرز[1] و وادا[2] (2015) از آثار تغییر اقلیم و انسان روی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی قرن حاضر نشان داد این آثار در آسیا، خاورمیانه و مدیترانه چشمگیرتر از سایر نقاط جهان است. شواهد موجود از بروز خشکسالی‌های اخیر و افت کمی و کیفی منابع آب به‌ویژه در قسمت‌های داخلی فلات ایران، لزوم توجه بیشتر به میزان آب‌دهی حوضه‌ها و آگاهی از تغییرات آن با رویکرد مدل‌سازی را گوشزد می‌کند.

پیش‌بینی و کسب اطلاعات دربارهٔ جریان رودها برای بسیاری از کاربردهای عملی مانند تخصیص آب، برنامه‌ریزی بلندمدت، عملیات مدیریت حوضه، پیش‌بینی سیلاب، بهینه‌سازی تولید برق آبی، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و... امری حیاتی است (Swain and Patra, 2017: 421)؛ از این رو متخصصان همواره برای تخمین درست دبی رودخانه و تدقیق روش‌های موجود تلاش می‌کنند.

تاکنون روابط و الگوهای گوناگون و پیچیده‌ای برای مدل‌سازی و برآورد میزان آبدهی رودخانه‌ها مانند انواع الگوهای مفهومی بارش- رواناب، الگوی سری زمانی و الگوهای ترکیبی (هیبرید) و روش‌های متنوع آماری ارائه شده است (نعیمی کلورزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۰۸). در این زمینه، استفاده از خصوصیات ژئومورفومتری حوضه در مدل‌سازی هیدرولوژی، یک رکن اساسی و کارآمد تلقی می‌شود (ولی و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۰). این واقعیت از آنجا نشئت می‌گیرد که پاسخ هیدرولوژیک به‌عنوان نمایه‌ای از چگونگی تبدیل بارش ورودی حوضه‌ها به‌صورت جریان رودخانه محسوب می‌شود (Mohamoud, 2008: 706) و این فرایند بارش- رواناب در داخل قالب و ساختار هندسی حوضهٔ آبخیز صورت می‌گیرد. این ساختار هندسی یا ژئومورفیک از عناصری چون مساحت، شکل، ارتفاع، شیب، تراکم زهکشی و... تشکیل یافته است که روی‌هم‌رفته رفتار سیستم هیدرولوژیکی را در کنترل خود دارند. این خصوصیات علاوه بر اینکه به‌طور مستقیم بر رژیم هیدرولوژی اثر می‌گذارند، به‌صورت غیرمستقیم نیز با تأثیر بر اقلیم و اکولوژی و پوشش گیاهی به میزان زیادی بر رژیم آبی حوضه تأثیر می‌گذارند؛ برای نمونه ارتفاع حوضه در میزان و

1. Wanders
2. Wada

نوع بارندگی، درجه‌حرارت و تغییرات آن، میزان تبخیر و تعرق، شدت تشعشعات خورشیدی و به‌طورکلی آب‌وهوای منطقه و به دنبال آن در تشکیل و توسعهٔ خاک و تراکم پوشش گیاهی اثر دارد (لطفی، ۱۳۹۰: ۵۷).

اهمیت زیست‌محیطی جریان آب رودخانه‌ها در مقیاس‌های مختلف سیاره‌ای، منطقه‌ای و محلی، توسعهٔ مطالعات پیش‌بینی و شبیه‌سازی جریان آب رودها را روزافزون ساخته است.

موهامود (2008) برای بسط منحنی‌های تداوم جریان در ناحیهٔ آتلانتیک میانهٔ آمریکا از تحلیل رگرسیون چندمتغیره براساس خصوصیات فیزیوگرافی حوضه‌ها استفاده کرد. نتایج کار نشان داد متغیرهای ارتفاعی و نسبت ناهمواری در هر سه نوع جریان (کم، متوسط و زیاد) جزو پیش‌بین‌گرهای مهم بوده است.

بیساو و همکاران[1] (2010) طی برآورد جریان رود براساس روش شبکهٔ عصبی مصنوعی در حوضه‌های رودخانهٔ وینوسکی[2] واقع در شمال غرب ورمونت آمریکا، به اهمیت آثار خصوصیات حوضه مانند شکل و شیب بر صحت و درستی مدل‌ها اذعان کردند.

جورجاکاکوس و همکاران[3] (2014) با لحاظ کردن آثار انسانی بر تغییرات جریان آب، پیش‌بینی‌های دبی را بهبود بخشیدند. آنها به این نتیجه رسیدند که مدل‌های تخمین‌گر رگرسیونی و شبکهٔ عصبی مصنوعی به‌طور بالقوه برای ماههای با جریان عادی و متعادل مفید هستند.

هادی و تومبول[4] (2018) به کارایی مدل‌های شبکهٔ عصبی مصنوعی و سیستم استنباط عصبی- فازی برای پیش‌بینی جریان روزانه در حوضهٔ رودخانهٔ سیحان[5] ترکیه اذعان کردند. همچنین با توجه به آثار مهم خصوصیات فیزیکی مانند مساحت، شیب و ارتفاع بر کارایی روش‌ها، به ضرورت توجه به این خصوصیات در مدل‌سازی جریان رود اشاره شد.

آریال و همکاران[6] (2020) برای ارتقای برآورد دبی‌های پایین (جریان کم‌آبی) در ۵۹۵ حوضهٔ کشور استرالیا از روش تبدیل داده‌ها استفاده کردند. بررسی همبستگی دبی‌های کمینه با خصوصیات فیزیوگرافیک آنها نشان داد همبستگی معناداری بین جریان کم‌آبی و شیب حوضه وجود دارد؛ در حالی که مساحت حوضه رابطهٔ معناداری با این نوع جریان نداشت.

رضایی و همکاران (۱۳۸٦) با استفاده از روش شبکهٔ عصبی مصنوعی و رگرسیون چندمتغیره برای مدل‌سازی منطقه‌ای دبی‌های اوج در زیرحوضه‌های سد سفیدرود اقدام کردند. در معادلهٔ رگرسیون چندمتغیره، عامل مساحت حوضه و سپس دبی پایه از بیشترین ضریب رگرسیونی با علامت مثبت برخوردار بودند.

پایروند و همکاران (۱۳۸۹) طی مقایسهٔ روش‌های تحلیل منطقه‌ای سیلاب شامل سیل شاخص، رگرسیون چندمتغیره، و هیبرید در منطقهٔ البرز مرکزی به رابطهٔ رگرسیونی مناسب و منطقی بین دبی سیلابی (متغیر وابسته) و متغیرهای فیزیوگرافی (متغیرهای مستقل) دست نیافتند.

1. Besaw et al.
2. Winooski
3. Georgakakos et al.
4. Hadi and Tombul
5. Seyhan
6. Aryal et al.

حجازی و مزبانی (۱۳۹٤) برای برآورد دبی حداکثر رواناب در حوضهٔ آبریز سراب دره‌شهر از روش شمارهٔ منحنی بهره جستند. نتایج تحلیل عاملی نشان داد دو پارامتر مساحت و تراکم زهکشی تأثیر بیشتری بر متغیر وابسته دارند.

نعیمی کلورزی و همکاران (۱۳۹۵) از دو مدل رگرسیون چندمتغیره و درخت تصمیم برای تخمین جریان ماهانه برپایهٔ متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی حوضه استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داد مؤثرترین پارامترهای دخیل در برآورد دبی ماهانه مساحت، طول آبراههٔ اصلی، شیب آبراههٔ اصلی، ضریب گراویلیوس و شکل حوضه بوده است.

شعبانی‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) با تلفیق مدل‌های اتومات سلولی دست به تخمین دبی اوج سیل در حوضهٔ آبخیز لاویج‌رود زدند. شبیه‌سازی سیلاب در این حوضه نشان داد عوامل کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری و شیب در تجمع رواناب و تولید سیل مؤثرند.

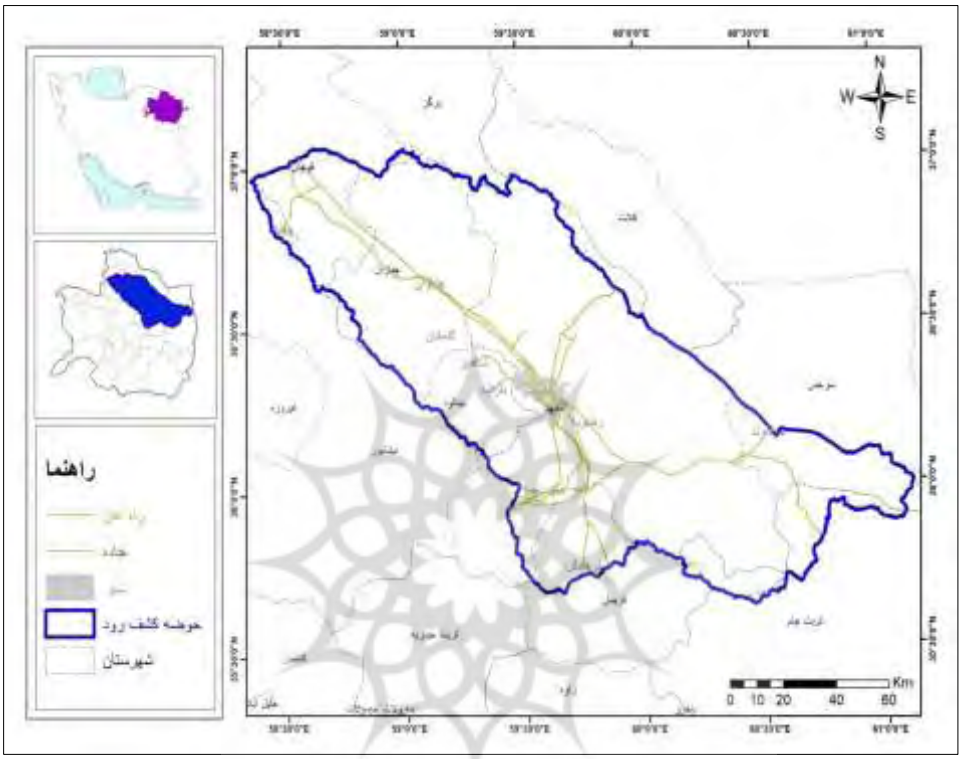
مروری بر مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد بیشتر پژوهشگران به برآورد دبی‌های حداکثر و سیلابی بیش از دبی‌های حداقل و کم‌آبی توجه داشته‌اند؛ در حالی که برنامه‌ریزی جامع و مدیریت درست منابع آب مستلزم درنظرگرفتن هر دو مقادیر بیشینه و کمینهٔ فصلی دبی در کنار مقادیر متعارف و میانگین است. پژوهش حاضر با درنظرگرفتن این ضرورت در مدل‌سازی آب‌دهی، سعی در مدل‌سازی منطقه‌ای دبی‌های میانگین، کمینه و بیشینهٔ ماهانه در حوضهٔ آبریز کشف‌رود واقع در استان خراسان رضوی داشت تا بدین طریق اولاً امکان تعمیم‌های علمی و سودمند از کمیت آب‌های سطحی در کل گسترهٔ حوضه آزموده شود و ثانیاً عوامل مهم ژئومورفومتری در تبیین تغییرات دبی زیرحوضه‌های کشف‌رود شناسایی و تعیین شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقهٔ پژوهش

حوضهٔ آبریز کشف‌رود به وسعت ۱٦٦۹۷ کیلومترمربع در شمال استان خراسان رضوی و عرض‌های جغرافیایی "۵۵ ′۳۷ °۳۵ تا "۵٦ ′۳ °۳۷ شمالی و طول‌های جغرافیایی "٦ ′۲۲ °۵۸ تا "۵۹ ′۷ °٦۱ شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه به‌لحاظ تقسیمات سیاسی در حد فاصل شهرستان‌های سرخس، تربت جام، فریمان، مشهد، کلات، بینالود، چناران، درگز، قوچان و نیشابور جای گرفته است. کشف‌رود به‌عنوان شریان حیاتی این منطقه ازجمله دشت مشهد، نقش مهمی در تأمین آب برای ساکنان کلان‌شهر مشهد و سایر شهرهای اطراف مانند چناران و طرقبه داشته و تأسیسات مهندسی گسترده‌ای مانند سدهای گلستان، طرق، کارده و ارداک روی سرشاخه‌های این رودخانه احداث شده است. حوضهٔ کشف‌رود که بخشی از حوضهٔ بزرگ قره‌قوم در شمال شرق کشور را تشکیل می‌دهد، به‌صورت حوضه‌ای کشیده با راستای شمال غربی- جنوب شرقی با ارتفاعات هزارمسجد در شمال و بینالود در جنوب احاطه شده است. رودخانهٔ کشف‌رود از آبریزهای جنوبی هزار مسجد و آبریزهای شمالی بینالود سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از شهر مشهد، در محل پل خاتون سرخس به رودخانهٔ هریرود می‌پیوندد. سپس به نام رودخانهٔ تجن، مرز ایران و ترکمنستان را تشکیل می‌دهد. مقادیر ارتفاعی ۳۷۰ تا ۳۳۱۰ متر از سطح دریا در گسترهٔ حوضه دیده می‌شود و ارتفاع متوسط آن برابر با ۱۳۳۸ متر است. شیب حوضه نیز از صفر تا ۳۸۰ درصد متغیر و متوسط آن ۱۸ درصد است.

با وجود حاکمیت اقلیم نیمه‌خشک، میزان بارندگی‌ها از ٤٥٠ میلی‌متر در ارتفاعات و بالادست حوضه تا ۲۰۰ میلی‌متر در نواحی پست و پایین‌دست حوضه متغیر است. رودخانه‌های حوضه به تبعیت از اقلیم منطقه به‌صورت فصلی درآمده‌اند و گه‌گاه با سیلاب‌های مخاطره‌بار مواجه هستند. وقوع خشکسالی‌های اخیر و بهره‌برداری انسانی از منابع آب بیش از ظرفیت اکوهیدرولوژیکی حوضه‌ها باعث شده است اوضاع نامناسبی به‌لحاظ زیست‌محیطی برای حوضهٔ آبریز کشف‌رود پیش آید (رجوع شود به: فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ عنایتی و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضهٔ آبریز کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Figure 1. Location of the Kashafrud watershed (Authors, 2021)

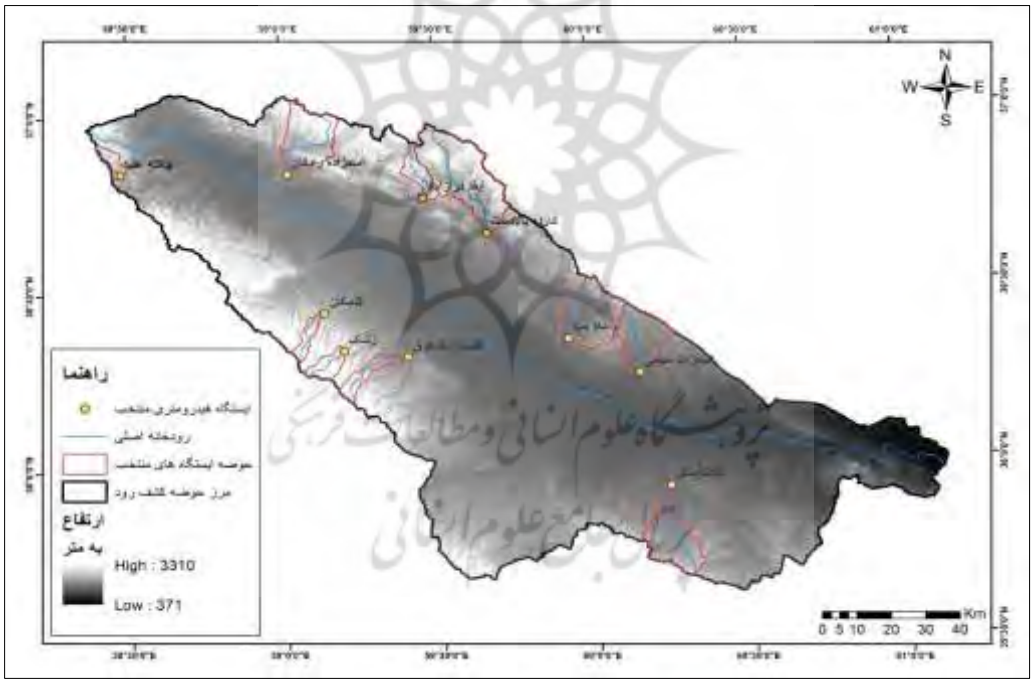
۲. ۲. داده‌ها و روش پژوهش

پژوهش حاضر براساس تحلیل آماری روابط چندمتغیره انجام شد. منابع کتابخانه‌ای استفاده‌شده شامل داده‌های دبی ایستگاههای هیدرومتری و مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه با قدرت تفکیک ۳۰ متر بود. داده‌های دبی ماهانه طی سال‌های آبی ٧٦-٧٧ تا ٩٥-٩٦ از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی اخذ شد. در گزینش ایستگاهها و زیرحوضه‌های نمونهٔ کشف‌رود، ویژگی‌های کوهستانی‌بودن، پراکنش مناسب و داشتن آمار اولیهٔ طولانی و قابل اعتماد مدنظر قرار گرفت. انتخاب حوضه‌های کوهستانی به این دلیل بود که نمود صریح و واقع‌بینانه‌ای از فرایندهای رواناب و فرسایش رخ‌داده در چشم‌انداز به دست دهد و تا حد امکان از تأثیر عوامل انسانی که بر پیچیدگی فرایندهای رودخانه‌ای می‌افزاید، کاسته شود. مشخصات ۱۰ ایستگاه منتخب در جدول ۱ آورده شد؛ همچنین شکل ۲ موقعیت ایستگاهها و زیرحوضه‌های بالادست آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاههای هیدرومتری حوضهٔ آبریز کشف‌رود

Table 1. Chrachteristics of the hydrometry stations of Kashafrud watershed (Authors, 2021)

نام ایستگاه	نام رودخانه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	مساحت حوضهٔ بالادست (کیلومترمربع)	ارتفاع ایستگاه از سطح دریا (متر)	سال تأسیس
آبقد دارزآباد	ارداک	۳٦-٤٥-٤۳	٥۹-۲۷-٤٤	۸۰/۷	۱٤٦۳	۱۳٥٤
امامزاده میامی	میامی	۳٦-۱٥-۲٥	٦۰-۰۸-٥۲	۲۱۳	۹۸۸	۱۳٦٤
امامزاده رادکان	رادکان	۳٦-٥۰-۱٤	٥۹-۰۱-۲۱	۲٤۹	۱۲٦۷	۱۳٥۲
چکنه علیا	چکنه	۳٦-٥۰-۲۷	٥۸-۲۸-٤۰	٤۱/٥	۱٦۹۸	۱۳٥۸
زشک	زشک	۳٦-۲۰-۰٥	٥۹-۱۱-٥۱	٦٥/٥	۱٦۹۲	۱۳٥۲
کارده بالادست	کارده	۳٦-۳۹-۳٥	٥۹-۳۹-٥۸	٤٤٦/٥	۱۳۲۲	۱۳٦۳
کلاته منار	کلاته منار	۳٥-٥٦-۰۷	٦۰-۱٤-۱۷	۲۳۳/٥	۹۸٦	۱۳٦۳
گلستان جاغرق	جاغرق	۳٦-۱۸-٥۲	٥۹-۲٤-۰٤	۷۸	۱۲۱۳	۱۳٥۳
گلمکان	گلمکان	۳٦-۲٦-۳۳	٥۹-۰۷-٥۷	٤۷/۱	۱٥٦۹	۱۳٤۷
ماه‌نسا	ماه‌نسا	۳٦-۲۱-۲٤	٥۹-٥٥-۱۷	۲٦۸	۱۲۰٦	۱۳٥٥



شکل ۲. موقعیت ایستگاههای هیدرومتری منتخب در داخل حوضهٔ آبریز کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Figure 2. Location of the selected hydrometry stations in Kashafrud watershed (Authors, 2021)

برای بررسی امکان مدل‌سازی و پیش‌بینی دبی ماهانه براساس تحلیل همبستگی و رگرسیون چندمتغیره، مراحل زیر طی شد:

الف. آماده‌سازی و محاسبات اولیهٔ سری زمانی ماهانه. پس از انتخاب دورهٔ مشترک آماری، برای کنترل اولیهٔ داده‌های خام به‌لحاظ درستی و سپس محاسبهٔ میانگین ماهانهٔ دبی ایستگاهها طی ۲۰ سال اقدام شد. در مرحلهٔ بعدی،

در هر ایستگاه ماههای با بیشینه و کمینهٔ دبی (دو ماه) انتخاب شدند که درواقع پرآب‌ترین و کم‌آب‌ترین ماههای سال محسوب می‌شدند. مقادیر این دو ماه به اضافهٔ دبی متوسط ماهانه در هر ایستگاه (میانگین ۱۲ ماه)، به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. محاسبات اشاره‌شده در محیط نرم‌افزاری اکسل انجام شد.

ب. استخراج زیرحوضه‌ها و محاسبات ژئومورفومتری. پس از انتخاب ایستگاهها، برای استخراج زیرحوضه‌های بالادست آنها براساس مدل رقومی ارتفاع و در محیط سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کمک الحاقیهٔ آرک‌هیدرو (Archydro) اقدام شد. سپس ۱۶ متغیر ژئومورفومتری به‌عنوان متغیرهای مستقل برای هریک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. این متغیرها به این قرار بودند: محیط به کیلومتر (P)، مساحت به کیلومترمربع (A)، ارتفاع حداکثر به متر (Hmax)، ارتفاع حداقل به متر (Hmin)، ارتفاع متوسط (Hmean) به متر، دامنهٔ ارتفاعی به متر (HD)، شیب حداکثر به درجه (Smax)، شیب متوسط به درجه (Smean)، شیب آبراههٔ اصلی به فوت بر مایل (Sms)، طول آبراههٔ اصلی به کیلومتر (Lms)، مجموع طول آبراهه‌ها به کیلومتر (∑L)، تراکم زهکشی به کیلومتر بر کیلومترمربع (DD)، نسبت ناهمواری شیوم (Rr)، ضریب گراویلیوس (Gr)، کشیدگی (Elong)، زمان تمرکز کرپیچ به ساعت (Kerp).

ج. آزمون همبستگی. پس از محاسبهٔ مقادیر ۳ متغیر وابسته و ۱۶ متغیر مستقل برای هر ایستگاه، این مقادیر مورد آزمون همبستگی دوطرفه واقع شد تا طی ماتریس همبستگی حاصل معلوم شود بین کدام متغیرها ارتباط و همبستگی معناداری وجود دارد. البته پیش از انجام آزمون همبستگی، همگنی داده‌های دبی با آزمون ران بررسی شد. سطح معناداری روابط همبستگی برابر با ۰/۰۵ و کمتر در نظر گرفته شد.

د. تحلیل رگرسیون. گام نهایی پژوهش، مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته از روی متغیرهای مستقل بود. این امر براساس آن دسته از متغیرهای مستقل و وابسته صورت گرفت که از روابط همبستهٔ معنادار برخوردار بودند. شکل کلی معادلهٔ رگرسیون چندمتغیره به‌صورت زیر است:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_k x_k \qquad \text{رابطهٔ ۱}$$

در معادلهٔ بالا، $\hat{Y}$ متغیر وابسته، b_0 ضریب ثابت، X_1 تا X_k متغیرهای مستقل و b_1 تا b_k ضرایب متغیرهای مستقل هستند.

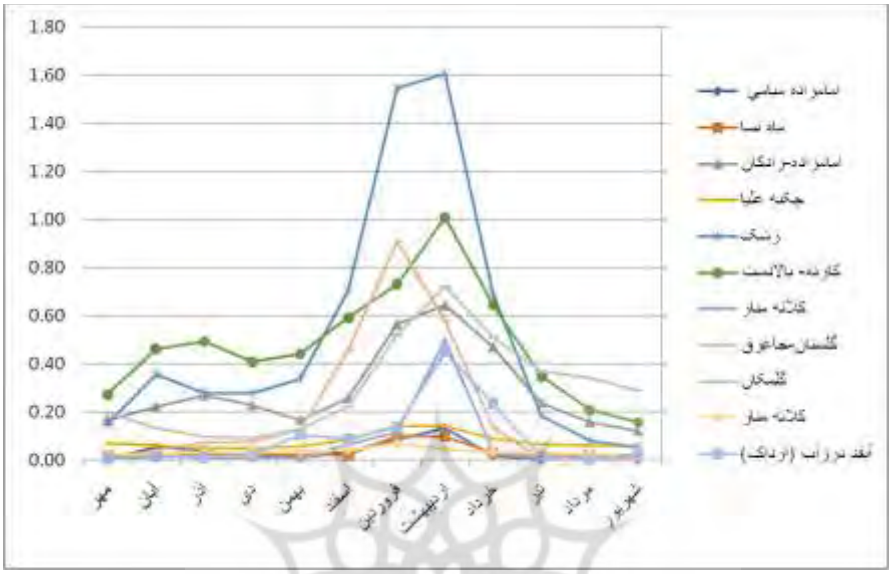
پرتال جامع علوم انسانی

۳. یافته‌های پژوهش

۳. ۱. رژیم دبی ماهانه

به‌منظور آگاهی از کمینه و بیشینهٔ فصلی آب‌دهی در زیرحوضه‌های منتخب برای تهیهٔ نمودار توالی ماهانهٔ دبی اقدام شد. نمودار حاصل براساس شکل ۳ نشان می‌دهد بیشترین آب‌دهی در فصل بهار و کمترین آن در فصل تابستان رخ می‌دهد. ویژگی خشکی و فصلی‌بودن رژیم هیدرولوژی منطقه در مرحلهٔ نخست از دبی ماهانهٔ پایین ایستگاهها و در مرحلهٔ دوم از تفاوت مقادیر ماههای فروردین و اردیبهشت با مقادیر ماههای مرداد و شهریور به‌خوبی پیداست. بالاترین دبی اردیبهشت‌ماه در ایستگاه زشک و برابر با ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه است، اما ازلحاظ کمینهٔ دبی که تقریباً بی‌آبی و مقادیر صفر را نشان می‌دهد، نمی‌توان ایستگاه خاصی را مشخص کرد؛ زیرا در ماههای مختلف فصل

تابستان، ایستگاههای امامزاده میامی، کلاته‌منار، گلستان جاغرق و آبقد، مقادیر صفر دبی ماهانه را نشان می‌دهند. دو حوضهٔ زشک و کارده بالادست به ترتیب با دبی متوسط ماهانهٔ ۰/۵۲ و ۰/٤۸ مترمکعب بر ثانیه، جزو پرآب‌ترین زیرحوضه‌ها محسوب می‌شوند. درمقابل حوضه‌های میامی، ماه‌نسا و کلاته منار مشترکاً با دبی متوسط ماهانهٔ ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه، جزو کم‌آب‌ترین زیرحوضه‌ها به شمار می‌روند.



شکل ۳. نمودار تغییرات دبی ماهانه در زیرحوضه‌های منتخب کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Figure 3. The Chart of monthly discharge variations in sub-watersheds of Kashafrud watershed (Authors, 2021)

۳. ۲. خصوصیات هندسی حوضه‌ها

جدول ۲ مقادیر محاسبه‌شدهٔ متغیرهای ژئومورفومتری را برای زیرحوضه‌های کشف‌رود نشان می‌دهد. حوضه‌های کارده بالادست و چکنه‌علیا با مساحت‌های به ترتیب ٤٤٦/۵ و ٤۱/۵ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین زیرحوضه‌ها محسوب می‌شوند. میانگین مساحت حوضه‌های منتخب برابر با ۱۷۲ کیلومترمربع است که در مقیاس حوضه‌های نسبتاً متوسط است. موقعیت کوهستانی حوضه‌های منتخب با توجه به ارتفاع متوسط آنها پیداست و میانگین ۱۸۸۰ متر برای مقادیر متغیر ارتفاع متوسط، این واقعیت را تأیید می‌کند. این ویژگی با تعدیل شرایط خشک منطقه با افزایش میزان بارندگی در ارتفاعات و رواناب فصلی حاصل از ذوب برف می‌تواند به نفع شرایط هیدرولوژیکی عمل کند و تا حدودی از وخامت اوضاع منابع آب بکاهد؛ اما میانگین شیب متوسط حوضه‌ها که برابر با ۱٦/۲ درجه است، نشان می‌دهد عمدتاً غلبه با شیب‌های متوسط است. میانگین تراکم زهکشی حوضه‌های منتخب برابر با ۱/٦ کیلومتر بر کیلومترمربع به دست آمد که تراکم متوسط تا پایین حوضه‌ها را نشان می‌دهد. این وضعیت را می‌توان به وجود اقلیم خشک، نفوذپذیری سازندهای کواترنری و تراکم درزها و ترک ها در سازندهای نسبتاً سخت و سخت نسبت داد. در هر حال همین تراکم زهکشی ضعیف حوضه‌ها اشاره به تخلیهٔ کند رواناب همراه با افزایش فرصت برای تبخیر و تعرق در زیرحوضه‌های کشف‌رود دارد؛ اما میانگین ضریب گراویلیوس محاسبه‌شده برای حوضه‌های نمونه که برابر با ۱/۷ است، انحراف آنها از شکل دایره و غالبیت حوضه‌های نسبتاً کشیده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات ژئومورفومتری زیرحوضه‌های کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Table 2. Geomorphometric chrachteristics of the sub-watershed of Kashafrud watershed (Authors, 2021)

زیرحوضه‌ها	چکنه علیا	امامزاده راد‌کان	آبقد درازآباد	کارده بالادست	ماه نسا	امامزاده میامی	کلاته منار	گلستان جاغرق	زنشک	گلمکان	میانگین
مساحت	٤١/٤٦	٢٨٤/٨٦	٨٠/٧٥	٤٤٦/٤٩	٢٦٧/٩٣	٢١٢/٩٢	٢٣٣/٥	٧٨/٠١	٦٥/٤٧	٤٧/٠٦	١٧٢/٢
محیط	٣٦/١٣	٩٣/٨٦	٦٠/١٤	١٢١/٤٨	٨٤/٨٤	٧٧/٤٨	٩٥/٣٣	٦٥/٢	٤٠/٩٩	٤٦/١٧	٧٣/٢
ارتفاع حداکثر	٢٣٧٧	٢٨٨٧	٢٩٣٤	٢٩٥١	١٩٣٨	١٩٦٦	٢٢٠١	٣٠٧٦	٣٢٥٧	٣٢٠٦	٢٦٧٩
ارتفاع حداقل	١٦٨٤	١٢٦٦	١٤٦٦	١٣١١	١٠١٩	٩٩٢	٩٨٠	١٢٢٤	١٧١٠	١٥٦٢	١٣٢١
ارتفاع متوسط	١٩٦٥	١٩٦٩	٢١٠٢	٢٠٧٩	١٣٤٢	١٢٩٨	١٣٩٨	١٩٥٨	٢٤٢٣	٢٢٦٧	١٨٨٠
اختلاف ارتفاع	٦٩٣	١٦٢١	١٤٦٨	١٦٤٠	٩١٩	٩٧٤	١٢٢١	١٨٥٢	١٥٤٧	١٦٤٤	١٣٥٨
شیب متوسط	١٤/٣٧	١٧/٣٦	١٩/٤	١٨/٨١	١١/١	١٣/٠٨	١٢/٢٢	١٩/٤٥	٢٤/٥٧	٢٢/٧٩	١٦/٢
شیب حداکثر	٤٧/٩١	٦٥/٦٣	٦٧/٤	٧١/١٧	٥٩/٥٥	٦٦/٨٣	٦٦/٨٢	٥٦/٩	٥٨/٣٣	٦١/٤٨	٦٢/٢
شیب آبراههٔ اصلی	٢٣٤/٧	١٩٧/٨	٢٩٥/٨	١٤٥	١٦١/٩	١٦٢/٩	١٥٥	٢٩٧/٤	٤٧٥/١	٤٢٨/٤	٢٥٥/٤
طول آبراههٔ اصلی	١٤/٨٢	٣٩/٢	٢٦/٠٨	٥٥/١١	٢٨/١٢	٢٩/٥	٤٠/٠٤	٣٠/٣٨	١٧/١٨	٢٠/٢٥	٣٠/١
مجموع طول آبراهه‌ها	٧٢/٥٨	٤١١/٦٦	١٢٦/٠٥	٧١٧/٦٥	٥٠١/٣٥	٣٧٧/٥٦	٤٣١/٥٥	١٢١/٠٢	٩٣/٥٦	٦٧/٤٢	٢٩٢
تراکم زهکشی	١/٧٥	١/٦٥	١/٥٦	١/٦١	١/٨٧	١/٧٧	١/٨٥	١/٥٥	١/٤٣	١/٤٣	١/٦٥
زمان تمرکز	١/٧٢	٣/٨٢	٢/٤٨	٥/٦٣	٣/٢٤	٣/٣٤	٤/٣٦	٢/٧	١/٥	١/٧٧	٣/٠٦
کشیدگی حوضه	٢/٤٤	٢/٣٩	٢/٣١	٢/٢	٣/٠٢	٢/٦٣	٢/٣٨	٢/١٥	٢/٣٩	٢/٢٨	٢/٤٢
ضریب گراویلیوس	١/٥٧	١/٦٧	١/٨٧	١/٦١	١/٤٥	١/٤٩	١/٧٥	٢/٠٧	١/٤٢	١/٨٨	١/٦٨
نسبت ناهمواری	٠/٠٥	٠/٠٤	٠/٠٦	٠/٠٣	٠/٠٣	٠/٠٤	٠/٠٣	٠/٠٦	٠/٠٩	٠/٠٨	٠/٠٥

۳. ۳. تحلیل همبستگی

انجام آزمون ران روی داده‌های دبی ماهانه نشان داد تمامی داده‌ها همگن هستند و شرایط ورود به تحلیل‌های همبستگی و رگرسیونی را دارند؛ اما نتایج آزمون همبستگی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته در جدول ۳ گنجانده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد بین دبی مینیمم ماهانه (کم‌آب‌ترین ماه) و متغیرهای ژئومورفومتری، هیچ‌گونه رابطهٔ معناداری وجود ندارد. این نتیجه می‌تواند ناشی از وضعیت خشکی و کم‌آب‌بودن زیرحوضه‌ها باشد که تفاوت کم آنها در ماههای کم‌آب، امر تخمین دبی کمینه را دشوار می‌کند. از سوی دیگر، جریان کم رودها (کم‌آبی) حساس به فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌کاری، جنگل‌زدایی، کشاورزی و توسعهٔ استخراج منابع است (Aryal et al., 2020: 1) و این موضوع امر مدل‌سازی را پیچیده می‌کند. در این زمینه نعیمی کلورزی و همکاران (۱۳۹۵) دقت کم برآورد دبی جریان در ماههای کم‌بارش نسبت به ماههای پربارش را ناشی از بی‌نظمی بارش‌های رگباری و پراکندگی زیاد بارش در سطح حوضه طی ماههای خشک و نیز استفاده از آب برای مصارف کشاورزی در این ماهها دانستند. به‌علاوه درزمینهٔ روابط دو متغیر شیب و مساحت حوضه با دبی کمینهٔ ماهانه بایستی بیان کرد که برخلاف نتایج آریال و

همکاران (2020)، همبستگی معناداری بین جریان کم‌آبی و شیب حوضه حاصل نشد؛ اما نبود همبستگی معنادار بین جریان کم‌آبی و مساحت حوضه در نتایج آریال و همکاران (2020) نیز دیده شد.

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی بین دبی ماهانه (بیشینه، کمینه و متوسط) و خصوصیات ژئومورفومتری زیرحوضه‌های کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Table 3. The results of correlation test between monthly discharge (minimum, maximum and mean rates) and geomorphometric chrachteristics of the sub-watershed of Kashafrud watershed (Authors, 2021)

	متغیر مستقل	P	A	Hmax	Hmin	Hmean	HD	Smax	Smean
دبی بیشینه	r	-۰/۰۷	-۰/٦۲	۰/۸۱	۰/٤٥	۰/۷۲	۰/۷٤	۰/۰۹	۰/۷۳
	Sig.	۰/۸٤۷	۰/۸٦٥	۰/۰۰٥	۰/۱۸۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱٤	۰/۷۹۷	۰/۰۱٥
دبی کمینه	r	۰/۳۹	۰/٤۹	۰/٤٥	۰/۲۹	۰/٤۷	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۳٤
	Sig.	۰/۲٦٦	۰/۱٥۳	۰/۱۹٦	۰/٤۱۸	۰/۱٦۸	۰/۲۷٥	۰/٤۳۷	۰/۳۳٤
دبی متوسط	r	۰/۰٦	۰/۱٥	۰/۷۸	۰/٥۱	۰/۷٦	۰/٦٦	۰/۱٥	۰/٦۹
	Sig.	۰/۸٦٦	۰/٦۸۸	۰/۰۰۸	۰/۱۳۰	۰/۰۱۱	۰/۰۳۷	۰/٦۷۲	۰/۰۲۸
		Sms	Lms	∑L	DD	Rr	Gr	Elong	Kerp
دبی بیشینه	r	۰/٦۲	۰/۰۹	-۰/۱٤	-۰/۷٦	۰/٦۳	۰/۰۸	-۰/٥۸	-۰/۰۷
	Sig.	۰/۰٥٥	۰/۸۰۹	۰/۷۰٤	۰/۰۱۱	۰/۰٥	۰/۸۱۸	۰/۰۸۱	۰/۸٥۷
دبی کمینه	r	-۰/۰٤	۰/٤۸	۰/٤۱	-۰/۳۲	-۰/۰۳	-۰/۱۲	-۰/۳٤	۰/٤
	Sig.	۰/۹۲۲	۰/۱٥٦	۰/۲٤۳	۰/۳٦۱	۰/۹۳٦	۰/۷٥۱	۰/۳۲۹	۰/۲٤۹
دبی متوسط	r	۰/٤۹	۰/۲۱	۰/۰٥	-۰/۷۲	۰/٤۹	-۰/۰۸	-۰/٥۱	۰/۰٦
	Sig.	۰/۱٥۳	۰/٥٦٦	۰/۸۸۱	۰/۰۱۸	۰/۱٤٦	۰/۸۲	۰/۱۲۹	۰/۸٦۰

بیشترین همبستگی دبی کمینهٔ ماهانه با دو متغیر مساحت حوضه (r= 0/49) و طول آبراههٔ اصلی (r= 0/49) حاصل شده است که نشان می‌دهد با افزایش مساحت حوضه و پیرو آن طول آبراههٔ اصلی، میزان دبی کم‌آب‌ترین ماه فزونی می‌یابد. تأثیر مثبت این دو پارامتر بر دبی کم‌آبی بیشتر از دبی متوسط است که شدت وابستگی جریان کم حوضه‌ها به مساحت آنها را نشان می‌دهد. کمترین همبستگی دبی کمینهٔ ماهانه با دو متغیر شیب آبراههٔ اصلی (r= -0/04) و نسبت ناهمواری (r= -0/03) حاصل شده است که درواقع اشاره به ارتباط‌نداشتن متغیرها دارد. در یک جمع‌بندی از تأثیر مثبت یا منفی خصوصیات هندسی حوضه‌ها بر دبی کمینهٔ ماهانه می‌توان گفت که پارامترهای محیط، مساحت، ارتفاع، شیب و طول آبراهه تأثیر مثبتی بر دبی‌های کم‌آبی دارند. درمقابل پارامترهای تراکم زهکشی، ضریب گراویلیوس و کشیدگی حوضه تأثیر منفی بر دبی کم‌آبی دارند. تأثیر مثبت افزایش ارتفاع بر میزان رواناب (چه مقادیر متوسط و چه مقادیر حدی) به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی به دلیل برودت هوا، افزایش بارندگی و نیز کاهش دخالت‌ها و بهره‌برداری‌های انسانی، دور از انتظار نیست؛ اما تأثیر منفی سه پارامتر نام‌برده را می‌توان چنین تبیین کرد که با افزایش تراکم زهکشی و کشیدگی حوضه، تخلیهٔ رواناب و انتقال آن از بالادست و میان‌دست حوضه به پایین‌دست آن سریع‌تر اتفاق می‌افتد و فرصت نفوذ را برای تداوم بعدی جریان‌های ضعیف می‌گیرد. از طرفی

پخش‌شدگی بیشتر آبراهه‌ها فرصت بیشتری را برای عمل تبخیر و هدررفت آب در حوضه‌های با اقلیم خشک و جریان فصلی پیش می‌آورد که درنهایت به کاهش جریان کم‌آبی می‌انجامد.

برخلاف دبی کمینهٔ ماهانه، روابط معناداری بین دبی‌های بیشینه و متوسط ماهانه از یک سو و بعضی متغیرهای مستقل از سوی دیگر دیده می‌شود. دربارهٔ دبی ماکزیمم، شش رابطهٔ معنادار بین این متغیر و متغیرهای ارتفاع حداکثر (r= 0/81)، ارتفاع متوسط (r= 0/72)، اختلاف ارتفاع (r= 0/74)، شیب متوسط (r= 0/73)، تراکم زهکشی (r= -0/76) و نسبت ناهمواری (r= 0/63) وجود دارد. همین روابط معنادار بین دبی متوسط ماهانه و ۵ متغیر ارتفاع حداکثر (r= 0/78)، ارتفاع متوسط (r= 0/76)، اختلاف ارتفاع (r= 0/66)، شیب متوسط (r= 0/69) و تراکم زهکشی (r= -0/72) مشاهده می‌شود. نکتهٔ جالب توجه این است که ضرایب همبستگی تمامی روابط معنادار متغیرهای مستقل با دو متغیر دبی متوسط و دبی ماکزیمم ماهانه بالای ۰/٦ بوده و اشاره به ارتباط نزدیک و قوی بین متغیرهای یادشده دارد. بدین ترتیب معلوم می‌شود که اولاً آب‌دهی ماهانهٔ زیرحوضه‌ها وابستگی نزدیکی با متغیرهای ارتفاعی دارد، ثانیاً خشونت ناهمواری‌ها و دینامیک فعال وابسته به آن نقش مؤثری در جریان آب از بالادست و انتقال آن به پایین‌دست حوضه دارد و با افزایش شدت ناهمواری بر سرعت پاسخ هیدرولوژیکی چنین حوضه‌هایی افزوده می‌شود. همبستگی مستقیم متغیرهای ارتفاعی و شیب و ناهمواری با دبی‌های متوسط و بیشینهٔ ماهانه دال بر این واقعیت دارد. درمقابل متغیر تراکم زهکشی همبستگی منفی با دو متغیر وابسته دارد. احتمالاً یکی از دلایل اصلی این نوع رابطه به بارندگی کم و خشکی منطقه برمی‌گردد که موجب تراکم زهکشی پایین در حوضهٔ مورد مطالعه شده است. از طرفی، نظر به وجود سازندهای آهکی در حوضه‌ها و سازندهای نسبتاً سخت دولومیتی و سنگ‌های دگرگونی که نفوذناپذیر بوده و در عین حال از طریق درزها و ترک‌های موجود باعث رسوخ و هدررفت آب حاصل از بارندگی می‌شود، وجود رابطهٔ منفی تراکم زهکشی با دبی ماهانه توجیه‌پذیر است.

اثر معنادار متغیرهای ارتفاعی و نسبت ناهمواری بر میزان جریان آب با نتایج پژوهش موهامود (2008) همخوانی دارد. هادی و تومبول (2018) نیز به اهمیت این خصوصیات در مدل‌سازی جریان رود اشاره داشتند؛ اما نعیمی کلورزی و همکاران (۱۳۹۵) پارامترهای مساحت، طول آبراههٔ اصلی، شیب آبراههٔ اصلی و ضریب گراویلیوس را جزو مؤثرترین پارامترهای دخیل در برآورد دبی ماهانه دانستند که با نتایج این پژوهش همخوانی ندارد.

از آنجایی که وقوع دبی‌های حداکثر و سیلابی بیشتر به ماههای پرآب و بهاری مربوط است، می‌توان نتایج حاصل را به نوعی با نتایج دیگر پژوهشگرانی مقایسه کرد که دبی حداکثر را برآورد کرده‌اند. در این زمینه، حجازی و مزبانی (۱۳۹٤) پی بردند که تراکم زهکشی تأثیر بیشتری بر دبی‌های حداکثر دارد. شعبانی‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) نیز به تأثیر جالب توجه میزان شیب بر دبی اوج سیل اذعان کردند.

نکتهٔ مهم دیگر دربارهٔ نتایج حاصل، رابطهٔ مساحت حوضه با دبی جریان رودخانه‌هاست. با اینکه مساحت حوضه به‌عنوان مهم‌ترین متغیر مؤثر بر رژیم هیدرولوژیک حوضه‌ها شناخته شده و به اهمیت این فاکتور در مدل‌سازی دبی بیشینه و سیلابی اذعان شده است، در اینجا رابطهٔ معناداری بین این پارامتر و دبی‌های میانگین و حدی ماهانه به دست نیامد. حتی برخلاف مرسوم، جهت رابطهٔ مساحت حوضه با دبی بیشینهٔ ماهانه به‌صورت معکوس بود. امیراحمدی و

همکاران (۱۳۹٤) بیان داشته‌اند که شدت افزایش دبی سیلاب معادل شدت افزایش مساحت حوضه نیست؛ زیرا هرچه سطح حوضه بیشتر شود، وقوع بارش‌های شدید روی تمامی حوضه را دربرنمی‌گیرد. از طرفی با افزایش سطح حوضه، اهمیت نسبی ذخیرهٔ آبراهه‌ای بیشتر می‌شود؛ بنابراین معلوم می‌شود که حوضه‌های کوهستانی کوچک نقش بیشتری در بروز دبی‌های اوج دارند و اهمیت آنها در ماههای پرآبی بیشتر از حوضه‌های بزرگ‌تر است.

۳. ٤. تحلیل رگرسیون و پیش‌بینی

نکتهٔ مهم در مدل‌های رگرسیونی، افزایش توان تعمیم مدل‌ها با توجه به دقت و کارایی آنها و کاهش تعداد متغیرها و انتخاب متغیرهای مستقل با سهم زیاد در تبیین تغییرات متغیر وابسته است؛ بر این اساس برای آزمون روابط رگرسیونی با استفاده از متغیرهای مؤثر و دارای روابط معنادار با متغیر وابسته اقدام شد. نتایج تحلیل رگرسیونی روابط بین متغیرهای مستقل ژئومورفومتری و متغیرهای وابستهٔ دبی‌های حداکثر و متوسط ماهانه به ارائهٔ مدل‌های رگرسیونی انجامید که در زیر می‌آید:

الف. معادلهٔ رگرسیونی برآورد دبی حداکثر ماهانه

رابطهٔ ۲ $Dmax=-8/187-0/012Hmax+0/01Hmean+0/008HD+0/066Smean+5/138DD+35/739Rr$

ب. معادلهٔ رگرسیونی برآورد دبی متوسط ماهانه

رابطهٔ ۳ $Dmean=1/085-0/003Hmax+0/003Hmean+0/002HD+0/008Smean-0/291DD$

با توجه به اینکه متغیرهای مستقل به ترتیب اهمیت در معادلات مربوط آورده شده‌اند، می‌توان گفت که عامل ارتفاع که بر بسیاری از متغیرهای محیطی دیگر اثر قاطعی دارد، مؤثرترین متغیر در تبیین تغییرات دبی ماهانه محسوب می‌شود. آماره‌های مدل‌های رگرسیونی براساس جدول ٤ آورده شده است. در مدل مربوط به دبی حداکثر ماهانه، نزدیک به ۹۰ درصد واریانس متغیر وابسته با متغیرهای مستقل قابل تبیین است. در مدل دوم که به دبی متوسط ماهانه مربوط است، این میزان به ۸۰ درصد می‌رسد. هر دو مدل خطای تخمین کم و دقت برآورد زیادی دارند؛ با این حال مدل مربوط به دبی حداکثر، هم به‌لحاظ ضریب تعیین بیشتر و هم خطای تخمین کمتر، از توان پیش‌بینی بیشتری نسبت به مدل دبی متوسط برخوردار است. از طرفی آمارهٔ F بالاتر مدل دبی حداکثر نسبت به مدل دبی متوسط، نشانگر کارایی نسبتاً بیشتر مدل اول است. شاید به همین دلیل است که بیشتر پژوهشگران به دنبال پیش‌بینی دبی‌های اوج و سیلابی هستند که پاسخ هیدرولوژیکی صریح و روشنی درقبال محرک‌های داخل حوضه محسوب می‌شود. درمقابل، عمل میانگین‌گیری از مقادیر دبی به‌صورت دبی متوسط سالانه با اینکه به‌لحاظ تأمین آب و ذخیرهٔ آبی باارزش است، تصویر روشنی از واقعیات هیدرولوژیک به‌لحاظ مقابله با بحران‌های آبی به دست نمی‌دهد؛ در هر حال با این نتایج می‌توان گفت که امکان برآورد دبی ماهانه در حوضهٔ آبریز کشف‌رود با استفاده از متغیرهای ژئومورفومتری یا خصوصیات هندسی حوضه‌ها وجود دارد و چنین مدل‌هایی قابل تعمیم به سایر زیرحوضه‌های کشف‌رود است. این یافته برخلاف نتایج پایروند و همکاران (۱۳۸۹) است که اذعان داشتند با بهره‌گیری از روش‌های

رگرسیون خطی نمی‌توان رابطهٔ منطقی بین پدیده‌ها برقرار کرد. همچنین نتایج بالا با یافته‌های جورجاکاکوس و همکاران (2014) از یک سو همخوانی و از سوی دیگر ناهمخوانی دارد؛ زیرا آنها مدل‌های تخمین‌گر رگرسیونی را برای ماههایی از سال مفید دانستند که جریان مشاهده‌ای و طبیعی رودها تفاوت چشمگیری با هم ندارند؛ به بیانی آنها دوره‌های پرآبی بهاری و کم‌آبی تابستانی را برای این نوع مدل‌ها غیرمفید دانستند.

جدول ٤. آماره‌های مدل رگرسیونی پیش‌بین دبی‌های حداکثر و متوسط ماهانه در حوضهٔ آبریز کشف‌رود (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۹)

Table 4. Statistics of the predictive regression models of monthly discharge (maximum and mean rates) in Kashafrud watershed (Authors, 2021)

متغیر وابسته	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R^2)	خطای استاندارد برآورد (SE)	مجموع مربعات رگرسیون (SSR)	مجموع مربعات باقی‌مانده (SSE)	آمارهٔ F	تعداد متغیر مستقل
دبی حداکثر	۰/۹٤	۰/۸۹	۰/۲۷	۱/۷۷	۰/۲۲۱	٤/۰۱	٦
دبی متوسط	۰/۹	۰/۸	۰/۱۲	۰/۲٤۱	۰/۰۵۸	۳/۳۱	۵

٤. نتیجه‌گیری

روش‌های تجزیه و تحلیل آماری به‌ویژه رگرسیون چندمتغیره قدمت و رواج زیادی در مدل‌سازی آب‌دهی حوضه‌های رودخانه‌ای دارند. مدل‌های رگرسیون چندمتغیره که خصوصیات هندسی حوضه‌ها را با تغییرات آب‌دهی آنها در ارتباط می‌گذارند، علاوه بر اینکه به‌تنهایی در مدل‌سازی آب‌دهی رودخانه‌ها کاربرد دارند، در ناحیه‌بندی و همگن‌بندی حوضه‌ها به‌عنوان کمک‌رسان سایر مدل‌ها نیز محسوب می‌شوند. از طرفی، مدل‌سازی تغییرات مکانی آبدهی حوضه‌ها مستلزم درنظرگرفتن مقادیر حدی هیدرولوژیک، چه به‌صورت روزانه و چه به‌صورت فصلی، در کنار مقادیر متعارف و میانگین آن است که نقش زیادی در تغییر شرایط سامانه‌های هیدرولوژیک دارند.

پژوهش حاضر با اتخاذ چنین رویکردی توانست به مدل‌سازی منطقه‌ای دبی ماهانه در زیرحوضه‌های کشف‌رود براساس متغیرهای ژئومورفولوژی دست یابد. تحلیل رگرسیون چندمتغیره بین متغیرهای مستقل دبی بیشینه و متوسط ماهانه و ١٦ متغیر مستقل ژئومورفومتری نشان داد با استفاده از ٦ متغیر ارتفاع حداکثر، ارتفاع متوسط، اختلاف ارتفاع، شیب متوسط، تراکم زهکشی و نسبت ناهمواری می‌توان به مدل‌های رگرسیونی دست یافت که قادر به توضیح ۹۰ درصد واریانس دبی حداکثر ماهانه و ۸۰ درصد واریانس دبی متوسط ماهانه بودند. بدین ترتیب معلوم می‌شود که براساس انتظار، خصوصیات ارتفاعی و ناهمواری، مهم‌ترین خصوصیات هندسی حوضه‌ها در تبیین تغییرات مکانی دبی ماهانهٔ آنها هستند؛ به‌علاوه با اینکه مساحت حوضه به‌عنوان مهم‌ترین متغیر مؤثر بر رژیم هیدرولوژیک حوضه‌ها شناخته شده است، به دلیل نبود رابطهٔ معنادار بین این پارامتر و دبی‌های میانگین و حدی ماهانه، در معادلات رگرسیونی نهایی حضور نیافت؛ در هر حال از طریق مدل‌های حاصل با توجه به خطای تخمین کم و دقت زیاد آنها می‌توان به تعمیم منطقه‌ای دبی‌های بیشینه و متوسط ماهانه در سایر زیرحوضه‌های کشف‌رود دست یافت. از طرفی، تعمیم منطقه‌ای دبی کمینهٔ ماهانه با توجه به نبود همبستگی معنادار بین این متغیر و متغیرهای ژئومورفومتری میسر

نشد. دلیل این امر را می‌توان به بی‌نظمی‌های مقادیر ورودی سیستم حوضهٔ زهکشی یعنی بارش و آثار زیاد فعالیت‌های انسانی بر دبی کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت داد؛ اما نتایج حاصل دربارهٔ نوع روابط همبستگی خصوصیات هندسی حوضه‌ها با دبی ماهانهٔ آنها نشان می‌دهد افزایش ارتفاع، تأثیر مثبتی بر میزان رواناب حاصل از بارش در حوضه‌های مطالعه‌شده دارد؛ اما افزایش تراکم زهکشی تأثیر منفی بر رژیم آبدهی حوضه‌ها دارد؛ به بیانی با افزایش تراکم آبراهه‌ها تخلیهٔ رواناب و انتقال آن از بالادست حوضه به پایین‌دست آن سریع‌تر روی می‌دهد و فرصت بیشتری برای پدیده‌های نفوذ و تبخیر و هدررفت آب در چنین حوضه‌های با اقلیم نیمه‌خشک و جریان فصلی پیش می‌آید که درنهایت به کاهش جریان رودها می‌انجامد.

در پایان پیشنهاد می‌شود با توجه به موقعیت کوهستانی بیشتر زیرحوضه‌های مطالعه‌شده و نقش حوضه‌های کوهستانی کوچک چون چکنه علیا، زشک، گلمکان، گلستان و آبقد درازآباد در بروز دبی‌های اوج، اولویت‌دهی اقدامات آبخیزداری در چنین حوضه‌هایی با هدف کاهش خطرات سیلاب لحاظ شود؛ همچنین حساسیت بیشتر هیدرولوژیکی این حوضه‌های کوچک نسبت به حوضه‌های بزرگ در فصل کم‌آبی تابستان، لزوم اتخاذ اقدامات مدیریتی بهتر و جلوگیری از بهره‌برداری بی‌رویه از آب آنها را گوشزد می‌کند. گذشته از اینها، نظر به اهمیت برآورد مطمئن دبی کم‌آبی، به‌منظور تأمین آب برای محیط زیست و مدیریت کیفیت آب برای پایداری اکوسیستم‌های سالم، بایسته است به روش‌های مختلف بازسازی و تبدیل داده‌ها یا بسط مدل‌های آماری دیگر، دبی کمینهٔ ماهانه را در حوضهٔ آبریز کشف‌رود که با وضعیت نگران‌کنندهٔ هیدرولوژیکی روبه‌روست، تخمین زد.

منابع

امیراحمدی، ابوالقاسم، محمدنیا، ملیحه، گلشنی، نگار، (۱۳۹٤). **تحلیل حساسیت متغیرهای ژئومورفولوژی مؤثر بر سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS؛ مطالعهٔ موردی: زرچشمهٔ هونجان، استان اصفهان**، نشریهٔ هیدروژئومورفولوژی، شمارهٔ ۳، ٤۲-۲۱.

پایروند، وحید، سلاجقه، علی، مهدوی، محمد، زارع چاهوکی، محمدعلی، (۱۳۸۹). **بررسی و مقایسهٔ روش‌های تحلیل منطقه‌ای سیلاب در منطقهٔ البرز مرکزی**، نشریهٔ مرتع و آبخیزداری، شمارهٔ ۲، ۱٤۷-۱۳۱.

حجازی، اسدالله، مزبانی، مهدی، (۱۳۹٤). **برآورد مقادیر ارتفاع و دبی حداکثر رواناب با استفاده از روش شماره منحنی؛ مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز سراب دره‌شهر**، نشریهٔ هیدروژئومورفولوژی، شمارهٔ ۵، ۸۱-٦۳.

رامشت، محمدحسین، شاه‌زیدی، سمیه سادات، (۱۳۹۰). **کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی (ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، توریسم)**، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان، ٤۰۵ص.

رشید سرخ آبادی، مهدیه، شهیدی، علی، خاشعی سیوکی، عباس، (۱۳۹۳). **تحلیل مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت زاوه برای استفاده در شرب با تلفیق سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی و فرایند سلسله‌مراتبی**، فصلنامهٔ مهندسی آبیاری و آب، دورهٔ ۵، شمارهٔ ۱۷، ۱۰۹-۹٦.

رضایی، علی، مهدوی، محمد، لوکس، کارو، فیض نیا، سادات، مهدیان، محمدحسین، (۱۳۸٦). **مـدل‌سـازی منطقـه ای دبی‌های اوج در زیرحوضه‌های آبخیز سد سفیدرود با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی**، نشریهٔ علـوم و فنـون کشاورزی و منابع طبیعی، دورهٔ ۱۱، شمارهٔ ۱، ۳۹-۲۵.

شعبانی‌نیا، حسن، متولی، صدرالدین، جانباز قبادی، غلامرضا، خالدی، شهریار، (۱۳۹۹). **برآورد مقادیر ارتفاع رواناب و دبی حداکثر سیلاب با استفاده از تلفیق مدل های اتومات سلولی و SCS؛ مطالعـهٔ مـوردی: حوضـهٔ آبریـز لاویج‌رود**، مجلهٔ مخاطرات محیط طبیعی، دورهٔ ۹، شمارهٔ ۲٤ ، ۹۸-۷۹.

عنایتی، حمید، قزل‌سوفلو، عباسعلی، خامچین مقدم، فرهـاد، (۱۳۹۸). **بررسی روش‌های هیدرولوژیکی تعیین جریـان محیط‌زیستی رودخانهٔ حفاظت‌شدهٔ کشف‌رود**، نشریهٔ آبیاری و زهکشی ایران، دورهٔ ٦، شمارهٔ ۱۳، ۱۷۰۸-۱٦۹۸.

فرج‌زاده، منوچهر، رجایی نجف‌آبادی، سعید، قویدل رحیمی، یوسف، (۱۳۹۱). **آشکارسازی اثر نوسانات بـارش بـر رواناب سطحی حوضهٔ آبریز سرخس**، نشریهٔ مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دورهٔ ۲، شمارهٔ ۷، ۲٤-۱۱.

لطفی، زینـب، (۱۳۹۰). **بررسی حساسیت به فرسایش آبـی سـازندها در واحـدهای ژئومورفولـوژیکی**، پایـان‌نامـهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشکدهٔ جغرافیا و علوم محیطـی، دانشـگاه تربیـت معلم سبزوار.

ولی، عباسعلی، معیری، مسعود، رامشت، محمدحسین، موحدی‌نیا، ناصـر، (۱۳۸۹). **تحلیل مقایسهٔ عملکرد شبکه‌هـای عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی رسوب معلق؛ مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز اسکندری واقـع در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود**، فصلنامهٔ پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شمارهٔ ۷۱، ۳۰-۲۱.

نعیمی کلورزی، زهرا، قربانی، خلیل، سالاری جزی، میـثم، دهقـانی، امیراحمـد، (۱۳۹۵). **بـرآورد جریـان ماهانـه در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از پارامترهای اقلیمی و فیزیوگرافی حوضه**، نشریهٔ پژوهش‌های حفاظـت آب و خاک، دورهٔ ۲۳، شمارهٔ ۳، ۲۲٤-۲۰۷.

Aryal, S.K., Zhang, Y., & Chiew, F., (2020). **Enhanced low flow prediction for water and environmental management**, Journal of Hydrology, Vol 584: 124658.

Besaw, L.E., Rizzo, D.M., Bierman, P.R., & Hackett, W.R., (2010). **Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks**. Journal of Hydrology, Vol 386 (1-4): 27-37.

Georgakakos, A.P., Yao, H., & Georgakakos, K.P., (2014). **Ensemble stream flow prediction adjustment for upstream water use and regulation**, Journal of Hydrology, Vol 519: 2952-2966.

Hadi, S.J., & Tombul, M., (2018). **Forecasting daily stream flow for basins with different physical characteristics through data-driven methods**, Journal of Water Resources Management, Vol 32 (10): 3405-3422.

Mohamoud, Y.M., (2008). **Prediction of daily flow duration curves and stream flow for ungauge catchments using regional flow duration curves**, Hydrological Sciences Journal, Vol 53 (4): 706-724.

Swain, J.B., & Patra, K.C., (2017). **Stream flow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques**, Journal of Hydrology, Vol 554: 420-433.

Wanders, N., & Wada, Y., (2015). **Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought**, Journal of Hydrology, Vol 526: 208-220.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی