

Effect of curve number changes on flood hydrograph in a rapid response watershed (Case study: Ardabil Khiavchai Watershed)

Majid Raof ^{1*}, Jila Kazemi ², Raof Mostafazadeh ³, Yaser Hoseini ⁴, Sajjad Mirzaei ⁵

¹ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

³ Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

⁴ Professor, Department of Water Engineering, Moghan Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

⁵ Ph.D. Student, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University Tarbiat Modarres, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Runoff and the rainfall-runoff relationship are one of the most fundamental research topics in hydrology. Due to the increasing trend of flood occurrence and the resulting damages, it is necessary to determine the flood-producing priority areas and prioritize the sub-watersheds in terms of flood control projects and integrated management of watersheds. The primary contributing areas in runoff generation and the affecting factors should be identified in a flood management project. Understanding the flood occurrence potential of watersheds can be useful in formulating different flood management plans, allocating necessary funds, water resources management, watershed management, and erosion control programs. Watershed Modeling System (WMS) as an integrated flood modeling software can simulate flood hydrographs considering the required parameters. Among the common runoff estimation methods, the SCS curve number method is the most common in estimating flood volume and flood runoff height. Land use changes as an important factor in the alteration of watershed hydrologic response can accelerate soil erosion and biodiversity loss. Land use change affects the curve number and consequently, discharge and flood hydrographs, as assessed in the current study.

Materials and Methods

The Khiavchai Watershed, with an area of about 134 km² has been chosen as the study area. The annual rainfall of the study area is 343.8 mm. Toward the hydrologic modeling in the study area, the slope map of the watershed has been derived from the DEM of the study area using the ArcMap software. The maximum daily rainfall of 11 rating gauge stations has been obtained and the raw data has been processed using a common statistical test to check the data quality and homogeneity of SPSS software. The maximum 24-h rainfall data were analyzed using Easy Fit software to select the best statistical distribution. The 3-parameter Pearson distribution (as the best probability distribution function), has been used to calculate the rainfall values in 2 to 100-year return periods. The maximum daily rainfall values were entered into the ArcGIS software and the spatial distribution mapping was done using the IDW method. The average maximum daily precipitation with different return periods was converted to 6-h precipitation. The SCS and WMO rainfall patterns were compared in the study area, and the WMO rainfall patterns were selected as the appropriate input for the model. The maximum annual instantaneous discharge values have been used in estimating the flood discharge in 2, 5, 10, 25, 50, and 100-year return periods using EasyFit software. The input model parameters (slope map, slope direction, curve number, and soil hydrological group) were prepared in ArcGIS and Arc-Hydro software.

Results and Discussion

The results showed that the maximum flood discharge increases intensely with an increase in the return period. The average CN value of the basin was obtained at 76, the initial loss coefficient was obtained at 0.202, and the STRTL

value was obtained at 16.203. According to the increasing curve number values, the infiltration time and the time to reach the peak are reduced. Therefore, by increasing the curve number by 5, 15, and 25%, respectively, the time to reach the peak is 240, 180, and 135 min, and the base time of the hydrograph has decreased by 1035, 885, and 750 min. Meanwhile, the peak value of the simulated flood hydrograph has increased from 1.74 to 6.466, 27.491, and 109.694 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. With an increase of 25% curve number, the peak discharge in the return period of 10, 25, 50, and 100 years has increased to 13, 9, 7.5, and 6.3, respectively. The results show that the effect of changes in curve number values on the flood discharge, in the low return period is much more than the high return period. So in the return period of 100 years with 25% changes in curve number, the peak flood discharge value is 6.38 times in the 2-year return period. The results indicate that the least change in the type of land use (in order to reduce permeability) causes a considerable increase in flood discharge in the region.

Conclusion

The effects of changes in CN values have been assessed in the current research in a modeling framework to estimate the flood hydrograph components. Comparison of the estimated flood hydrograph components against observation values has been evaluated using relative error and root mean square error. The values of these statistical indices were obtained with the least error related to the 3-parameter lognormal distribution of about 10.32% and 8.68 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. By comparing the results of the maximum flood analysis and the WMS model, it can be concluded that the simulated data are consistent with the observed flood records in the Pole-Solatani river gauge station located at the outlet of the Khiavchai Watershed.

Keywords: Arc-Hydro, Land use change, Maximum flow of flood hydrograph, SCS, WMS

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We sincerely thank the University of Mohaghegh Ardabili for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts 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 and the modeling results are presented in the manuscript text.

Authors' contribution

Majid Raof: Conceptualization, Supervision, Editing; **Jila Kazemi:** Resources, Software, Writing original draft preparation; **Raof Mostafazadeh:** Conceptualization, Editing, Analysis; **Yaser Hoseini:** Consultation, Analysis; **Sajjad Mirzaei:** Software, Data analysis.

*Corresponding Author, E-mail: m_raoof@uma.ac.ir

Citation: Raof, M., Kazemi, J., Mostafazadeh, R., Hoseini, Y., & Mirzaei, S. (2024). Effect of curve number changes on flood hydrograph in a rapid response watershed (Case study: Ardabil Khiavchai Basin). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 248-261.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12295.1221

Received: 06 February 2023, Received in revised form: 25 February 2023, Accepted: 25 February 2023, Published online: 25 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 248-261

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثر تغییر شماره منحنی روی هیدروگراف سیلاب در یک حوزه آبخیز عکس‌العمل سریع (مطالعه موردی: حوزه آبخیز خیاوچای اردبیل)

مجید رئوف^{۱*}، ژیلا کاظمی^۲، رئوف مصطفی‌زاده^۳، یاسر حسینی^۴، سجاد میرزایی^۵

^۱ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۳ دانشیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۴ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۵ دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

ارتباط بارندگی-رواناب یکی از پراهمیت‌ترین موضوع‌ها در هیدرولوژی است. سیستم مدل‌سازی حوزه‌های آبخیز (WMS) یکی از نرم‌افزارهایی است که می‌تواند هیدروگراف سیلاب مربوط به حوزه‌های آبخیز را شبیه‌سازی کند. منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز خیاوچای، با مساحت حدود ۱۳۴ کیلومتر مربع در غرب استان اردبیل، جنوب شهرستان مشگین‌شهر واقع شده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر شماره منحنی روی هیدروگراف سیلاب در یک حوزه آبخیز دارای عکس‌العمل سریع انجام شد. در این پژوهش از بارش حداکثر روزانه ۱۱ ایستگاه استفاده و توزیع آماری پیرسون تیپ ۳ با استفاده از نرم‌افزار EasyFit انتخاب و مقادیر بارش در دوره‌های بازگشت دو تا ۱۰۰ ساله محاسبه شد. بارش حداکثر روزانه وارد نرم‌افزار GIS شده و مجدد نرمال بودن داده‌ها کنترل شدند. همچنین، با روش IDW، درون‌یابی انجام شد. میانگین حداکثر بارش روزانه با دوره‌های بازگشت مختلف به بارش شش ساعته تبدیل شد. برای حوزه آبخیز الگوی بارش SCS و WMO مقایسه شدند و الگوی بارش WMO انتخاب شد. حداکثر دبی مشاهداتی حوزه آبخیز با EasyFit برای دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال محاسبه شد. با استفاده از GIS نقشه‌های فیزیوگرافی تهیه شد. با نرم‌افزار Arc Hydro نقشه DEM اصلاح شد. شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب برای دوره‌های بازگشت دو تا ۱۰۰ ساله انجام شد و دبی حداکثر سیلاب شبیه‌سازی شده با دبی سیلاب مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار خطای نسبی و میانگین ریشه مربعات خطا برای دوره‌های بازگشت دو تا ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۹/۱۳ درصد و ۸/۱۶ متر مکعب بر ثانیه محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب نشان داد که با افزایش دوره بازگشت حداکثر دبی با شیب بیش‌تر افزایش می‌یابد. اثر تغییر شماره منحنی روی دبی‌های حداکثر سیلاب در دوره بازگشت کم به مراتب بیش‌تر از دوره بازگشت زیاد است، به نحوی که در دوره بازگشت ۱۰۰ سال با افزایش ۲۵ درصد شماره منحنی دبی حداکثر سیلاب ۶/۳۸ برابر شده، درحالی‌که در دوره‌های بازگشت دو سال دبی حداکثر ۶۳ برابر افزایش داشته است. نتایج حاکی از آن است که کم‌ترین تغییر در نوع کاربری باعث افزایش شدید دبی سیلاب در منطقه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر کاربری اراضی، حداکثر دبی هیدروگراف سیلاب، Arc-Hydro، SCS، WMS

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_raoof@uma.ac.ir

استناد: رئوف، مجید، کاظمی، ژیلا، مصطفی‌زاده، رئوف، حسینی، یاسر و میرزایی، سجاد (۱۴۰۳). اثر تغییر شماره منحنی روی هیدروگراف سیلاب در یک حوزه آبخیز عکس‌العمل سریع (مطالعه موردی: حوزه آبخیز خیاوچای اردبیل). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۲۶۱-۲۴۸.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12295.1221

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۲۴۸ تا ۲۶۱

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

برآورد رواناب سطحی بر اساس داده‌های بارش یکی از پیش نیازهای برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های منابع آب است. تعیین مناطق مستعد سیلاب به‌منظور مدیریت حوزه آبخیز و کاهش از دست رفتن پتانسیل‌های زندگی در آن بسیار حائز اهمیت است (Xiao et al., 2017). مسلماً برای انجام این کار نیاز به شناسایی مناطق سیل‌خیز در داخل حوزه آبخیز است؛ زیرا به دلیل وسعت زیاد و گستردگی حوزه‌های آبخیز انجام عملیات اجرایی و اصلاحی در سراسر حوزه آبخیز امکان‌پذیر نبوده و حتی در صورت عدم بررسی دقیق می‌تواند امکان تشدید دبی اوج با تغییر هم‌زمانی دبی‌های اوج زیرحوزه‌های آبخیز سبب شود. لذا، باید به‌طریقی مناطقی که پتانسیل بالایی در تولید سیل دارند شناسایی شوند، تا امکان عملیات اجرایی و اصلاحی در سطوح کوچک‌تر و خطرناک‌تر فراهم شود (Sayyad et al., 2022). با توجه به کمبود ایستگاه‌های آب‌سنجی در سطح زیرحوزه‌های آبخیز و کم‌بودن آمار و اطلاعات ثبت شده از سیل در حوزه‌های آبخیز کشور، به‌طور عملی نمی‌توان شدت سیل‌خیزی زیرحوزه‌های آبخیز را به‌تنهایی از تحلیل داده‌های موجود استنتاج نمود (Nohegar et al., 2011).

شناخت رفتار رواناب در هر حوزه آبخیز نیازمند درک عمیق از فرآیندها و تعاملات بین جریان، رهاسازی و ذخیره جریان در مخازن است (Gumindoga et al., 2017). در بین روش‌های متداول برآورد رواناب، روش شماره منحنی^۱ SCS که اکنون روش شماره منحنی سرویس حفاظت منابع طبیعی (NRCS-CN)^۲ نامیده می‌شود رایج‌ترین روش برآورد پیش‌بینی حجم سیل و ارتفاع رواناب سیل است (Ebrahimian, 2012). با توجه به این‌که شهرستان مشگین‌شهر در پایین‌دست حوزه آبخیز خیاوچای قرار گرفته است و در هر لحظه با خطر سیلاب مواجه است، لزوم توجه به خطر سیلاب این حوزه آبخیز بیش از پیش ضروری است (Hosseinzadeh et al., 2014). با توجه به این‌که در اغلب حوزه‌های آبخیز کشور، وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد، تعیین مناطق اولویت مولد سیل و اولویت‌بندی زیرحوزه آبخیز از نظر پروژه‌های کنترل سیل و مدیریت جامع آبخیزها ضرورت دارد (Saghafian and Farazjou, 2007). آگاهی از میزان پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز می‌تواند در تدوین برنامه‌های مختلف برای مدیریت بحران، اختصاص بودجه لازم، مدیریت منابع آب، آبخیزداری و برنامه‌های مقابله با فرسایش بسیار مفید باشد (Rostami and Najafzadeh, 2012). در اغلب

حوزه‌های آبخیز ایران، فرسایش شدید و وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد؛ بنابراین، اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز و شناسایی مناطق مستعد سیلاب از نظر پروژه‌های کنترلی و مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز ضرورت دارد (Saghafian and Farazjou, 2007; Mostafazadeh et al., 2017). در یک حوزه آبخیز، نخستین نیاز جهت بهبود وضعیت بحرانی تعیین حوزه آبخیز و زیرحوزه‌های آبخیز بحرانی‌تر و شناخت مناطق مستعد خطر سیلاب است. بنابراین، در صورت اقدام عملیات کنترلی، مناطق دارای اولویت بالاتر، بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد و برنامه‌های حفاظتی در این مناطق متمرکز می‌شود. از طرف دیگر مناطق کوهستانی نسبت به تهدیدهای سیلاب بیش‌تر آسیب‌پذیر هستند؛ زیرا از حوزه‌های آبخیز کوچک‌تر و پرشیب‌تری تشکیل شده‌اند؛ که باعث حرکت و جریان سریع دبی اوج در امتداد رودخانه می‌شود (Nedko and Bukhard, 2012). چنان‌که در مناطق کوهستانی به‌دلیل کوتاه بودن زمان واکنش بارش-رواناب وقوع سیلاب‌های ناگهانی، معمول است (Barros, 2013). در این راستا، Chandniha and Kansal (2017) در حوزه آبخیز پی پریا^۳ در شرق هند، پارامترهای موفومتری خطی (طول آبراهه، طول کل آبراهه، محیط حوزه آبخیز، حداکثر طول حوزه آبخیز)، پارامترهای مربوط به شکل حوزه آبخیز (فاکتور شکل، ضریب گردی، ضریب کشیدگی و ضریب فشردگی)، ناهمواری حوزه آبخیز، تراکم زهکشی، بافت زهکشی و نسبت انشعاب را با روش‌های مکانی و سنجش از دور^۴ استخراج کردند. سپس بر اساس مقادیر کمی این پارامترها در هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز پارامترهای مذکور را رتبه‌بندی نمودند. به‌منظور تعیین اولویت هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز روش رتبه ترکیبی^۵ تمامی پارامترهای زیرحوزه آبخیز به‌کار رفت. برای این منظور رتبه پارامترهای هر زیرحوزه آبخیز جمع و در تعداد پارامترها تقسیم شدند. در نهایت با توجه به مقادیر کمی رتبه ترکیبی زیرحوزه‌های آبخیز، اولویت هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز را برای اجرای اقدامات مدیریتی مورد مطالعه تعیین کردند. پژوهش‌های دیگری نیز انجام شده، از جمله Rezaei Moghadam et al. (2015) اثرات تغییر کاربری اراضی و پوشش اراضی بر روی سیل‌خیزی و دبی رواناب حوزه آبخیز سد علویان را بررسی کردند، نتیجه حاکی از افزایش رواناب یا به‌عبارتی سیل‌خیز شدن حوزه آبخیز بر اثر تغییر کاربری و پوشش اراضی است. با توجه به‌وجود رابطه بین بارش و دبی در

³ Piperiya⁴ Remote sensing⁵ Composite score¹ Soil conservation service² Natural resources conservation service

شبیه‌سازی بارش-رواناب در سطح زیرحوزه‌های آبخیز و از روش ماسکینگام به‌منظور روندیابی هیدروگراف سیل خروجی حوزه آبخیز استفاده کردند. سپس، با روش حذف متوالی، میزان مشارکت زیرحوزه‌های آبخیز را در دبی اوج خروجی حوزه آبخیز تعیین کردند. نتایج روندیابی سیل در آبراهه‌ها نشان داد که میزان مشارکت زیرحوزه‌های آبخیز در سیل خروجی متناسب با دبی اوج زیرحوزه‌های آبخیز نیست. نتایج اولویت‌بندی از نظر دبی اوج، براساس سهم مشارکت هر زیرحوزه آبخیز در محل خروجی حوزه آبخیز نشان داد که زیرحوزه‌های آبخیز درکش ورکش و بهشت‌آباد به‌ترتیب با ۲۹/۱۶ و ۲/۵ درصد، بیش‌ترین و کم‌ترین سهم را در دبی اوج سیلاب خروجی از حوزه آبخیز بر عهده دارد. همچنین، نتایج اولویت‌بندی براساس کاهش دبی به ازای واحد سطح نیز نشان داد که زیرحوزه آبخیز بهشت‌آباد با داشتن کم‌ترین مساحت نسبت به بقیه زیرحوزه‌های آبخیز بیش‌ترین و زیرحوزه آبخیز تنگ دهنو کم‌ترین تأثیر را دارد.

از سایر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به پژوهش Klari and Ibrahim (2021) که برای تخمین رواناب حوزه آبخیز گالی بندوا^۱ در شمال عراق از روش SCS-Curve Number استفاده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که از کل بارندگی سالانه حدود ۱۱/۴ درصد به رواناب تبدیل می‌شود و رویکرد مورد استفاده را برای برنامه‌ریزی اقدامات مختلف حفاظتی در سایر مناطق مشابه توصیه نمودند. در کشور عربستان نیز، Aldrees et al. (2021) با هدف برآورد هوشمند دبی اوج هیدروگراف در حوزه آبخیز العقیق از مدل NRCS-CN استفاده نمودند. ایشان بر اهمیت استفاده یکپارچه از خروجی‌های پردازش دیجیتال مدل رقومی ارتفاع در استخراج متغیرهای مورفومتریک لازم برای محاسبه زمان تمرکز، دبی اوج هیدروگراف واحد، نقشه کاربری زمین و تعیین شماره منحنی تأکید نمودند و نتیجه گرفتند که نتایج برآورد رواناب پس از واسنجی در حوزه‌های آبخیز مختلف قابل استفاده است. همچنین، Niyazi et al. (2022) باهدف بهینه‌سازی پارامترهای روش سرویس حفاظت خاک (SCS) برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز اللیت خشک غرب عربستان سعودی نتیجه گرفتند که بین پیک دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و حجم رواناب رویدادهای مورد مطالعه، اختلاف قابل‌توجهی وجود دارد. آن‌ها دلیل این امر را عدم قطعیت‌های ذاتی در فرآیندهای هیدرولوژیکی ناشی از عدم اندازه‌گیری دقیق بارندگی در مناطق خشک بیان کردند. در نهایت، Rashid (2022) با هدف برآورد رواناب سطحی در شهر سلیمانیه عراق از روش شماره منحنی

بازه‌های زمانی تعیین شده، تغییر کاربری باغ به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در کاهش دبی مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهشی، Tawakli et al. (2014) به‌بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از عکس هوایی در حوزه آبخیز آتسگاه استان اردبیل پرداختند. نتایج بررسی در بین سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۳۹۰ نشان داد که اراضی روستایی، اراضی دیم و مراتع متوسط نسبت به سال ۱۳۴۷ افزایش و اراضی کشاورزی و فاقد پوشش کاهش و مراتع متراکم و کم تراکم کاهش یافته است. این تغییرات کاربری اراضی در زیر حوزه‌های آبخیز از لحاظ تأثیر در شماره منحنی قابل مشاهده ولی به‌طور کلی در متوسط شماره منحنی حوزه آبخیز آن‌چنان تغییری حاصل نشده است.

در پژوهشی، Khattat et al. (2016) برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز مراکش به مطالعه تطبیقی دو مدل مختلف هیدرولوژیکی HMS-HEC و ATHYS پرداختند. ارزیابی آماری نشان داد که همبستگی خوب بین دبی رودخانه مشاهده شده و شبیه‌سازی ماهانه در دوره واسنجی بوده است، به‌طوری‌که در مدل ATHYS مقدار NSE برابر ۰/۷۴ و در مدل HEC-HMS مقدار شاخص NSE برابر ۰/۷۳ بوده است. همچنین در خصوص مدل ATHYS و HEC-HMS، مقادیر RSR به‌ترتیب برابر ۰/۳۹ و ۰/۳۶ بوده است. از طرفی، در دوره اعتبارسنجی نیز مقادیر شاخص دارای کارایی قابل‌قبولی بوده است و در مجموع عملکرد مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس دامنه مقادیر ضریب کارایی بین صفر تا ۰/۵ برای شاخص RSR و ۱/۵ تا ۱ برای شاخص NSE در دسته عملکرد بسیار خوب ارزیابی شده است. علاوه بر این، تفاوت میانگین بین کل جریان ماهانه مشاهده شده است و شبیه‌سازی چهار درصد است که تأییدکننده کارایی مدل است. در ادامه، Rahman et al. (2015) با انجام پژوهشی در سرشاخه‌های وادی اللیت در شرق عربستان که به‌دلیل شرایط دائمی خشک، تلفات رواناب بالایی در اثر فرآیند روندیابی بالایی دارد، به بررسی تأثیر روندیابی بر مقدار تلفات رواناب سطحی پرداختند. این پژوهش‌گران به‌منظور بررسی اثر روندیابی بر کاهش مقادیر رواناب، از مدل HEC-HMS و روش روندیابی ماسکینگام کانژ استفاده کردند، که نتایج مطلوبی از این مدل ارائه شد. بررسی تأثیر روندیابی نیز نشان داد که بیش‌ترین تلفات بارش کل، مربوط به تلفات روندیابی هست و مقادیر این تلفات با افزایش مساحت حوزه آبخیز و کاهش شیب بیش‌تر می‌شود.

در پژوهش دیگری، Badri et al. (2017) در حوزه آبخیز بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری با کاربرد مدل HEC-HMS به اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز از نظر پتانسیل سیل‌خیزی پرداختند. برای این منظور از روش SCS برای

^۱ P- Gali-Bandawa

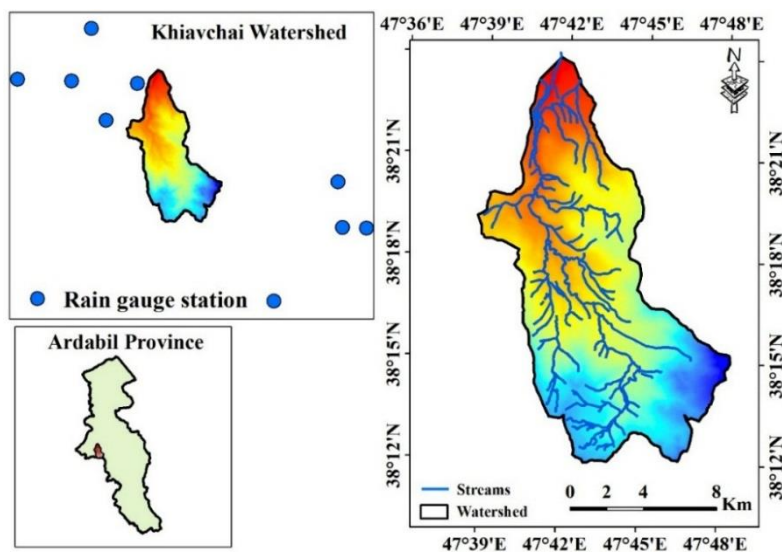
خاک‌شناسی و وقوع بارش‌هایی با دوره بازگشت مختلف به صورت یکنواخت روی حوزه آبخیز مورد نظر است. لذا، هدف از این پژوهش مدل‌سازی هیدرولوژیک و استخراج هیدروگراف سیلاب و بررسی سهم عوامل مؤثر بر آن برای بارش‌های با دوره بازگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال برای حوزه آبخیز خیاوچای در استان اردبیل است. علاوه بر این، ارزیابی تأثیر تغییرات شماره منحنی در دوره‌های بازگشت مختلف، بر میزان دبی سیلاب و ویژگی‌های هیدروگراف سیل از مواردی است که این پژوهش را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌سازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز خیاوچای با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۹ دقیقه ۲۰ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه و ۴۷ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه ۴ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۱۰ ثانیه عرض شمالی در غرب استان اردبیل، جنوب شهرستان مشگین‌شهر و شمال‌غربی سبلان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع این حوزه آبخیز از سطح دریا ۲۳۶۸ متر بوده که از جنوب به شمال کاهش می‌یابد. بیش‌تر بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی حوزه آبخیز را ارتفاعات و شمال‌شرق و غرب را اراضی پست و تپه‌ماهوری تشکیل می‌دهند. بستر رودخانه این حوزه آبخیز در بالادست عمدتاً دارای شیب زیاد بوده و جزء روخانه‌های جوان است. شیب متوسط، مساحت و بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه به ترتیب، ۱۹/۶ درصد، ۱۳۴ کیلومتر مربع و ۳۴۳/۸ میلی‌متر است (Abedini and Fathi, 2014).

(SCS-CN) استفاده کرد. سنجش از دور و ArcGIS برای تولید بانک اطلاعاتی داده‌های مکانی، نقشه خاک، گروه خاک هیدرولوژیکی، نقشه کاربری/پوشش اراضی استفاده شد. ایشان پس از برآورد میانگین رواناب سالانه در یک دوره ۲۵ ساله، میزان ضریب تعیین بین بارندگی و رواناب را ۰/۸۹ برآورد نمود. رودخانه خیاوچای به دلیل عبور از محدوده شهرستان مشگین‌شهر، قرار گرفتن بسیاری از مراکز مسکونی و تفریحی در نزدیکی حریم این رودخانه و تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، یکی از رودخانه‌های مهم استان اردبیل است. در این حوزه آبخیز به دلیل حاکم بودن شرایط کوهستانی و پرشیب، اغلب زیرحوزه‌های آبخیز آن از نظر سیل‌خیزی دارای پتانسیل خطر بالایی است که واکنش هیدرولوژیک حوزه آبخیز را سریع نموده است. بنابراین جهت انجام اقدامات کنترل سیلاب، شناسایی زیرحوزه آبخیز سیل‌خیز در داخل حوزه آبخیز ضرورت دارد. به دلیل وسعت زیاد و گستردگی حوزه‌های آبخیز انجام عملیات اصلاحی در سراسر حوزه آبخیز امکان‌پذیر نیست. بنابراین ضرورت دارد که مناطق دارای پتانسیل بالا در تولید سیل شناسایی شود، تا امکان عملیات اجرایی و اصلاحی در سطوح کوچک‌تر و خطرناک فراهم شود. مطالعات مربوط به شناسایی مناطق دارای توان سیل‌خیزی و تولید رواناب و جمع‌آوری آب‌های سطحی مخرب ناشی از وقوع رگبارهای شدید، می‌تواند راه‌گشای بخشی از مشکلات باشد. فرضیات در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی هیدروگراف حوزه آبخیز خیاوچای توسط نرم‌افزار WMS با خطای کم، تأثیرگذاری متفاوت مناطق مختلف حوزه آبخیز بر ایجاد رواناب، یکنواختی خاک زیرحوزه آبخیز در زیربخش‌های مجزا شده در نقشه‌های



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی حوزه آبخیز خیاوچای به همراه موقعیت حوزه آبخیز در استان اردبیل و کشور

Figure 1- The location of meteorological stations in the Khiavchai Watershed along with the location of the basin in Ardabil province and the country

بازگشت مختلف و متغیر کمی ارتفاع نشان داد که داده‌های این عوامل نرمال هستند (Murthy and SAbbaiah, 2007). همچنین، حداکثر بارش شش ساعته با دوره بازگشت مورد نظر $P_{6,T}$ از روی حداکثر بارش ۲۴ ساعته با همان دوره بازگشت استخراج شد. جهت تعیین تغییرات مکانی بارش از روش معکوس وزنی فاصله (IDW) جهت تهیه نقشه بارش ۲۴ ساعته استفاده شد، سپس متوسط وزنی بارش در هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز خیاوچای برای دوره بازگشت دو تا ۱۰۰ ساله محاسبه شد.

۲-۵- مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل WMS

مدل‌های بارش-رواناب مانند سیستم مدل‌سازی حوزه آبخیز (WMS) ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز و رواناب تولیدی است. در مدل WMS فن‌آوری جمع‌آوری داده‌ها، ذخیره‌سازی و مدیریت روی آن‌ها با کمک ArcGIS بهبود یافته است. در این پژوهش جهت استخراج زمان تمرکز حوزه آبخیز از روش زمان تأخیر سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شده است. با توجه به اهمیت اطلاع از میزان ارتفاع رواناب، برای همین منظور و تعیین هیدروگراف سیلاب حوزه آبخیز خیاوچای از روش SCS استفاده شد. جهت تخمین حداکثر سیلاب این حوزه آبخیز به روش SCS از بارش حداکثر روزانه که از توابع توزیع احتمالاتی به دست آمده بود استفاده شد. مقدار CN متوسط حوزه برابر ۷۶ به دست آمد و ضریب تلفات اولیه برابر $0/۲۰۲$ و مقدار STRTL برابر $۱۶/۲۰۳$ وارد نرم‌افزار WMS شده و حداکثر دبی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف به دست آمد. در مرحله واسنجی مدل WMS برای حوزه آبخیز خیاوچای سه پارامتر شماره منحنی، STRTL و زمان تأخیر تغییر پیدا کرد و با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت (Mirzania et al., 2021). مقدار شماره منحنی از $۷۷/۷۴$ به $۰/۲$ ، ضریب تلفات اولیه از $۰/۲$ به $۰/۲۰۲$ و زمان تأخیر نیز از $۲/۱۸۵$ به $۲/۴۳۹$ تغییر یافت. مرحله اعتبارسنجی توسط یک واقعه متناظر صورت گرفت و درصد خطای نسبی دبی شبیه‌سازی شده با مشاهداتی برابر $۷/۹۲$ درصد به دست آمد. جدول ۱ برخی مشخصه‌های زیرحوزه‌های آبخیز و جدول ۲ مشخصات مورفومتری حوزه آبخیز را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، تأثیر تغییرات شماره منحنی بر هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شد. در این راستا، مقادیر دامنه ۱۰ درصدی افزایش و کاهش تغییر داده شدند. مبنای انتخاب دامنه تغییرات و درصد تغییر در اعداد شماره منحنی، مقادیر شماره منحنی محاسباتی حوزه آبخیز بوده است که برابر عدد $۷۷/۷۴$ محاسبه شده است. در این راستا، در هر بار شبیه‌سازی

۲-۲- تهیه نقشه‌های مکانی مورد استفاده در مدل‌سازی

در این پژوهش جهت تعیین نقشه شیب، در محیط ArcMap نقشه DEM را فراخوانی کرده و با استفاده از ابزارهای موجود شیب برحسب درجه و درصد به دست آمده است. نقشه‌های توپوگرافی مورد نیاز طرح، با توجه به وسعت منطقه، نقشه‌های موجود و دقت مورد نیاز، در مقیاس $۱:۲۵۰۰۰$ یا بزرگ‌تر، نقشه‌های زمین‌شناسی، $۱:۱۰۰۰۰۰$ و نقشه‌های خاک‌شناسی در مقیاس $۱:۲۵۰۰۰۰$ تهیه شد. جهت مدل‌سازی زیرحوزه‌های آبخیز با استفاده از نقشه توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، ابتدا مرز حوزه آبخیز و زیرحوزه‌های آبخیز و نقشه آبراهه‌ها تهیه شد. لایه‌های تهیه شده جهت اصلاح نقشه DEM اولیه به کار گرفته شد. ابتدا نقشه DEM تهیه شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار Arc-Hydro و اعمال اصلاحات مربوط به تحمیل آبراهه‌ها، مرز حوزه آبخیز و مرز زیرحوزه‌های آبخیز واقعی نقشه Hydro DEM تهیه شد. در ادامه از طریق این DEM اقدام به مدل‌سازی زیرحوزه‌های آبخیز در نرم‌افزار HEC-geoHMS شد.

۲-۳- تهیه داده‌های هواشناسی و هیدرومتری

برای بررسی داده‌های مربوط به دبی حوزه آبخیز از ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی و به منظور تحلیل بارش سالانه و حداکثر بارش ۲۴ ساعته از منطقه، از آمار ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی در درون و خارج از حوزه آبخیز استفاده شد (شکل ۱).

۲-۴- آزمون و پردازش داده‌های بارش

به منظور بازسازی داده‌های بارش روش‌های متعددی وجود دارد با توجه به این که آمار برخی ایستگاه‌ها دارای نواقص بود، بنابراین به منظور رفع نواقص آماری از روش نسبت نرمال استفاده شد. همچنین، همگنی و تصادفی بودن داده با روش غیرنمونه‌برداری ران‌تست و استقلال داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. آزمون همگنی ران‌تست تمامی ایستگاه‌ها را همگن نشان داد. همچنین، تعدادی از ایستگاه‌ها دارای نواقص آماری بودند که با استفاده از روش نسبت نرمال اقدام به بازسازی بارندگی ۲۴ ساعته منطقه شد. در این مطالعه جهت سنجش نزدیکی خصوصیات آماری داده‌ها با یک توزیع تئوری مورد نظر از آزمون‌های نکویی برازش کای اسکور^۱، کلموگراف اسمیرنوف^۲ و آندرسون-دارلینگ^۳ استفاده شد. بررسی چولگی و کشیدگی داده‌های حداکثر بارش روزانه در دوره‌های

^۱ Digital elevation model

^۲ Chi-Square

^۳ Kolmogorov-Smirnov

^۴ Anderson-Darling

۶-۲- تحلیل دبی حداکثر سیلاب بر اساس داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای سیلاب

به‌منظور برآورد حداکثر دبی سیلاب در دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ از دوره آماری ۴۶ ساله ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع در خروجی حوزه آبخیز خیاوچای استفاده شد. بدین‌منظور، داده‌های حداکثر دبی سیلاب در نرم‌افزار SPSS از لحاظ نرمال بودن و همگنی بررسی و انتقال داده‌ها در این نرم‌افزار مورد تأیید قرار گرفت. سپس داده‌های دبی حداکثر سیلاب وارد نرم‌افزار EasyFit شدند.

مقادیر شماره منحنی در دامنه ۱۰ درصدی افزایش و کاهش تغییر داده شدند تا تأثیر تغییرات آن بر دبی اوج و مؤلفه‌های هیدروگراف سیلاب ارزیابی شوند. قابل ذکر است که دامنه تغییرات مذکور بر اساس شناخت از منطقه مورد مطالعه و مطابق با امکان تغییر در پوشش گیاهی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of rain gauge stations in the study area

ردیف	ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
1	آبیاری مشگین	1485	38-23-55	47-41-12
2	قینرجه	1594	38-19-34	47-25-24
3	لای	2038	38-16-55	47-54-25
4	قره باغلار	1110	38-27-33	47-35-23
5	اهل ایمان	1110	38-23-53	47-28-21
6	مجنده	1592	38-21-27	47-37-22
7	موئیل	2200	38-23-17	47-33-28
8	سئین	1997	38-12-11	48-11-28
9	آتشگاه	1778	38-12-58	48-13-31
10	دوست‌بیگلو	816	38-32-55	47-32-16
11	شمشیرخانی	2160	38-16-15	48-11-33

جدول ۲- مشخصات فیزیوگرافی و مورفومتری حوزه آبخیز خیاوچای

Table 2- Physiographic and morphometric characteristics of Khiavchay Watershed

حوزه آبخیز	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	طول حوزه ضریب شکل آبخیز (کیلومتر)	ضریب فشردگی هورتون (F.F.)	ضریب فشردگی گراولوس (C.C.)	ضریب گردی میلر (Rc)	ضریب کشیدگی شیوم (E)	مستطیل معادل (p)	عامل شکل حوزه آبخیز	شیب متوسط (درصد)	ارتفاع متوسط (متر)
خیاوچای	133.44	212.57	23.009	0.039	5.20	0.04	0.22	86.302	2.51	3.77	2919.5

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به انتخاب مناسب‌ترین توزیع آماری در هر ایستگاه براساس آزمون نکویی برازش کای اسکوتر، کلموگروف-اسمیرنوف و آندرسون نشان می‌دهد برای پنج ایستگاه توزیع پیرسون تیپ ۳، برای سه ایستگاه توزیع لوگ نرمال سه‌پارامتره و سه ایستگاه توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ مناسب‌ترین توزیع‌ها است، لذا در بین ۱۱ ایستگاه تابع توزیع احتمالاتی پیرسون سه‌پارامتره مناسب‌ترین تابع در ایستگاه‌های مورد بررسی است، که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

با استفاده از پارامترهای توزیع‌های لوگ نرمال سه‌پارامتره، لوگ پیرسون سه‌پارامتره و پیرسون سه‌پارامتره حداکثر دبی دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله محاسبه شد. با توجه به جدول ۴، در دوره‌های بازگشت پایین یعنی دو تا

۱۰ سال مقدار دبی تقریباً برابری به‌دست آمده است، ولی در دوره‌های بازگشت بالا اعداد کمی متفاوت بوده است. توزیع لوگ نرمال سه‌پارامتره و لوگ پیرسون سه‌پارامتره دبی‌ها تقریباً یکسان است. به‌طور کلی با افزایش دوره بازگشت، میزان دبی‌ها نزدیک به مشاهداتی بوده و خطای آن کم‌تر است. شکل ۲ نقشه شماره منحنی را نشان می‌دهد. براساس آن بیش‌ترین درصد مساحت به‌ترتیب مربوط به شماره منحنی ۷۴ (۲۴/۸۸ درصد)، ۷۹ (۲۱/۳۲ درصد)، و ۸۴ (۱۲/۰۶ درصد) است. جدول ۵ متوسط وزنی شماره منحنی را در حوزه آبخیز و زیرحوزه‌های آبخیز نشان می‌دهد که بر اساس آن متوسط وزنی شماره منحنی حوزه آبخیز ۷۷/۷۴ محاسبه شد. همچنین، بیش‌ترین متوسط وزنی شماره منحنی مربوط به زیرحوزه آبخیز H و کم‌ترین مربوط به زیرحوزه آبخیز F است.

جدول ۳- متوسط حداکثر بارش حوزه آبخیز خیاوچای (میلی‌متر)

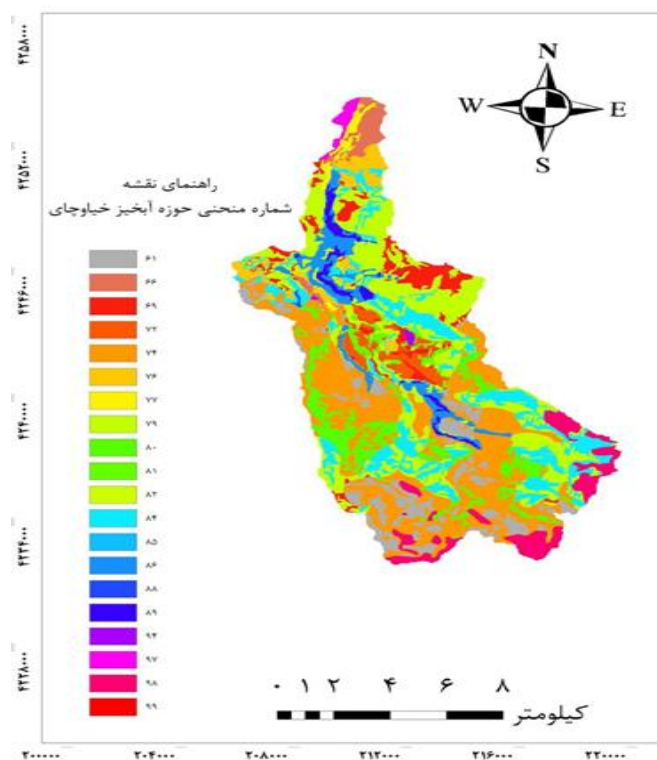
Table 3- Average maximum rainfall of Khiavchai Watershed (mm)

						دوره بازگشت	حوزه آبخیز
100	50	25	10	5	2	حوزه آبخیز	
69.462	61.104	53.564	44.559	38.208	29.657	24	ساعته
46.934	41.286	36.192	30.107	25.816	20.038	6	ساعته

جدول ۴- حداکثر دبی ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه هیدرومتری پل سلطان (مترمکعب بر ثانیه)

Table 4- 24-h maximum discharge with different return periods at Pol Sultan hydrometric station (cubic meters per second)

100	50	25	10	5	2	ایستگاه	
81.07	55.26	36.20	19.00	10.58	3.84	لوگ نرمال سه‌پارامتره	
88.11	56.01	34.85	17.74	10.04	3.98	لوگ پیرسون سه‌پارامتره	توزیع
140.16	76.59	41.65	18.35	9.63	3.72	پیرسون سه‌پارامتره	سلطانی
-	-	48.83	18.22	12.028	3.33	ویبول	توزیع تجربی



شکل ۲- نقشه شماره منحنی حوزه آبخیز خیاوچای

Figure 2- Khiavchai Watershed curve number map

جدول ۵- متوسط وزنی شماره منحنی در زیرحوزه‌های آبخیز

Table 5- Weighted average of curve number in sub-watershed

حوزه آبخیز	I	H	G	F	E	D	C	B	A	نام حوزه‌های آبخیز
77.74	77.06	83.23	79.5	76.04	76.87	77.27	75.77	84.76	78.59	شماره منحنی

مقادیر هر یک از پارامترها جهت شبیه‌سازی آورده شده است. در شکل ۳، هیدروگراف شبیه‌سازی شده سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت، زمان رسیدن به اوج و زمان نفوذ کاهش، مقدار دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف افزایش یافته است و تداوم سیل در همه دوره بازگشت‌ها یکسان است (شکل ۳).

بر این اساس، مدل WMS جهت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در این حوزه آبخیز مناسب تشخیص داده شد. قابل ذکر است میزان تغییر ضریب تلفات اولیه بین ۰/۳-۰/۱ محاسبه شد و مقدار متوسط آن ۰/۲ است. در جدول ۶ پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی و پارامترهای مورد استفاده برای اعتبارسنجی به همراه درصد خطای نسبی ارائه شده است. همچنین، در جدول ۷

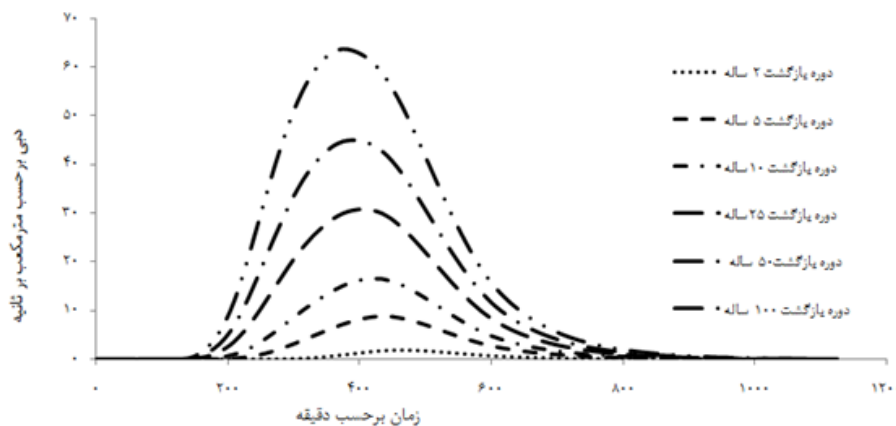
جدول ۶- پارامترهای استخراج شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نرم افزار WMS براساس وقایع بارش-رواناب

مرحله	تاریخ	ارتفاع بارندگی (میلی متر)	شماره منحنی	دبی اندازه گیری (متر مکعب در ثانیه)	دبی شبیه سازی (متر مکعب در ثانیه)	زمان تأخیر (ساعت)	تلفات اولیه	خطا (ریشه میانگین مربعات خطا)
واسنجی	91.3.3	28.12	76	14	12.76	2.439	16.203	8.86
اعتبارسنجی	92.3.31	28.06	76	4.04	4.36	2.439	16.203	7.92

جدول ۷- ضرایب بهینه برای حوزه آبخیز خیاوچای

Table 7- Optimal coefficients for Khiavchai Watershed

شماره منحنی	ضریب ذخیره	تلفات اولیه	درصد خطای واسنجی	درصد خطای اعتبارسنجی
76	0.202	16.203	8.86	7.92



شکل ۳- هیدروگرافهای سیلاب شبیه سازی شده با دوره بازگشت های ۲ تا ۱۰۰ ساله

Figure 3- Simulated flood hydrographs with return periods of 2 to 100 years

اوج دو برابر شده و با افزایش ۲۵ درصد CN دبی اوج ۱۳ برابر می شود. عکس العمل دبی اوج نسبت به تغییر CN در دوره بازگشت دو سال شدیدتر از دوره بازگشت پنج سال است.

در هیدروگرافهایی با دوره بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با افزایش دوره بازگشت بر تعداد هیدروگرافها اضافه شده است؛ یعنی با افزایش مقدار بارش حوزه آبخیز هنگامی که شماره منحنی کاهش پیدا می کرد، مقادیر ذخیره در همه دوره بازگشتها یکسان بوده و با افزایش دوره بازگشت تعداد هیدروگرافها افزایش داشته است. با کاهش پنج درصدی شماره منحنی، با افزایش دوره بازگشت اختلاف دبی اوج کاهش می یابد. با افزایش ۲۵ درصد شماره منحنی دبی اوج در دوره بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۳، ۹، ۷/۵، ۶/۳ برابر شده است. نتایج نشان می دهد اثر تغییر شماره منحنی در دوره های بازگشت پایین بیش تر از دوره های بازگشت بالا است. یعنی با افزایش دوره بازگشت ضریب عکس العمل افزایش دبی نسبت به تغییرات CN کاهش می یابد. در واقع تغییر کاربری اراضی ایجاد شده در حوزه آبخیز بیش ترین تأثیر را روی دبی اوج سیل گذاشته است. لذا، تغییرات کاربری اراضی اثر زیادی بر هیدروگراف سیل داشته

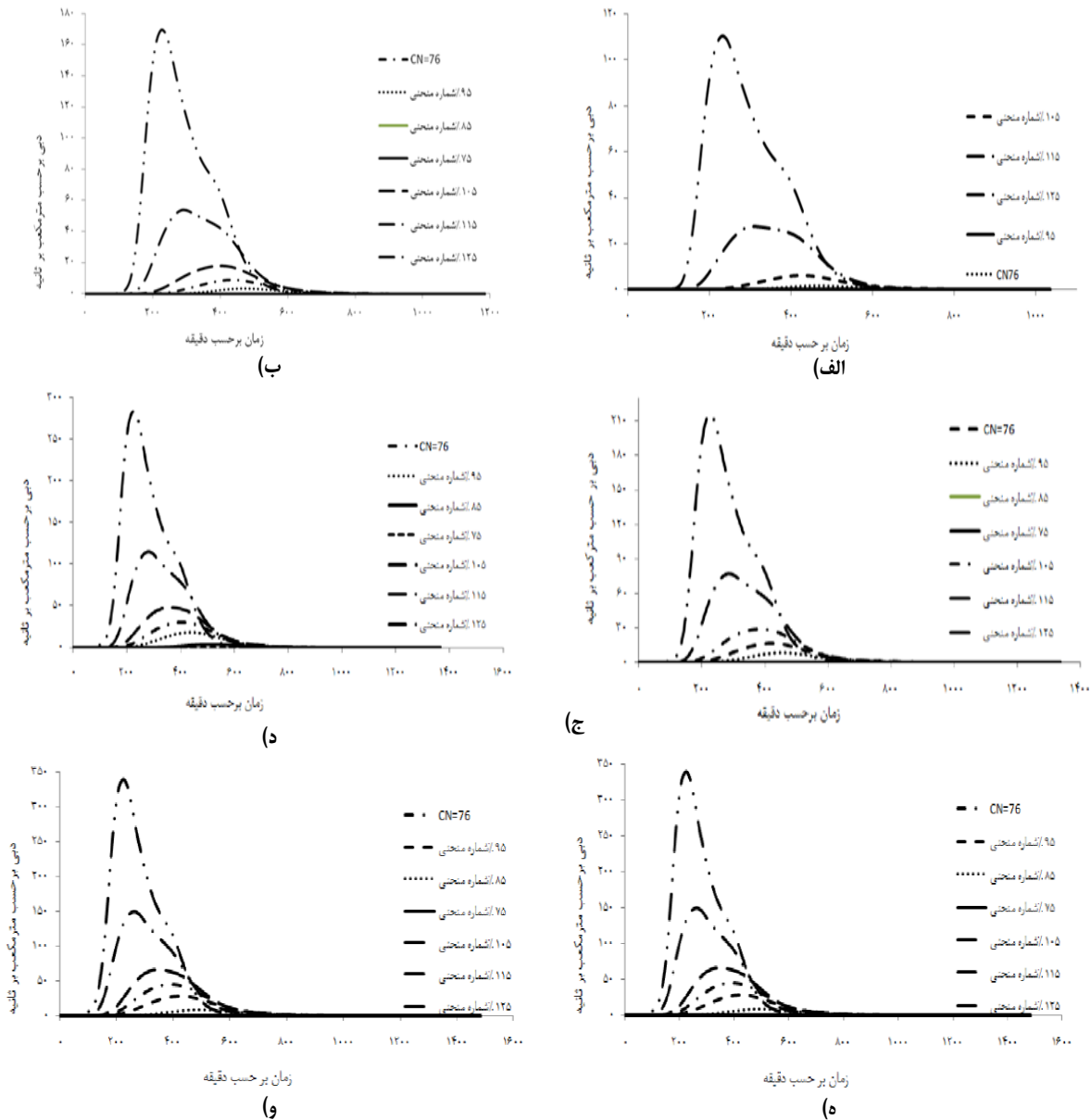
بر این اساس دبی حداکثر در ایستگاه پل سلطانی در دوره های بازگشت مختلف محاسبه شد. جدول ۸ خطای شبیه سازی شده نسبت به اندازه گیری را نشان می دهد. همان طوری که در شکل ۳ مشاهده می شود با توجه به این که در دوره بازگشت دوساله میزان بارش حوزه آبخیز ۲۰/۰۳۹ میلی متر بوده در نتیجه هنگامی که شماره منحنی کاهش داده شده میزان ذخیره حوزه آبخیز افزایش یافته و سیلی اتفاق نیفتاد و اما زمانی که شماره منحنی افزایش پیدا کرد، سیل اتفاق افتاد و هر چه بر مقدار شماره منحنی اضافه شده زمان نفوذ و زمان رسیدن به اوج کاهش یافته است. به طوری که به ترتیب با افزایش پنج، ۱۵ و ۲۵ درصدی شماره منحنی به ترتیب زمان رسیدن به اوج ۲۴۰، ۱۸۰ و ۱۳۵ دقیقه، زمان پایه هیدروگراف ۱۰۳۵، ۸۸۵ و ۷۵۰ دقیقه کاهش یافته است. همچنین، مقدار دبی اوج سیل از ۱/۷۴ به ۶/۴۶۶، ۲۷/۴۹۱ و ۱۰۹/۶۹۴ مترمکعب بر ثانیه افزایش می یابد. در بررسی هیدروگراف سیلاب در دوره بازگشت پنج ساله که میزان بارش حوزه آبخیز ۲۵/۸۱۶ میلی متر بوده همانند دوره بازگشت دو ساله با کاهش شماره منحنی، سیل اتفاق نیفتاد و با افزایش شماره منحنی زمان شروع سیل و زمان رسیدن به اوج کاهش یافته است. با افزایش پنج درصد CN دبی

جدول ۸- مقادیر خطای شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری

Table 8- Simulated error values compared to observed values

خطا	توزیع	لوگ‌نرمال III	لوگ‌پیرسون III	پیرسون III	ویبول
درصد خطای نسبی		19.13	20.96	42.59	22.78
ریشه میانگین مربعات خطا		8.68	11.14	34.1	9.29

است که با یافته‌های (Rezaei Moghadam et al. (2014)، (Tawakli et al. (2014) و (Chen et al. (2009) و (Shananizadeh Hoveyze et al. (2015) مطابقت دارد.



شکل ۴- اثر تغییر شماره منحنی برای هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف: (الف) دوره بازگشت ۲ سال، (ب) دوره بازگشت ۵ سال، (ج) دوره بازگشت ۱۰ سال، (د) دوره بازگشت ۲۵ سال، (ه) دوره بازگشت ۵۰ سال، (و) دوره بازگشت ۱۰۰ سال

Figure 4- The effect of changing the curve number for the flood hydrograph with different return periods: (a) 2-year return period, (b) 5-year return period, (c) 10-year return period, (d) 25-year return period, (e) 50-year return period and (f) return period of 100 years

منحنی زمان تداوم سیل افزایش می‌یابد. دلیل این امر با تغییرات شماره منحنی مرتبط است، که با افزایش پوشش گیاهی و کاهش شماره منحنی، رواناب کم‌تری تولید شده و مؤلفه‌های

همان‌طور که در همه هیدروگراف‌ها مشاهده می‌شود با افزایش شماره منحنی دبی اوج زودتر اتفاق می‌افتد و با افزایش شماره منحنی، زمان تداوم سیل کاهش یافته و با کاهش شماره

است که در نمودارهای دبی-زمان نیز مساحت بین منحنی با شماره منحنی ۷۶، ۱۱۵ و ۱۲۵ درصد شماره منحنی افزایش زیادی داشته باشد. با توجه به یافته‌های پژوهش می‌توان اظهار نمود با کاهش دوره بازگشت اعداد شبیه‌سازی به دبی مشاهده‌ای سیلاب حوزه آبخیز نزدیک‌تر می‌شود. لذا، می‌توان گفت که با افزایش شدت بارش در حوزه آبخیز مورد نظر شبیه‌سازی دارای خطای بیش‌تری می‌شود. با توجه به نتایج حاصله می‌توان پیشنهاد داد که برخی اقدامات آبخیزداری در جهت بهبود وضعیت پوشش گیاهی منطقه که منجر به کاهش سیلاب می‌شود، صورت گیرد. در صورت مطالعه در اطراف کوه سیلان جهت برآورد دبی سیلاب و سیل‌خیزی حوزه آبخیز، حتماً به بررسی چشمه‌های منطقه پرداخته شود؛ زیرا که در حوزه‌های آبخیز شبیه‌سازی‌های وجود چشمه‌های معدنی با دبی بسیار زیاد باعث اختلاف زیاد در برآوردها با مقادیر مشاهده‌ای می‌شود که باید به این مورد توجه شود. از طرفی از آن‌جا که مدل HEC-1 شکل مقطع عرضی رودخانه، جنس بستر رودخانه و برخی خصوصیات بستر رودخانه را در شبیه‌سازی هیدروگراف و دبی اوج سیلاب مد نظر قرار نمی‌دهد بهتر است شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی دیگر از قبیل HEC-RAS نیز انجام و با نتایج حاضر مقایسه شود.

سیاسگزاری

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از دانشگاه محقق اردبیلی به‌دلیل حمایت از انجام پایان‌نامه اعلان می‌دارند.

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 در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

مجید رئوف: مفهوم‌سازی، راهنمایی، ویرایش؛ زیلا کاظمی: تحلیل‌های نرم‌افزاری/آمار، نگارش نسخه اولیه؛ رئوف مصطفی‌زاده: مفهوم‌سازی، ویرایش، تحلیل؛ یاسر حسینی: مشاوره، تحلیل؛ سجاد میرزایی: تحلیل‌های نرم‌افزاری/آمار.

دبی اوج و حجم رواناب دارای مقادیر کم‌تری خواهند بود. قابل ذکر است که در مناطق پرشیب و ارتفاعات حوزه آبخیز که بیش‌تر دارای جهت غربی هستند، شماره منحنی بیش‌تر بوده و رواناب زیادتری تولید شده است که با نتایج Hosseinzadeh et al. (2014) تطابق دارد. همچنین، پس از استخراج نقشه‌های خاک‌شناسی و گروه هیدرولوژیکی در GIS نتایج نشان داد خاک حوزه آبخیز در زیربخش‌ها یک‌نواخت نیست و سه گروه هیدرولوژیک متفاوت در حوزه آبخیز وجود دارد که در راستای فرضیات پژوهش و جهت ساده‌سازی بوده است و با نتایج et al. (2014) Tawakli در یک راستاست.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام شده، حداکثر سیلاب برآوردی حوزه آبخیز که در نرم‌افزار محاسبه شد، مقایسه داده‌های برآوردی با مشاهده‌ای توسط دو شاخص آماری به نام خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا انجام شد؛ مقادیر این دو شاخص آماری با کم‌ترین خطا مربوط به توزیع لوگ‌نرمال سه‌پارامتره حدود ۱۰/۳۲ درصد و ۸/۶۸ مترمکعب به‌دست آمد. با مقایسه میان یافته‌های حاصل از تحلیل حداکثر سیلاب و مدل WMS می‌توان نتیجه گرفت که یافته‌های حاصل از حداکثر سیلاب مطابقت بیش‌تری با دبی حداکثر مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع در خروجی حوزه آبخیز خیاوچای دارد. از طرفی، زمانی که بارش با دوره‌های بازگشت مختلف در کل حوزه درون‌یابی شد حداکثر و حداقل بارش در هر دوره بازگشت و در مناطق مختلف حوزه آبخیز دارای توزیع مکانی غیریکنواخت است. با استناد به نتایج حاصل از پژوهش مورد نظر می‌توان گفت مدل WMS قادر است فرآیند بارش رواناب را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید. لذا، توصیه می‌شود از این مدل برای شبیه‌سازی دبی سیلابی سایر حوزه‌های آبخیزی که فاقد ایستگاه هیدرومتری در نزدیکی حوزه آبخیز هستند، مورد استفاده قرار گیرد. طی بررسی که صورت گرفته مقادیر دبی برآوردی به‌روش SCS و با الگوی بارش WMO نسبت به حداکثر برآوردی با الگوی بارش SCS به داده‌های مشاهده‌ای بسیار نزدیک بوده و دارای خطای کمی هستند. لذا، برای این حوزه آبخیز الگوی بارش WMO پیشنهاد می‌شود که مطالعه انجام شده با نتایج (Mirzaei et al. 2015) یکسان است. در خصوص تأثیر تغییر شماره منحنی روی هیدروگراف سیلاب، زمانی که شماره منحنی افزایش و یا کاهش داشته است اثر زیادی بر دبی اوج داشته است؛ به‌طوری‌که با کاهش پنج درصد شماره منحنی، دبی اوج تفاوت زیادی داشته است. با افزایش ۲۵ درصد شماره منحنی، دبی اوج ۶۳ برابر افزایش داشته است. این افزایش ۱۵ و ۲۵ درصدی شماره منحنی حوزه آبخیز باعث شده

منابع

- رضایی‌مقدم، محمد، اندریانی، صغری، الماس‌پور، فرهاد، ولی‌زاده کامران، خلیل، و مختاری‌اصل، ابوالفضل (۱۳۹۳). بررسی اثرات تغییر کاربری و پوشش اراضی بر روی سیل‌خیزی و دبی رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد علویان). *هیدروژئومورفولوژی*، ۱(۱)، ۴۱-۵۷. <http://irdoi.ir/381-141-785-807>
- عابدینی، موسی، فتحی، محمد حسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خیاوچای). *هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۳)، ۹۹-۱۲۰. [doi:10.1001.1.23833254.1394.2.3.6.7](https://doi.org/10.1001.1.23833254.1394.2.3.6.7)
- نوحه‌گر، احمد، قشقایی‌زاده، نسیم، و حلی‌ساز، ارشک (۱۳۹۱). تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز جاماش استان هرمزگان). *پژوهش‌های دانش زمین*، ۳(۹)، ۱۴-۲۵. [doi:10.1001.1.20088299.1391.3.1.2.5](https://doi.org/10.1001.1.20088299.1391.3.1.2.5)
- میرزانیان، احسان، ملک احمدی، حسین، شاه‌محمدی، یادگار، و ابراهیم‌زاده، علی (۱۴۰۰). تأثیر موجک بر افزایش دقت مدل‌های تخمینی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه صوفی‌چای. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۳)، ۶۷-۷۹. [doi:10.22098/mmws.2021.9335.1035](https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9335.1035)
- صیاد، دانیال، قضاوی، رضا، و امیدوار، ابراهیم (۱۴۰۱). راهبردهای مناسب مدیریتی زیرساخت‌های شهری در برابر سیلاب از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از SWOT و QSPM (مطالعه موردی: شهر کاشان). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۴۲-۵۲. [doi:10.22098/mmws.2022.9651.1055](https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9651.1055)
- بدری، بهرام، زارع بیدکی، رفعت، هنربخش، افشین، و آتشخوار، فاطمه (۱۳۹۵). اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز بهشت آباد از نظر پتانسیل سیل‌خیزی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۱)، ۱۴۳-۱۵۸. [doi:10.22059/JPHGR.2016.57032](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2016.57032)
- توکلی، مهدیه، رئوف، مجید، میرزائی، سجاده، و رسول‌زاده، علی (۱۳۹۴). بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از عکس هوایی در حوضه آبخیز آتسگاه استان اردبیل. *کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار با تمرکز بر کشاورزی، محیط زیست و گردشگری*، تبریز.
- تقیان، بهرام، و فرازجو، حسن (۱۳۸۶). تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی سیل‌خیزی واحدهای هیدرولوژیک حوزه سد گلستان. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱(۱)، ۱-۱۱. <https://www.sid.ir/paper/134831/fa>
- حسین‌زاده، محمد مهدی، نصرتی، کاظم، و ایمنی، سپیده (۱۳۹۴). بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌های آبخیز در شدت سیل‌خیزی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز حصارک). *جغرافیای سرزمین*، ۱۲(۴۸)، ۸۷-۱۰۰. <https://www.sid.ir/paper/116307/fa>
- رستمی، رامین، و نجف‌زاده، عادل، (۱۳۹۱). توسعه نقشه‌های سیل‌خیزی برای استان آذربایجان غربی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. *فضای جغرافیایی*، ۱۲(۳۷)، ۲۱۱-۲۱۶. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1321-fa.html>
- Abedini, M., & Fathi, M.H. (2014). Flood risk zoning using network analysis process (case study: Khiavchay Watershed). *Hydrogeomorphology*, 2(3), 99-120. [doi:10.1001.1.23833254.1394.2.3.6.7](https://doi.org/10.1001.1.23833254.1394.2.3.6.7) [In Persian]
- Aldrees, A., Bakheit, A.T., & Assilzadeh, H. (2021). Intelligent estimation of the discharge peak in Al Aqiq drainage basin: A case study in Al Madinah Munwwarah region. *Smart Structures and Systems*, 27(6), 951-968. [doi:10.12989/sss.2021.27.6.951](https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.6.951)
- Badri, B., Zare Bidaki, R., Honrabakhsh, A., Atashkhar, F. (2017). Prioritization of Behesht Abad watershed sub-basins in terms of flood potential. *Natural Geography Researches*, 48(1), 143-158. [doi:10.22059/JPHGR.2016.57032](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2016.57032). [In Persian]
- Barros, A.P. (2013). Orographic precipitation, freshwater resources, and climate vulnerabilities in mountainous regions. In P. Editor-in-Chief: Roger (Ed.), *Climate Vulnerability*, 57-78.
- Chandniha, S.K., & Kansal, M.L. (2017). Prioritization of sub-watersheds based on morphometric analysis using geospatial technique in Piperiya watershed, India. *Applied Water Science*, 7, 329-338. [doi:10.1007/s13201-014-0248-9](https://doi.org/10.1007/s13201-014-0248-9)
- Ebrahimian, M., Ainuddin Nuruddin, A., Mohd Soom, M.A.B., & Sood, A.M. (2012). Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 10(1), 103-114. https://cjes.guilan.ac.ir/article_1091_21f13b14b0618804885588ea156a5c76.pdf
- Gumindoga, W., Rwasoka, D., Nhapi, I., & Dube, T. (2017). Ungauged runoff simulation in upper Manyame catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 371-382. [doi:10.1016/j.pce.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.05.002)
- Hosseinzadeh, M.M., Nosrati, K., & Imni, S. (2014). Investigating the role of watershed sub-basins in flood severity (Case study: Hesarak watershed). *Sarzemini Geographical Quarterly*, 12(48), 87-100. <https://www.sid.ir/paper/116307/en>. [In Persian]
- Klari, Z.M., & Ibrahim, S.A. (2021). Application of SCS-Curve number method to estimate runoff using GIS for Gali-Bandawa watershed. *Academic Journal of Nawroz*

- University, 10(1), 318-325. doi:10.25007/ajnu.v10n1a1108
- Murthy, K., & SAbbaiah, G. (2007). Geostatistical analysis for estimation of mean rainfalls in Andhra Pradesh, India. *International Journal of Geology*, 3, 35-51. <https://www.naun.org/main/NAUN/geology/ijgeo-07.pdf>
- Mirzania, E., Malek Ahmadi, H., Yadegar Shahmohammadi, Y., & Ebrahimzadeh, A. (2021). Impact of wavelet on accuracy of estimated models in rainfall-runoff modeling (Case study: Sufi Chay). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 67-79. doi:10.22098/mmws.2021.9335.1035. [In Persian]
- Mostafazadeh, R., Sadoddin, A., Bahremand, A., Sheikh, V.B., & Garizi, A.Z. (2017). Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision-making technique in Northeast Iran. *Natural Hazards*, 87, 1827-1846. doi:10.1007/s11069-017-2851-1
- Khattat, M., Serroukh, M., Rafik, I., Mesmoud, H., Brirhet, H., Bouslihim, Y., & Hara, F., (2016). Hydrological modeling of aguibat Ezziar Watershed (Morocco), comparative study of two different hydrological models. *Journal of Geographic Information System*, 8, 50-56. doi:10.4236/jgis.2016.81005
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—mapping supply and demand, in the Etropole municipality. Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67-79. doi:10.1016/j.ecolind.2011.06.022
- Niyazi, B., Khan, A.A., Masoud, M., Elfeki, A., Basahi, J., & Zaidi, S. (2022). Optimum parametrization of the soil conservation service (SCS) method for simulating the hydrological response in arid basins. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*, 13(1), 1482-1509. doi:10.1080/19475705.2022.2080005
- Nohegar, A., Qashqaizadeh, N., & Halisaz, A. (2011). Determining flood producing areas and prioritizing sub-basin flooding (case study: Jamash watershed, Hormozgan province). *Earth Science Research*, 9(3), 14-25. doi:10.1001.1.20088299.1391.3.1.2.5. [In Persian]
- Rahaman, S.A., Ajeez, S.A., Aruchamy, S., & Jegankumar, R. (2015). Prioritization of sub watershed based on morphometric characteristics using fuzzy analytical hierarchy process and geographical information system – a study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4, 1322-1330. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.172
- Rashid, H.M. (2022). GIS based surface runoff estimation for Sulaimani City, KRG, Iraq. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 29(2), 36-45. doi:10.33261/jaaru.2022.29.2.005
- Rezaei Moghadam, M.H., Andriani, S., Almaspour, F., Walizadeh Kamran, Kh., & Mokhtari Asl, A. (2014). Investigating the effects of land use change and land cover on flooding and runoff discharge (Case study: Alaviyan Dam watershed). *Hydrogeomorphology*, 1, 57-41. <http://irdoi.ir/381-141-785-807>. [In Persian]
- Rostami, R., & Najafzadeh, A. (2011). Development of flood maps for West Azarbaijan province using geographic information system. *Journal of Geographic Space*, 12(37), 216-211. [In Persian]
- Sayyad, D., Ghazavi, R., & Omidvar, E. (2022). Appropriate urban infrastructure management strategies against floods from the perspective of passive defense using SWOT and QSPM (case study: Kashan City). *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 42-52. doi:10.22098/mmws.2022.9651.1055. [In Persian]
- Saghafian, B., & Farazjou, H., (2016). Determining the flood producing areas and prioritizing the flooding of the hydrological units of the Golestan Dam Basin, Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 1(1), 1-11. <https://www.sid.ir/paper/134831/en> [In Persian]
- Tawakli, M., Raoof, M., Mirzaei, S., & Rasolzadeh, A., (2014). Investigating land use changes using aerial photographs in the Atashgah watershed of Ardabil province. International Conference on Sustainable Development with a focus on Agriculture-Environment-Tourism, Tabriz, Iran, Pp.11. [In Persian]
- Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z. (2017). Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Science of the Total Environment*, 599-600, 1034-1046. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.04.218