

Evaluating the efficiency of concentration time estimation models in some sub-basins in northwest of Iran

Ali Reza Vaezi¹, Ouldouz Bakhshi Rad^{2*}

¹ Professor at Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Ph.D. Graduated, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran and Watershed Management Expert in East Azerbaijan Department of Natural Resources and Watershed Management

Received: 05 January 2024

Accepted: 24 April 2024

Extended abstract

Introduction

The concentration time of catchments is one of the most important and common effective features in hydrological studies, particularly in determining the flow discharge for designing watershed management projects. Most of the catchments in the world especially in Iran were not equipped with hydrometric stations, and project managers are forced to use traditional empirical models to estimate concentration time and peak flow. The review of previous studies shows that experimental models for estimating concentration time have unfavorable results due to the change of environmental conditions outside the place where the model is presented. On the other hand, there is not enough information about the effectiveness of experimental models for estimating concentration time in many catchments in Iran, especially in semi-arid areas. The purpose of this study is to evaluate the accuracy of some experimental models for estimating concentration time in the sub-basins of the semi-arid region of the northwest of the country and to identify its determining factors.

Materials and methods

This study was conducted in eight sub-basins including Alanagh, Ordakloo, Shekaralichay, Shiramin, Kurjan, Kalaleh and Livar from Urmia Lake and Araz River basins in Northwest Iran. Meteorological and hydrometric data were obtained from the Natural Resources of East Azerbaijan and stations belonging to the Ministry of Energy. The characteristics of the basin such as area, length, slope, height and shape were determined through field studies and drawing maps in the GIS platform. The concentration time was calculated using the hydrograph of the flows in the statistical period of 30 years (from 1367 to 1397) and it was estimated through six experimental models including Kirpich (1940), Kerby (1959), Chow (1962), Federal Aviation Administration (1972), Bransby-Williams (1980) and Ventura (2007). The relationship between concentration time and catchment characteristics was investigated by correlation matrix, Pearson's method. Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, average error and root mean square error were used to evaluate the accuracy of the models.

Results and discussion

According to the results, Shekaralichay sub basin has the shortest (66 minutes) and the Kalaleh sub basin has the longest concentration time (132 minutes). Bransby-Williams model had the lowest error (6.8 %) and the highest efficiency coefficient (73%); while the estimation error (36.2 %) and the Nash-Sutcliffe efficiency of Federal Aviation Administration model were 36.2% and -14.4% respectively. The slope was the most important main factor on the estimation of concentration time of the assessment in the Kirpich model ($r=0.83$), Chow ($r=0.82$) and Bransby-Williams ($r=0.73$). Federal Aviation Administration model (1972) and Ventura model (2007) have a weak estimate in sub-basins with low slope and length.

Conclusions

The results showed that among the physical characteristics of the basin, the area, slope and length of the sub-basin play a more important role in changes in concentration time. This study showed that the slope percentage of the basin is the most important factor in reducing concentration time, peak discharge and increasing the speed of flooding in the studied sub-basins, so it is suggested to use soil protection plans in

* Corresponding author: ouldouz@gmail.com

order to increase the concentration time for sub-basins that have a higher slope percentage. The evaluation of concentration time estimation models in eight catchments showed that the Bransby-Williams (1980) model with an average error of 6.80% and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 73% provides the best estimation among others, so the use of this model in similar basins which do not have measuring stations, it is suggested.

Keywords: Bransby-Williams model, Drainage area, Environmental condition, Peak discharge, Slope gradient

Cite this article: Vaezi, A.R., Bakhshi Rad, O., 2024. Evaluating the efficiency of concentration time estimation models in some sub-basins in northwest of Iran. *Watershed Engineering and Management* 16(3), 432-449.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در برخی زیرحوضه‌های شمال غرب ایران

علی‌رضا واعظی^۱ و اولدوز بخشی راد^{۲*}

^۱ استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲ دانش‌آموخته دکترای تخصصی فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان و کارشناس آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری آذربایجان شرقی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵

چکیده مبسوط

مقدمه

زمان تمرکز حوزه‌های آبخیز، یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین ویژگی‌های مؤثر در مطالعات هیدرولوژیکی به‌ویژه تعیین دبی جریان برای طرح‌های آبخیزداری است. اغلب حوزه‌های آبخیز دنیا و همچنین ایران، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان هستند و مجریان طرح‌ها ناگزیر به استفاده از مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز هستند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز به دلیل تغییر شرایط محیطی در خارج از محل ارائه مدل نتایج نامطلوبی دارند. از سوی دیگر اطلاعات کافی در مورد کارایی مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز در بسیاری از حوزه‌های آبخیز در ایران و به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک وجود ندارد. هدف از این مطالعه ارزیابی دقت برخی مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز در زیرحوضه‌های منطقه نیمه‌خشک شمال غرب کشور و شناسایی عوامل تعیین‌کننده آن است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در هشت زیرحوضه شامل آلانق، اردکلو، شکرعلی‌چای، شیرامین، کرجان، کلاله و لیوار از حوضه‌های دریاچه ارومیه و رود ارس در شمال غرب ایران انجام گرفت. داده‌های هواشناسی و هیدرومتری از اداره کل منابع طبیعی آذربایجان شرقی و ایستگاه‌های متعلق به وزارت نیرو اخذ شد. ویژگی‌های حوضه مانند مساحت، طول، شیب، ارتفاع و شکل از راه مطالعات میدانی و رسم نقشه‌ها در بستر GIS تعیین شد و زمان تمرکز با استفاده از هیدروگراف جریان‌ها در دوره آماری ۳۰ سال (از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۷) محاسبه شد و از طریق شش مدل تجربی شامل کریچ (۱۹۴۰)، کربای (۱۹۵۹)، چاو (۱۹۶۲)، سازمان هوانوردی آمریکا (۱۹۷۲)، برانسی-ویلیامز (۱۹۸۰) و ونتورا (۲۰۰۷) برآورد شد. بررسی رابطه میان زمان تمرکز و ویژگی‌های حوزه آبخیز به روش ماتریس همبستگی با استفاده از معیار پیرسون انجام گرفت. برای ارزیابی دقت مدل‌ها از ضریب کارایی نش-ساتکلیف، میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج مشاهده‌ای حاصل از روش هیدروگراف، زیرحوضه شکرعلی‌چای کوتاه‌ترین (۶۶ دقیقه) و کلاله طولانی‌ترین زمان تمرکز (۱۳۲ دقیقه) را دارد. مدل برانسیبی-ویلیامز کمترین خطا (۶/۸ درصد) و بیشترین ضریب کارایی (۷۳) را داشت؛ درحالی‌که بیشترین خطای برآورد (۳۶/۲ درصد) و کمترین ضریب کارایی (۱۴/۴-) در مدل سازمان هوانوردی آمریکا بود. شیب، مهم‌ترین عامل مؤثر بر زمان تمرکز برآوردی در مدل کرپیچ ($r=-0/83$)، چاو ($r=-0/82$) و برانسیبی-ویلیامز ($r=-0/73$) بود. مدل سازمان هوانوردی آمریکا (۱۹۷۲) و مدل ونتورا (۲۰۰۷) در زیرحوضه‌های با شیب زیاد، برآورد ضعیف‌تری دارند و برای مناطق کوهستانی مناسب نیستند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که از میان ویژگی‌های فیزیکی حوضه، مساحت، شیب و طول زیرحوضه در تغییرات زمان تمرکز نقش مهم‌تری دارند. این مطالعه نشان داد درصد شیب حوضه مهم‌ترین عامل کاهش زمان تمرکز و دبی اوج و افزایش سرعت سیلابی شدن در زیرحوضه‌های مورد بررسی است. بنابراین پیشنهاد می‌شود، برای زیرحوضه‌هایی که درصد شیب بالاتری دارند، از طرح‌های حفاظت خاک به‌منظور افزایش زمان تمرکز استفاده شود. ارزیابی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در هشت زیرحوضه آبخیز نشان داد که مدل برانسیبی-ویلیامز (۱۹۸۰) با میانگین خطا ۶/۸۰ درصد و ضریب کارایی نش-ساتکلیف ۷۳ درصد مطلوب‌ترین برآورد را ارائه می‌کند، لذا، استفاده از این مدل در حوضه‌های مشابه که فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند، پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دبی اوج، درجه شیب، شرایط محیطی، مدل برانسیبی-ویلیامز، مساحت

مقدمه

آبراهه‌ها، ناهمواری‌های سطحی، نوع و تراکم پوشش گیاهی، نوع و عمق خاک و غیره بستگی دارد و از سوی دیگر، به شدت بارندگی و توزیع زمانی و مکانی آن وابسته است (Todd, 2004). زمان تمرکز حوضه‌های کوچک و پرشیب، کوتاه‌تر از زمان تمرکز حوضه‌های بزرگ و کم شیب است، به‌علاوه حوضه‌های گرد با سطح برابر، زمان تمرکز کوتاه‌تری نسبت به حوضه‌های کشیده دارند (Goel, 2011).

برای تعیین مستقیم زمان تمرکز به داده‌های جریان آب در نقطه تمرکز حوزه آبخیز و بارندگی نیاز است. با این حال اغلب حوضه‌ها فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان آب (هیدرومتری) هستند. ازاین‌رو، استفاده از روابط تجربی برای برآورد زمان تمرکز رایج است (Azadnia et al., 2009). روابط تجربی زیادی برای برآورد زمان تمرکز ارائه شده است. در میان روش‌های متداول تجربی می‌توان به روش‌های کرپیچ^۱ (۱۹۴۰)، کربای^۲ (۱۹۵۹)، چاو^۳ (۱۹۶۲)، سازمان هوانوردی

زمان تمرکز، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز است. زمان تمرکز کاربرد بسیار زیادی در برآورد دبی اوج، حجم سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولوژیک همچون سرریز سدها، پل‌ها، آب‌بندها و سامانه‌های تخلیه فاضلاب دارد، علاوه بر آن بسیاری از مدل‌های رایانه‌ای و شبیه‌سازی هیدرولوژی از جمله مدل SCS و هیدروگراف واحد نیاز به ارائه زمان تمرکز به‌عنوان ورودی دارند (Mc Cuen et al., 1984; Jamshidian et al., 2018).

این ویژگی نشانگر مدت زمانی است که لازم است رواناب از دورترین نقطه آبخیز به نقطه تمرکز برسد (Chow, 2010). در تعریف عملی، این ویژگی مدت زمانی را نشان می‌دهد که از شروع رواناب تا به پایدار رسیدن دبی جریان در نقطه تمرکز سپری شده است (Dave, 2019). زمان تمرکز از یک سو به ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه نظیر سطح، شکل، طول و شیب

¹ Kirpich

² Kerby

³ Chow

تمرکز با استفاده از مدل‌های تجربی نشان داد مدل چاو با ۲/۹ درصد خطای نسبی، برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌های تجربی دارد و در مقابل مدل برانسی-ویلیامز با درصد خطای بالای ۶۰ درصد نامطلوب‌ترین مدل در این منطقه گزارش شد.

بر اساس پژوهش‌های Ghaffari and Talebi (2016) در حوضه سد قشلاق سنندج از بین روابط بررسی شده، رابطه برانسی و ویلیامز با میانگین درصد خطای نسبی ۴۳/۵ درصد و ریشه مجموع مربعات خطای ۱/۸۳ نتایج قابل قبولی در برآورد زمان تمرکز داشت و مدل چاو با درصد خطای کمتر از ۵۷ درصد و مجموع ریشه میانگین مربعات خطا کمتر دو، نتایج نسبتاً مناسبی داشت.

Parsamehr and Khosravani (2017) در محاسبه زمان تمرکز حوزه آبخیز خرمینکوه از معادله کرپیچ استفاده کردند. نتایج نشان داد که زمان رسیدن بارش مازاد از دورترین نقطه حوضه به قسمت خروجی، ۱۱۲ دقیقه طول می‌کشد و با نتایج مشاهده‌ای مطابقت دارد. همچنین، نتایج آنالیز حساسیت ویژگی‌های این معادله نشان داد که تغییرات زمان تمرکز با تغییرات طول آبراه اصلی به صورت خطی و با تغییر مقدار شیب به صورت نمایی تغییر می‌کند. مطالعات Azizian (2017) در حوزه آبخیز کسلیان و امامه به منظور بررسی مدل‌های گوناگون تجربی برآورد زمان تمرکز نشان داد مدل برانسی-ویلیامز و مدل مورگالی در این دو حوضه با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد، نزدیک‌ترین برآورد را به داده‌های مشاهده‌ای دارند.

Kamath et al., (2012) در دو حوزه آبخیز در هندوستان با استفاده از روش‌های تجربی مقادیر زمان تمرکز را برآورد کردند. نتایج نشان داد مدل کرپیچ در هر دو حوضه برآورد کمتر از واقعیت نشان داد که منجر به خطای برآورد فرسایش بیش از مقدار واقعی در این حوضه‌ها شده است.

با این حال، مدل برانسی-ویلیامز برآورد نزدیک‌تری به مقادیر مشاهده‌ای دارد که علت آن، طول آبراه کمتر در این زیرحوضه‌ها بیان شد. Roux et al., (2020) در مطالعه‌ای برای برآورد زمان تمرکز در حوزه

امریکا^۱ (۱۹۷۲)، برانسی-ویلیامز^۲ (۱۹۸۰) و ونتورا^۳ (۲۰۰۷) اشاره کرد. مدل کرپیچ برای تخمین زمان تمرکز در حوضه‌های کوچک کوهستانی با مساحت ۰/۰۰۴ تا ۰/۴۵ کیلومترمربع و با شیب ۳ تا ۱۲ درصد برای ایالت تنسی آمریکا ارائه شد.

مدل کربای در حوضه‌هایی با ویژگی‌های اقلیمی و فیزیکی متفاوت استفاده شده است (Mc Cuen et al., 1984) و برای حوضه‌هایی که جریان سطحی در آنها غالب است برآورد مطلوب‌تری دارد (de Almeida et al., 2015).

مدل چاو برای ۲۰ حوضه مختلف در آمریکا با مساحت بین ۰/۰۱ تا ۱۸/۵ کیلومترمربع ارائه شد. این دو مدل برای زیرحوضه‌هایی با مساحت کوچک ارائه شده‌اند (Chow, 1988; Kirpich, 1940). مدل سازمان هوانوردی آمریکا برای ساخت فرودگاه و تخلیه رواناب حاصل از بارندگی روی باند فرودگاه‌های آمریکا ارائه شد. مدل برانسی-ویلیامز نسبت به دو مدل قبلی کاربرد وسیع‌تری در حوزه‌های آبخیز دارد. دلیل آن این است که این مدل برای زیرحوضه‌های با مساحت کمتر از ۱۳۰ کیلومترمربع نتایج مطلوبی دارد (Zolghadr et al., 2022). مدل ونتورا (Mata-Lima, 2007) برای حوضه‌های شهری و روستایی با شیب کم ارائه شده است (Kaufmann de Almeida et al., 2015).

روابط تجربی اغلب برای حوضه‌هایی با شرایط اقلیمی، کاربری و با ویژگی‌های خاص ارائه شده است. به دلیل تفاوت‌های زیادی که ممکن است بین شرایط طبیعی محل ارائه مدل‌های تجربی و مناطق دیگر وجود داشته باشد، بایستی کارایی آنها ارزیابی و در صورت نیاز برای استفاده در محل مورد نظر بهینه سازی شوند (Dastorani et al., 2013). در مطالعات مختلف برای مقایسه کارایی مدل‌های تجربی از داده‌های مشاهده‌ای که مبتنی بر اطلاعات هواشناسی و هیدرومتری حوضه هستند، استفاده می‌شود (Alamri et al., 2023).

مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان برای بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد زمان تمرکز انجام شده است. بررسی‌های Shahbazi et al., (2013) در حوزه آبخیز ماهدشت برای برآورد زمان

³ Ventura

¹ Federal Aviation Administration (FAA)

² Bransby-Williams

اطلاعات در مورد تعیین دلایل وجود خطای مدل‌های تجربی به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک اندک است. کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در اغلب حوزه‌های آبخیز یکی از مشکلات اساسی در تعیین دبی اوج و زمان تمرکز آنها است.

جهت اجرای طرح‌های آبخیزداری و عمرانی ناگزیر به استفاده از مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز هستیم و با توجه به این‌که مدل‌های تجربی برای حوزه‌هایی با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های متفاوت ارائه شده است، لذا، قبل از کاربرد آن در هر منطقه، بایستی کارایی مدل‌ها و دلایل ضعف کارایی آنها بررسی شود. پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی کارایی مدل‌های کریپیچ، کربای، چاو، سازمان هوانوردی امریکا، برانسی-ویلیامز و ونتورا در برآورد زمان تمرکز در برخی حوزه‌های آبخیز منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب ایران انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه: این پژوهش در زیرحوضه‌های رود ارس و دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران انجام گرفت. هشت زیرحوضه از رود ارس و دریاچه ارومیه در استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران انتخاب شد. زیرحوضه‌های انتخابی شامل آلاق، قلعه چای، شیرامین و کرجان از حوضه‌های دریاچه ارومیه و اردکلو، لیوار، شکرعلی‌چای و کلالة از حوضه‌های رود ارس هستند (شکل ۱).

داده‌های هواشناسی و هیدرومتری از اداره کل منابع طبیعی آذربایجان شرقی و ایستگاه‌های متعلق به وزارت نیرو در حوزه آبخیز که نامشان با نام زیرحوضه‌های مورد مطالعه یکی است، اخذ شد. اقلیم زیرحوضه‌ها اغلب نیمه‌خشک و نیمه‌خشک سرد و رژیم حرارتی و رطوبتی خاک آنها مزیک^۱ و زریک^۲ است. کاربری غالب زمین در اکثر زیرحوضه‌های آبخیز، مرتع و زراعت دیم است، به‌جز یکی از زیرحوضه‌ها (کلالة) که کاربری جنگل دارد. خصوصیات فیزیکی زیرحوضه‌ها شامل مساحت، طول، ارتفاع و شیب از طریق مطالعات صحرائی، نقشه‌های گوگل و واردکردن نقشه‌های توپوگرافی پس از ژئورفرنس کردن آنها در محیط ArcGIS به‌دست آمد.

آبخیز اگلی فرانسه از روش‌های تجربی استفاده کرده و با نتایج هیدروگراف حوضه مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل برانسی-ویلیامز در این حوضه با کارایی ۸۶ درصد نتایج نزدیک‌تری به مقادیر مشاهده‌ای دارد.

(Hasan and Al Islam (2020)، در حوزه آبخیز داکا بنگلادش زمان تمرکز را با استفاده از دو مدل تجربی چاو و برانسی-ویلیامز برآورد نموده و با هیدروگراف حاصل از داده‌های ۱۸ ساله حوضه مقایسه کردند. نتایج نشان داد روش برانسی-ویلیامز با درصد خطای کمتر نتایج نزدیک‌تری به مقادیر هیدروگراف دارد و نسبت به مدل چاو کارایی بیشتری دارد.

(Harset et al., (2022 در دو حوضه کیدانگ و تمون در اندونزی برای برآورد زمان تمرکز از دو مدل تجربی ونتورا و کریپیچ استفاده کردند و نتایج برآورد را با نتایج هیدروگراف سیلاب حوضه مقایسه کردند. نتایج نشان داد برآورد مدل کریپیچ با مقادیر هیدروگراف تفاوت زیادی داشته و مدل با خطای ۶۳ درصد برآورد مناسبی ارائه نکرده است و دلیل آن را شیب کم حوضه بیان کردند. (Legono et al., (2022 در حوضه برانتاس اندونزی نشان دادند، در زمین‌های با شیب متوسط پنج تا هفت درصد، روش کریپیچ برآورد بهتری از زمان تمرکز نسبت به مدل‌های تجربی دیگر مانند چاو و ونتورا دارد و استفاده از نتایج برآورد این مدل در طراحی پروژه‌های آبخیزداری خطای کمتری دارد.

(Murillo-Bermúdez et al., (2022 در حوضه‌های سائوپولولو برزیل از روش‌های تجربی برای برآورد زمان تمرکز استفاده کردند و نشان دادند که مدل‌های چاو و کریپیچ با میانگین خطای ۸۲ و ۶۴ درصد، کارایی ضعیفی در برآورد زمان تمرکز دارند و مدل برانسی-ویلیامز با میانگین خطای ۲۳ درصد، نتایج نزدیک‌تری به مقادیر مشاهده‌ای دارد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی برآورد زمان تمرکز دارای خطاهایی در مناطقی خارج از محل ارائه مدل هستند که دلیل آن تغییرات شرایط محیطی مانند مساحت، طول و شیب است. اطلاعات کافی در مورد کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در بسیاری از حوزه‌های آبخیز در ایران و به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک وجود ندارد. از سوی دیگر،

² Xeric

¹ Mesic

از یک باشد، آن حوضه کشیده خواهد بود (Horton, 1945). نسبت انشعاب آبراهه از رابطه (۲) به دست آمد (Todd, 2004).

$$BR = \left[\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_3}{n_4} + \dots + \frac{n_{i-1}}{n_i} \right] \frac{1}{i-1} \quad (2)$$

که در آن، BR نسبت انشعاب پذیری، n_1, n_2, \dots, n_i و ni تعداد آبراهه درجه ۱ و ۲ و ... تا i و i تعداد درجات تعیین شده در حوضه است. هر چه مقدار عددی BR بزرگ‌تر باشد، نشان می‌دهد هیدروگراف، دبی اوج کوتاه و زمان پایه زیاد دارد و برعکس (Todd, 2004).

طول آبخیز، طول رودخانه اصلی حوضه است که از نقطه شروع تا نقطه تمرکز ادامه دارد. این نقاط در محیط ArcGIS و نقشه‌های گوگل با احتساب تمام پیچ‌وخم آبراهه اصلی اندازه‌گیری شد. شکل حوضه به روش هورتون با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد (Todd, 2004).

$$R_f = \frac{A}{(L_b)^2} \quad (1)$$

که در آن، R_f ضریب شکل هورتون، L_b طول حوضه بر حسب کیلومتر و A مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع است (Horton, 1945). هر چه مقدار این ویژگی کوچک‌تر



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌های مورد مطالعه در کشور و استان آذربایجان شرقی

Fig. 1. Location of the subbasins in East Azerbaijan region and Iran

متر و ۴۰ مترمکعب بر ثانیه و ضریب رواناب آن ۲۵ درصد است.

تعیین زمان تمرکز زیرحوضه‌های آبخیز: منحنی تغییرات دبی جریان نسبت به زمان را در حوضه‌های آبخیز، منحنی آب سنجی (هیدروگراف)^۱ می‌نامند. ترسیم هیدروگراف جریان، یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی و انجام عملیات عمرانی در پروژه‌های هیدرولوژیکی و آبخیزداری است. از روش‌های متداول در تعیین هیدروگراف سیل ناشی از بارندگی‌های مختلف در یک حوضه، استفاده از هیدروگراف واحد^۲ است که به‌عنوان هیدروگراف رواناب مستقیم تعریف می‌شود (Naghibi et al., 2018). در روش هیدروگراف، زمان تمرکز را می‌توان بر اساس باران‌هایی که منجر به رواناب شده و افزایش دبی جریان در نقطه تمرکز حوضه آبخیز را به همراه داشته‌اند، به‌طوری که دبی جریان به

جدول ۱، برخی از مشخصات مهم زیرحوضه‌های آبخیز مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در میان زیرحوضه‌های مورد مطالعه، شیرامین از بیشترین وسعت (۱۰۹/۶ کیلومتر مربع) و کلاله از کمترین وسعت (۳۱/۳۲ کیلومتر مربع) برخوردار است. از نظر ویژگی‌های توپوگرافی، میانگین شیب در زیرحوضه شکرعلی‌چای (۳۴ درصد) است که به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر زیرحوضه‌ها (۸ تا ۲۸ درصد) است. طول حوضه آبخیز در کرجان بیشترین (۲۲/۶ کیلومتر) و در کلاله کمترین (۱۰/۴۲ کیلومتر) است. از نظر ویژگی‌های اقلیمی، مقدار بارندگی سالانه در زیرحوضه‌های کلاله بیشترین (۴۱۸ میلی‌متر) و در زیرحوضه لیوار کمترین (۲۵۲ میلی‌متر) است. با توجه به شیب نسبتاً زیاد زیرحوضه شکرعلی‌چای، توان تولید رواناب در آن بیشتر است. به‌طوری که مقدار رواناب سالانه و دبی جریان آن به ترتیب ۸۷ میلی

² Unit hydrograph

¹ Hydrograph

مورد مطالعه از رخدادهای بارندگی با تداوم بیش از نیم‌ساعت در طول دوره آماری مورد بررسی استفاده شد و دبی جریان پایه به‌روش ترسیم مشخص شد.

حد ثابتی رسیده باشد، تعیین کرد. در این روش، زمان تمرکز برابر با مدت زمان از لحظه افزایش دبی جریان در نقطه تمرکز تا ایجاد جریان ثابت است (Vaezi, 2020). برای رسم هیدروگراف سیل در حوضه‌های

جدول ۱- مشخصات زیرحوضه‌های مورد مطالعه در شمال غرب کشور
Table 1. Characteristics of studied catchments in Northwest Iran

Catchment	Drainage area (km ²)	Mean slope (%)	Length (Km)	Horton coefficient	Bifurcation ratio	Precipitation (mm)	Runoff (mm)	Discharge (m ³ s ⁻¹)
Alanagh	60.65	22	12.7	0.4	5.63	298.7	28.81	10.73
Ghalechay	86.26	28	20.85	0.2	4.33	323.5	56.12	24.10
Kalaleh	31.32	8	10.42	1.37	5.92	418.3	23.58	8.23
Korjan	85.84	21	22.6	1.68	4.46	319.5	43.63	18.10
Livar	73.77	16	13.15	0.25	4.80	251.5	34.08	13.58
Ordakloo	75.50	13	19.42	0.46	5.15	304.1	33.2	11.78
Shekaralichay	73.95	34	18.67	0.21	3.98	350.2	86.9	40.11
Shiramin	109.6	18	18.62	1.59	4.6	339.5	39.76	18.34

Kirpich(1940) (۳)

$$Tc = 0.949 \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Kerby (1959) (۴)

$$Tc = 3.03 \left(\frac{L^{1.5}}{H^{0.5}}\right)^{0.467}$$

Chow (1962) (۵)

$$Tc = 0.00032 \left(\frac{L^{1.15}}{H^{0.385}}\right)$$

Federal Aviation Administration (1970) (۶)

$$Tc = \frac{3.64 \times (1.1-C) \times L^{0.83}}{H^{0.33}}$$

Bransby-Williams (1980) (۷)

$$Tc = \frac{L}{1.5 Dc} \sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$$

Ventura (2007) (۸)

$$Tc = 0.1272 \times \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{S}}$$

که در آنها، Tc زمان تمرکز بر حسب ساعت، L طول حوزه آبخیز بر حسب متر، H اختلاف ارتفاع بر حسب متر، r ضریب سطح حوضه که بر اساس سطح و پوشش حوضه از روی جدول برای هر حوضه تعیین می‌شود، C ضریب رواناب، S درصد شیب حوضه، Dc قطر دایره معادل حوضه بر حسب کیلومتر و A مساحت آبخیز بر حسب کیلومتر مربع است.

تحلیل آماری و ارزیابی کارایی مدل‌ها: ارتباط ریاضی میان زمان تمرکز و ویژگی‌های حوزه آبخیز (مساحت، شیب، شکل، نسبت انشعاب و غیره) به روش ماتریس

برآورد زمان تمرکز در زیرحوضه‌های آبخیز: در این پژوهش، زمان تمرکز به شش روش تجربی شامل مدل کرپیچ، مدل کربای، چاو، مدل سازمان هوانوردی امریکا، برانسی-ویلیامز و مدل ونتورا برآورد شد و با زمان تمرکز به‌دست آمده از روش هیدروگراف مقایسه شد. دوره آماری مورد مطالعه از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۷ به مدت ۳۰ سال بوده و اطلاعات هیدرولوژی آن از طریق مطالعات میدانی و داده‌های ایستگاه‌ها به‌دست آمد. زمان تمرکز در مدل کرپیچ با فرض زبری متوسط رودخانه در مسیل جریان و شعاع هیدرولیکی مناسب بر اساس طول رودخانه اصلی و شیب آن و از طریق رابطه (۳) محاسبه شد (Kirpich, 1940).

در مدل کربای، از طول و اختلاف ارتفاع حوضه استفاده شد. ضریب سطح حوضه در این معادله از جدول کربای به‌دست آمد (رابطه ۴). در مدل چاو نیز از طول رودخانه اصلی حوضه و اختلاف ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقطه حوضه برای برآورد زمان تمرکز مطابق رابطه (۴) استفاده شد (Chow, 1962). در مدل سازمان هوانوردی امریکا علاوه بر طول و اختلاف ارتفاع حوضه از ضریب رواناب نیز استفاده می‌شود (رابطه ۶). در مدل برانسی-ویلیامز زمان تمرکز حوضه‌ها از شیب، مساحت و قطر دایره معادل سطح حوضه با استفاده از رابطه (۵) به‌دست آمد. در مدل ونتورا مساحت و درصد شیب حوضه در برآورد زمان تمرکز استفاده شد (رابطه ۸).

نتایج و بحث

زمان تمرکز زیرحوضه‌های آبخیز: تحلیل هیدروگراف زیرحوضه‌ها نشان داد زیرحوضه کلاله با ۱۳۲ دقیقه بیشترین زمان تمرکز را در بین زیرحوضه‌های مورد مطالعه دارد. زیرحوضه کلاله با وجود مساحت اندک (۳۲ کیلومتر مربع) و طول کمتر (۱۰/۴۲ کیلومتر) و نیز نسبت انشعاب آبراه‌های بیشتر (۵/۹۲) زمان تمرکز طولانی‌تری دارد. وجود شیب کمتر در زیرحوضه کلاله (۸ درصد) و نیز پوشش گیاهی متراکم (جنگلی) موجب می‌شود، مدت زمان لازم برای رسیدن به دبی اوج در آن بیشتر بوده و اولویت سیل‌خیزی پایین‌تری داشته باشد.

زیرحوضه شکرعلی چای با ۶۶ دقیقه، کوتاه‌ترین زمان تمرکز را در میان زیرحوضه‌های مورد مطالعه دارد. این زیرحوضه از بیشترین درصد شیب در میان سایر زیرحوضه‌ها (۳۴ درصد) برخوردار است و با وجود مساحت و طول بیشتر، جریان‌های سطحی در زمان کوتاه‌تری به دبی اوج رسیده و مستعد سیلابی شدن است. لذا، اولویت سیل‌خیزی بیشتری داشته و نیازمند مدیریت حوزه آبخیز است (شکل ۲).

زمان تمرکز برآوردی: بررسی زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مورد مطالعه نشان داد که مدل کریپچ در چهار زیرحوضه (آلاتق، شیرامین، کلاله و لیوار) برآورد کمتری از زمان تمرکز دارد و در چهار زیرحوضه دیگر بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است. مدل کربای و مدل سازمان هوانوردی امریکا در همه زیرحوضه‌ها به جز زیرحوضه کلاله زمان تمرکز را بیشتر از واقعیت برآورد می‌کنند. مدل چاو در همه زیرحوضه‌ها به جز شیرامین برآورد بیشتری نسبت به مقادیر مشاهده‌ای دارد. مدل برانسی-ویلیامز در چهار زیرحوضه (شکرعلی چای، شیرامین، قلعه چای و کرجان) بیش برآورد اندکی دارد و در چهار زیرحوضه دیگر مقادیر برآوردی کمتر از واقعیت دارد. مدل ونتورا به جز در دو حوضه (اردکلو و لیوار) در سایر زیرحوضه‌ها بیش برآورد دارد. کوتاه‌ترین زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی (به جز دو مدل سازمان هوانوردی امریکا و ونتورا) مربوط به زیرحوضه شکرعلی چای است.

همبستگی با استفاده از معیار پیرسون انجام گرفت. نتایج برآورد مدل‌ها با نتایج اندازه‌گیری مشاهده‌ای زمان تمرکز مقایسه شد. برای ارزیابی دقت مدل‌ها، میانگین خطا^۱ (Loague and Green, 1991) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف^۲ (Nash and Sutcliffe, 1970) و ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (Barnston, 1992) با استفاده از رابطه‌های (۹ تا ۱۱) محاسبه شد.

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{est}|}{Q_{obs}} \times 100 \quad (9)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{est} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{est})^2}{n}} \quad (11)$$

که در آنها، Q_{est} مقادیر برآوردی، Q_{obs} مقادیر مشاهده‌ای، n تعداد رخداد مورد مطالعه و \bar{Q}_{obs} متوسط مقادیر مشاهده‌ای است. برای تشخیص تأثیر داده‌ها بر کم برآوردی یا بیش برآوردی مدل، از خط یک به یک استفاده شد. کم بودن میزان خطا و بالا بودن ضریب کارایی نش-ساتکلیف بیان‌گر دقت قابل قبول مدل است. ضریب کارایی نش-ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد، نشان‌دهنده این است که تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده وجود دارد (Mourier et al., 2008)، اگر مقدار آن بزرگ‌تر از ۰/۷۵ باشد، نتایج خوب، اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، نتایج متوسط است.

در واقع هر چه این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، برآورد دقیق‌تر است. ریشه میانگین مربعات خطا نیز هر چه عدد کوچک‌تری باشد و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر و کارایی مطلوب‌تر روش مورد بررسی است (Barnston, 1992).

کلیه موارد آماری (آماره‌هایی مانند میانگین، کمترین، بیشترین و غیره) به کمک نرم‌افزار SPSS ویرایش ۲۲ انجام گرفت. نمودارها به کمک نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ ترسیم شد. برای ترسیم نقشه‌ها و بررسی مشخصات حوضه‌ها از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰/۸ استفاده شد.

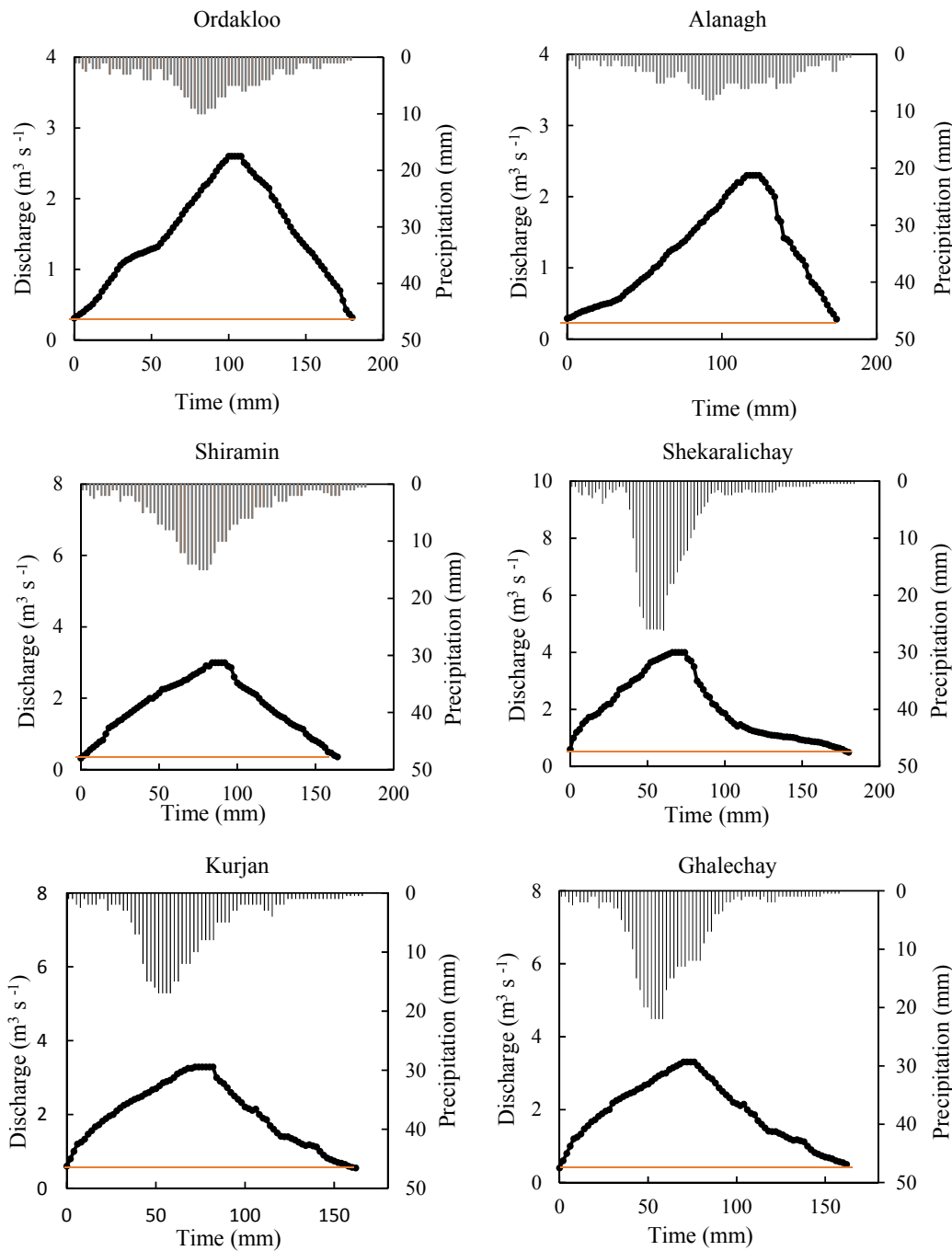
³ Root Mean Square Error (RMSE)

¹ Average Error (AE)

² Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE)

زیرحوضه‌های آبخیز (اردکلو و لیوار) اغلب مدل‌های تجربی (به جز مدل‌های سازمان هوانوردی آمریکا و ونتورا) امکان تشخیص زیرحوضه‌های با کوتاه‌ترین و بلندترین زمان تمرکز را دارند.

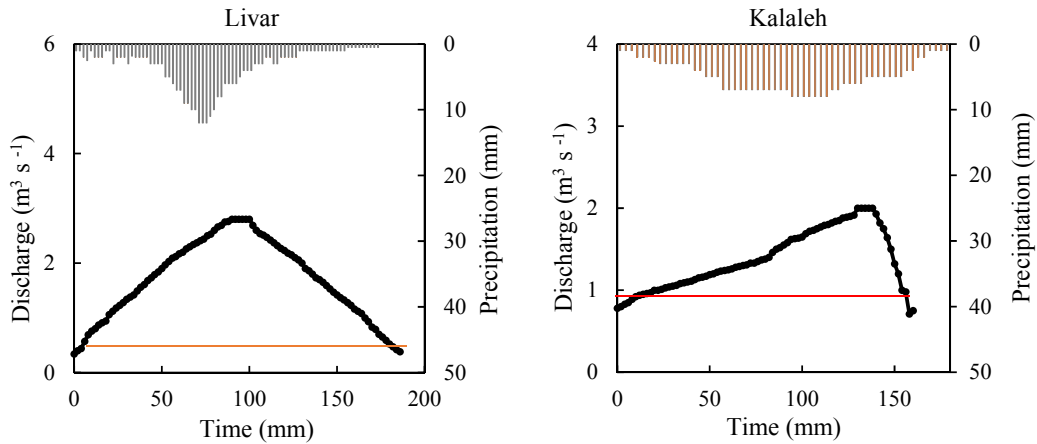
طولانی‌ترین زمان تمرکز مشاهده‌ای و مدل‌های تجربی مورد مطالعه (به جز مدل سازمان هوانوردی آمریکا) مربوط به زیرحوضه کلاله است (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۲). این نتایج نشان می‌دهد که به جز در برخی



شکل ۲- هیدروگراف و هیئوگراف بارندگی در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

(خطوط قرمز افقی برای جداسازی هیدروگراف جریان در رودخانه‌های دائمی استفاده شده است.)

Fig. 2. Hydrograph and hyetograph curves in studied subbasins
(Horizontal red lines are used to separate the hydrograph in permanent rivers)



ادامه شکل ۲

Fig. 2. Continued

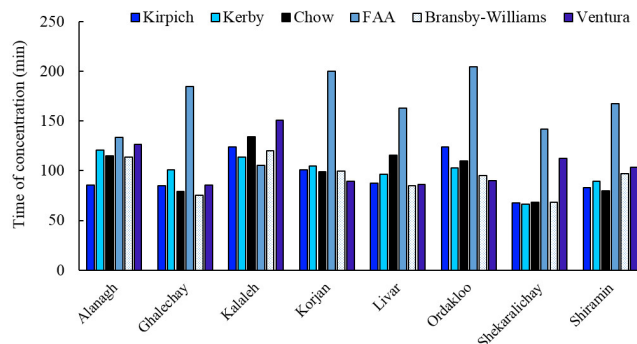
جدول ۲- مقادیر زمان تمرکز بر حسب دقیقه در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Fig. 2. Time of concentration (min) in studied catchments

Catchment	Hydrograph (observed TC)	Kirpich (1940)	Kerby (1959)	Chow (1962)	Federal Aviation Administration (1970)	Bransby-Williams (1980)	Ventura (2007)
Alanagh	115.5	85.5	120.4	115.2	133.3	113.4	126.7
Ghalechay	70.2	85.2	101.1	79.2	184.4	75	85.8
Kalaleh	132	124.2	113.6	134.4	105.6	120	151
Korjan	76.2	100.8	104.9	99	199.8	99.6	89.3
Livar	91.8	87.6	96.3	115.8	162.5	84.6	86.2
Ordakloo	102	123.6	102.8	109.8	204.7	95.4	90.1
Shekaralichay	66	67.8	66.1	68.4	141.66	112.5	112.5
Shiramin	84	82.8	89.4	79.8	167.6	97.2	103.3

پایین و طول کمتری برخوردارند. به طوری که در زیرحوضه آلانق، شیب ۲۲ درصد و طول آبراهه ۱۲/۷ کیلومتر، در زیرحوضه اردکلو شیب ۱۳ درصد و طول آبراهه ۱۹/۴۲ کیلومتر است. در زیرحوضه لیوار میزان شیب، ۱۶ درصد و طول آبراهه، ۱۳/۱۵ کیلومتر است. با این وجود در زیرحوضه‌های دیگر با مقادیر کمتر درصد شیب، طول آبراهه بزرگتر است.

بر اساس نتایج در مدل برانسی-ویلیامز در زیرحوضه‌های آلانق، اردکلو، لیوار و کلاله مقادیر برآوردی کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است که دلیل آن مقادیر کمتر هر دو عامل درصد شیب و طول آبراهه در این زیرحوضه‌ها است. زیرحوضه کلاله کمترین شیب (۸ درصد) و کمترین طول آبراهه (۱۰/۴۲ کیلومتر) را دارد. زیرحوضه‌های آلانق، اردکلو و لیوار نیز از درصد شیب



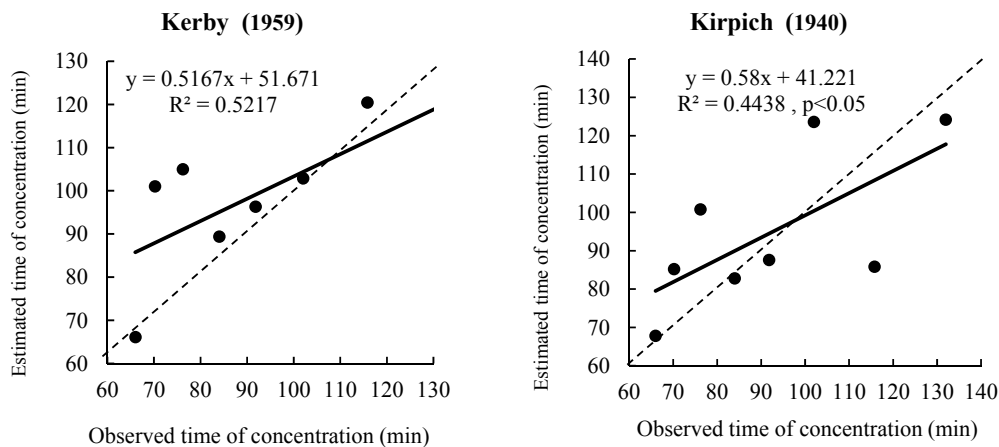
شکل ۳- زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Fig. 3. Observed and estimated time of concentration in studied catchments

درصد نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، حساسیت معادلات زمان تمرکز در مقادیر کم شیب به مراتب بالاتر است. در پژوهش حاضر، در اغلب زیرحوضه‌ها به جز کلالة، مدل سازمان هوانوردی امریکا دچار بیش‌برآوردی است و چنین وضعیتی به جز در زیرحوضه اردکلو، در مدل ونتورا نیز صادق است. برآورد بیشتر از واقعیت این دو مدل در زیرحوضه شکرعلی‌چای با بیشترین درصد شیب (۳۴درصد) بسیار آشکار است.

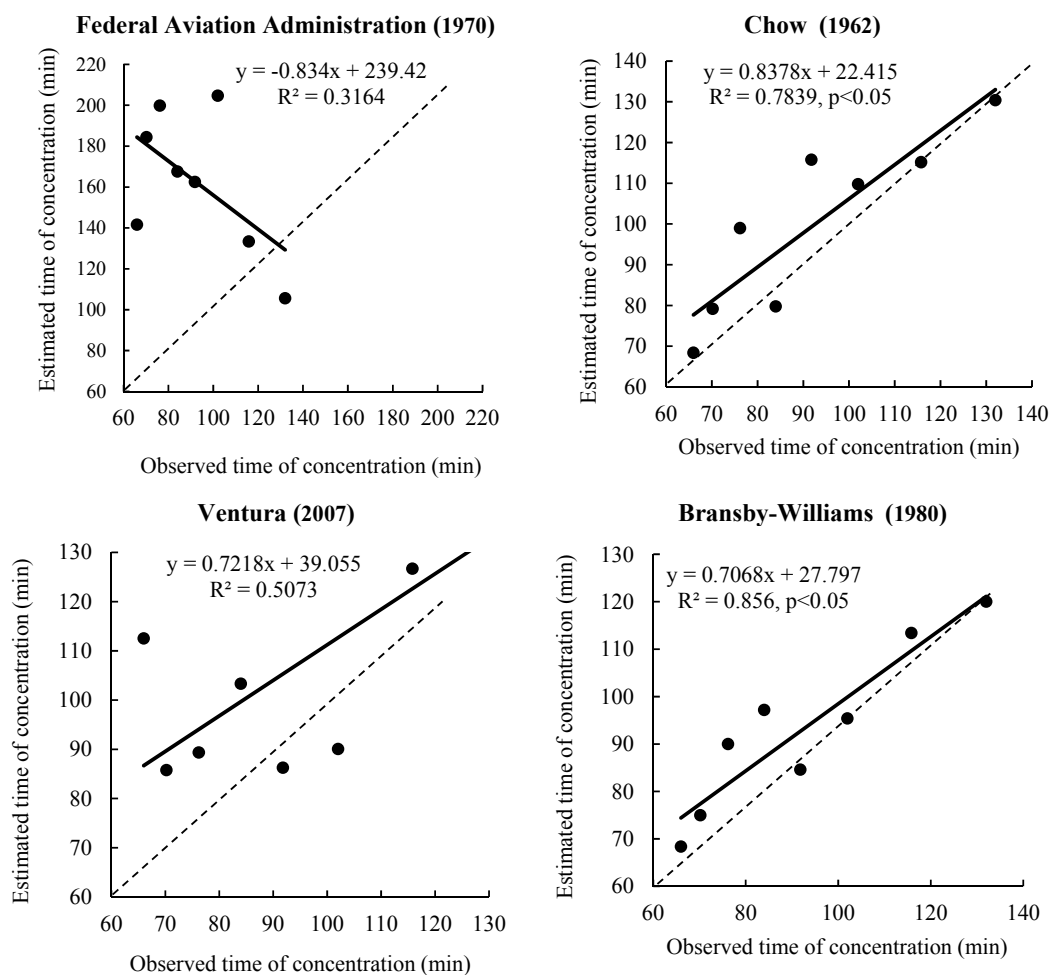
این نتیجه نشان می‌دهد در حوضه‌های مورد مطالعه نقش درصد شیب حوضه در کم برآورد و بیش‌برآورد زمان تمرکز، مستقیم است که دلیل آن، پستی و بلندی‌های زیاد و ویژگی کوهستانی در زیرحوضه‌ها است که با محل ارائه مدل‌ها تفاوت زیادی از نظر شرایط فیزیوگرافی حوضه وجود دارد. مدل برانسبی-ویلیامز در همه زیرحوضه‌ها برآورد نزدیک به واقعیت را نشان داد. این مدل در زیرحوضه‌های آلانق، شکرعلی‌چای، شیرآمین، قلعه‌چای و کرجان دارای اندکی بیش‌برآورد و در سایر زیرحوضه‌ها (اردکلو، کلالة و لیوار) دارای اندکی کم برآوردی است.

مقادیر برآوردی مدل‌های کربای، سازمان هوانوردی امریکا و ونتورا اغلب بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای هستند که یکی از دلایل آن این است که این مدل‌ها برای حوضه‌هایی با شیب کم ارائه شده‌اند (Harset et al., 2022). لذا، برای حوضه‌های کوهستانی با متوسط شیب بالا، مناسب نیستند. مطالعات Ghaffari and Talebi (2016) در زیرحوضه‌های سد قشلاق نشان داد که در زیرحوضه‌های خیلی مسطح که همزمان از آبراهه کوتاهی برخوردارند، میزان خطای برآورد زمان تمرکز بیشتر است. با این وجود روند ثابت و قابل‌توجهی برای همه روابط قابل‌مشاهده نیست. Kousari et al., (2010) نشان دادند که تغییرات جزئی میزان شیب به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز با شیب کم، تأثیر زیادی بر افزایش زمان تمرکز دارد و با افزایش شیب آبراهه تأثیر عواملی مانند طول آبراهه اصلی بر روی زمان تمرکز افزایش می‌یابد. مطالعات Azizian and Shokouhi (2015) در حوضه آبخیز ليقوان چای نشان داد که در همه مدل‌ها با افزایش مقدار شیب، مقدار زمان تمرکز ۲۰ درصد افزایش می‌یابد، اما با کاهش مقدار شیب، مقدار زمان تمرکز در بعضی از روش‌ها تا حدود ۱۰۰



شکل ۴- مقادیر زمان تمرکز مشاهده‌ای بر حسب دقیقه در زیرحوضه‌های مورد مطالعه طی دوره مطالعه ۳۰ ساله (۱۳۹۷-۱۳۶۷) و مقادیر زمان تمرکز برآوردی در مدل‌های تجربی، خطوط نقطه چین نشان‌دهنده خط ۱:۱ است.

Fig. 4. Observed and estimated time of concentration (min) in studied sub-basins during 30 years from 1989 to 2018, dotted lines show 1:1 reference line



ادامه شکل ۴

Fig. 4. Continued

رواناب سطحی بیشتر بوده و دبی جریان سریع‌تر به اوج می‌رسد و در نتیجه زمان تمرکز حوضه کوتاه‌تر می‌شود. طول حوضه، عامل مهم مؤثر بر زمان تمرکز مشاهده‌ای و زمان تمرکز برآوردی در برخی مدل‌های تجربی است. به‌طوری‌که بین زمان تمرکز مشاهده‌ای و طول حوضه همبستگی منفی معنی‌دار ($r = -0.80, p < 0.05$) وجود دارد. همچنین، همبستگی منفی معنی‌دار بین این ویژگی با زمان تمرکز برآوردی در مدل چاو ($r = -0.72, p < 0.05$)، مدل سازمان هوانوردی امریکا ($r = -0.72, p < 0.05$)، و مدل ونتورا ($r = -0.71, p < 0.05$) وجود دارد.

این نتایج نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های کشیده و با رودخانه طولانی‌تر، زمان تمرکز بیشتری دارند و این نتیجه نیز در برخی مدل‌های تجربی (چاو، سازمان

عوامل مؤثر بر زمان تمرکز: بررسی ماتریس همبستگی میان زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی و برخی ویژگی‌های حوضه (مساحت، اختلاف ارتفاع، درصد شیب، طول حوضه و ضریب شکل) نشانگر اثر منفی شیب حوضه بر زمان تمرکز مشاهده‌ای و زمان تمرکز برآوردی از برخی مدل‌های تجربی است. به‌طوری‌که همبستگی‌های منفی معنی‌دار میان شیب حوضه و زمان تمرکز مشاهده‌ای ($r = -0.77, p < 0.05$) و زمان تمرکز برآوردی در مدل‌های کریبیج ($r = -0.73, p < 0.05$)، چاو ($r = -0.83, p < 0.05$) و برانسی-ویلیامز ($r = -0.73, p < 0.05$) وجود دارد.

همبستگی منفی میان زمان تمرکز مشاهده‌ای و شیب حوضه نشان می‌دهد، در حوضه‌های آبخیز با شیب بیشتر به‌دلیل کاهش فرصت نفوذ آب به خاک، تولید

امریکا طول حوضه و در مدل ونتورا مساحت و طول حوضه، نقش مؤثری در برآورد زمان تمرکز دارد. برخی مطالعات نشان داد در شیب‌های بیشتر از ۱۲ درصد، نقش عامل شیب برعکس عمل می‌کند و منجر به بیش برآوردی در زمان تمرکز در مدل‌های تجربی می‌شود (Alamri et al., 2023).

نتایج پژوهش (Kousari et al., 2010)، نشان داد که تغییرات جزئی در درصد شیب به‌ویژه در شیب‌های کم، تأثیر زیادی بر افزایش زمان تمرکز دارد و با افزایش میزان شیب آبراهه تأثیر ویژگی‌هایی مانند طول آبراهه اصلی بر روی زمان تمرکز افزایش می‌یابد. پژوهش‌ها نشان داد چنانچه کاهش شیب همگام با کاهش طول حوضه باشد، تأثیر شیب بیشتر شده و مدل مقادیر کمتری برآورد می‌کند (Beven, 2020).

نتایج همچنین نشان می‌دهد، ارتباط قوی میان زمان تمرکز مشاهده‌ای و زمان تمرکز برآوردی از برخی مدل‌های تجربی (کربای، چاو، برانسیبی-ویلیامز و ونتورا) است به‌طوری که همبستگی مستقیم میان زمان تمرکز مشاهده‌ای و زمان تمرکز برآوردی از مدل کربای ($r=0.72$, $p<0.05$)، مدل چاو ($r=0.89$, $p<0.01$)، مدل برانسیبی-ویلیامز ($r=0.86$, $p<0.01$) و مدل ونتورا ($r=0.71$, $p<0.05$) برقرار است.

ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز: بررسی نتایج برآورد زمان تمرکز با استفاده از روش‌های تجربی و مقایسه آن با زمان تمرکز برگرفته از هیدروگراف زیرحوضه‌ها نشان داد، در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل برانسیبی-ویلیامز با میانگین خطای کمتر ($6/80$ درصد) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف 73 درصد، برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و در زیرحوضه‌های مورد مطالعه و حوضه‌های با شرایط مشابه در صورت عدم دسترسی به مقادیر مشاهده‌ای و جهت صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌توان از این مدل استفاده کرد. مدل چاو در مرتبه بعدی از نظر دقت برآورد قرار دارد و خطای برآورد آن نزدیک نه درصد است (جدول ۴).

هوانوردی امریکا و ونتورا) مشاهده می‌شود. مساحت زیرحوضه نیز عامل مؤثر دیگر بر زمان تمرکز مشاهده‌ای و زمان تمرکز برآوردی در برخی مدل‌های تجربی است و همبستگی منفی معنی‌دار آن با زمان تمرکز مشاهده‌ای ($r=-0.75$, $p<0.05$) و نیز زمان تمرکز برآوردی در مدل ونتورا ($r=-0.74$, $p<0.05$) و مدل چاو ($r=-0.74$, $p<0.05$) وجود دارد.

برخلاف تصور عمومی، این نتیجه نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های با مساحت کمتر از 50 کیلومترمربع (زیرحوضه‌های کوچک) (Marquette, 2009) از زمان تمرکز طولانی‌تری برخوردارند. یکی از دلایل همبستگی منفی طول و مساحت حوضه با زمان تمرکز، نقش مؤثرتر سایر عوامل مانند شیب، پوشش گیاهی و کاربری زمین است؛ به‌طوری که زیرحوضه کلالة با کوچک‌ترین مساحت ($31/32$ کیلومترمربع) و کمترین طول ($10/42$ کیلومتر)، طولانی‌ترین زمان تمرکز را دارد چرا که از یک سو از کمترین درصد شیب (8 درصد) و از سوی دیگر از بیشترین سطح پوشش گیاهی (جنگل) برخوردار است و در نتیجه اولویت سیل‌خیزی کم‌تری دارد.

از سوی دیگر، بررسی مشخصات فیزیکی زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد که حوضه‌های با شیب تندتر در منطقه از مساحت بزرگ‌تر و رودخانه درازتر برخوردارند و به این دلیل، با افزایش مساحت و طول، زمان تمرکز نیز بیشتر می‌شود. این نتایج نشانگر توجه جامع به همه عوامل و برهم‌کنش میان آنها در برآورد زمان تمرکز است. اختلاف ارتفاع و ضریب شکل از عوامل مؤثر بر زمان تمرکز حوضه‌ها در منطقه نیستند (جدول ۳). مطالعات Perdikaris et al., (2018) در نه زیرحوضه رود کردیت کانادا نشان داد درصد شیب و طول حوضه مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در برآورد زمان تمرکز در مدل‌های تجربی هستند.

همبستگی بین زمان تمرکز برآوردی و مشخصات زیرحوضه‌ها نشان داد که در مدل چاو، سه عامل مساحت، شیب و طول حوضه، در دو مدل کرپیچ و برانسیبی-ویلیامز عامل شیب، در مدل سازمان هوانوردی

جدول ۳- ماتریس همبستگی بین برخی از ویژگی‌های حوضه با زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Table 3. Correlations among observed and estimated time of concentration and characteristics of catchment

	Area	Height	Slope	Length	Shape coefficient	Kirpich	Kerby	Chow	FAA	Bransby-Williams	Ventura	Observed TC
Area	1											
Height	-0.16	1										
Slope	0.39	0.20	1									
Length	0.74*	0.03	0.49	1								
Shape coefficient	0.11	0.47	-0.44	0.10	1							
Kirpich	-0.49	-0.08	-0.83*	-0.20	0.34	1						
Kerby	-0.44	-0.20	-0.59	-0.39	0.20	0.59	1					
Chow	-0.74*	-0.27	-0.82*	-0.72*	0.15	0.73*	0.76*	1				
FAA	0.69	-0.48	0.12	-0.82*	0.01	0.01	-0.09	-0.35	1			
Bransby-Williams	-0.50	0.17	-0.73*	-0.54	0.56	0.62	0.79*	0.77*	-0.38	1		
Ventura	-0.74*	0.63	0.28	-0.71*	0.23	0.23	0.28	0.45	0.90*	0.63	1	
Observed TC	-0.75*	0.01	-0.77*	-0.80*	0.17	0.66	0.72*	0.89**	-0.56	0.86**	0.71*	1

** Correlation significant at $p < 0.01$; * Correlation significant at $p < 0.05$

جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

Table 4. Evaluation of efficiency of TC models in studied catchments

	R ²	AE	NS	RMSE
Bransby-Williams	0.85	6.80	0.73	3.28
Chow	0.78	8.97	0.66	3.70
Kerby	0.52	12.66	0.41	4.86
Kirpich	0.44	14.39	0.38	4.90
Ventura	0.50	14.51	0.18	5.75
FAA	0.31	36.13	-14.44	24.90

نتایج نشان داد، در میان مدل‌های تجربی مدل سازمان هوانوردی آمریکا با درصد خطای بالا (۳۶/۱۳ درصد) برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه مناسب نبوده و کارایی ضعیفی (با ضریب نش-ساتکلیف ۱۴/۴۴-) دارد. این مدل برای برآورد زمان تمرکز در فرودگاه‌های آمریکا با شیب بسیار کم به کار می‌رود و برای مناطق کوهستانی با شیب بالا مناسب نیست. مدل ونتورا با ضریب کارایی (نش-ساتکلیف) ۱۸ درصد و مدل کریچ با ۳۸ درصد برآورد ضعیفی از زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مورد مطالعه ارائه کردند. یکی از مهم‌ترین دلایل آن درصد شیب بالا در اغلب زیرحوضه‌های مورد مطالعه و شرایط کوهستانی منطقه است. مطالعات نشان می‌دهد، مدل ونتورا و کریچ در حوضه‌های بزرگ و کوهستانی و شیب‌دار، دچار خطای برآورد بیشتری است و کاربرد آن منجر به بروز خطاهای آشکار در میزان برآوردی زمان تمرکز و سیلاب می‌شود. Ghaffari and Talebi (2016)، برخی مطالعات نشان داده است، مدل‌های کریچ و چاو در شیب‌های کمتر از هفت درصد بهترین نتیجه را دارند (Razmjouyi, 2011). مطالعات در حوزه آبخیز ایور در خراسان شمالی در زمین‌هایی با شیب متوسط حوضه بین دو تا ۱۷/۶ نشان داد، روش کریچ بهترین نتیجه را در برآورد زمان تمرکز دارد (Shojaei

et al., 2016). (Motamed Vaziri (2007) نیز در حوزه آبخیز کرج نشان داد، مدل کریچ در شیب‌های بین سه تا هفت درصد نتایج مطلوبی دارد. مطالعات Razmjouyi (2011) در حوضه وردیج تهران و Azizian (2017) در حوزه آبخیز کسلیان و امامه نشان داد مدل برانسی-ویلیامز بهترین نتیجه را در برآورد نقطه تمرکز ارائه می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که اکثر روابط تجربی با وجود داشتن دو عامل اساسی (طول آبراهه و شیب) دارای تفاوت‌های اساسی در برآورد زمان تمرکز هستند که می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که هر کدام از روش‌ها ماهیت تجربی داشته و برای منطقه خاصی ارائه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، زمان تمرکز زیرحوضه‌های مورد بررسی متفاوت بوده و از ۶۶ دقیقه در زیرحوضه شکرعلی‌چای تا ۱۳۲ دقیقه در زیرحوضه کلالة تغییر می‌کند. تحلیل‌های همبستگی نشان داد که مساحت، شیب و طول زیرحوضه نقش اساسی در تغییرات زمان تمرکز زیرحوضه‌ها دارند. زیرحوضه‌هایی که از سطح بزرگ‌تر، رودخانه طولانی‌تر یا شیب بیشتری برخوردار هستند، زمان تمرکز کوتاه‌تری دارند. این نتایج نشان

مساحت حوضه نیز یکی از مؤلفه‌های اثرگذار در مدل ونتورا است. مدل سازمان هوانوردی امریکا با میانگین خطای ۳۶/۱۳ درصد کارایی کمتری در برآورد زمان تمرکز داشتند. دو عامل درصد شیب و طول حوضه در زیرحوضه‌های مورد مطالعه مهم‌ترین علت کارایی ضعیف این مدل است. مدل کرپیچ، مدل سازمان هوانوردی امریکا و مدل ونتورا در زیرحوضه‌های با شیب زیاد، برآورد ضعیف‌تری دارند و برای مناطق کوهستانی مورد مطالعه مناسب نیستند اما مدل برانسی-ویلیامز در زیرحوضه‌های کوهستانی مناطق نیمه خشک شمال غرب با شیب بین هشت و ۳۴ نتایج رضایت‌بخشی دارد. لذا، استفاده از این مدل در حوضه‌های مشابه که فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند، پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی که در تهیه داده‌های این مطالعه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید تمام نویسندگان است.

می‌دهد که میان عوامل مؤثر بر زمان تمرکز، برهمکنش وجود دارد و تأثیر سطح و طول حوضه در افزایش زمان تمرکز، تحت‌الشعاع درصد شیب است، به طوری که زیرحوضه‌های با سطح بزرگ و رودخانه درازتر به دلیل شیب اندک، زمان تمرکز طولانی دارند. این نتیجه نشان می‌دهد درصد شیب حوضه مهم‌ترین عامل کاهش زمان تمرکز و دبی اوج و افزایش سرعت سیلابی شدن در زیرحوضه‌های مورد مطالعه است.

لذا، در حوضه‌هایی که درصد شیب بالاتری دارند، استفاده از طرح‌های حفاظت خاک برای کاهش ضریب رواناب و طولانی شدن زمان تمرکز ضروری است. ارزیابی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در هشت زیرحوضه آبخیز نشان داد که مدل برانسی-ویلیامز با میانگین خطا ۶/۸۰ درصد و ضریب کارایی نش-ساتکلیف ۷۳ درصد مطلوب‌ترین برآورد را در زیرحوضه‌های مورد مطالعه ارائه می‌کند. مدل چاو در مرتبه بعدی از نظر خطای برآورد (نزدیک نه درصد) جای دارد. نقش افزایش شیب زیرحوضه در کاهش زمان تمرکز حوضه در برخی مدل‌های تجربی نیز بازتاب دارد؛ به طوری که همبستگی منفی شیب با زمان تمرکز برآوردی با مدل کرپیچ، مدل چاو و مدل برانسی-ویلیامز دیده می‌شود. همبستگی منفی طول حوضه در برآورد زمان تمرکز مدل‌های چاو، سازمان هوانوردی امریکا و ونتورا آشکار است.

منابع مورد استفاده

- Alamri, N., Afolabi, K., Ewea, H., Elfeki, A.M., 2023. Evaluation of the time of concentration models for enhanced peak flood estimation in arid regions. *Sustain.* 15(3), 1987.
- Al Islam, M., Hasan, H., 2020. Generation of IDF equation from catchment delineation using GIS. *Civil Engineer. J.* 6(3), 540-547.
- Azadnia, F., Rostami, N., Kamalimoghadam, R., 2009. Comprehension some of the empirical equation of time of the concentration in Mimane watershed of Ilam. *Iran Water Res.* 3(4), 21-34 (in Persian).
- Azizian, A., Shokouhi Fard, M., 2015. Evaluation and analysis of the study of different time-specific methods, case: Liqvan basin. *The Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management.* Tehran, Iran (in Persian).
- Azizian, A., 2017. Assessment and uncertainty analysis of different time of concentration methods. *Iranian J. Soil Water Res.* 48(2), 275-288 (in Persian).
- Barnston, A.G., 1992. Correspondence among the correlation, RMSE, and Heidke forecast verification measures; refinement of the Heidke score. *Weather Forecast.* 7(4), 699-700.
- Beven, K.J., 2020. A history of the concept of time of concentration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 2655-2670.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied hydrology.* New York: McGraw-Hill. 46 pages.
- Chow, V.T., 2010. *Handbook of applied hydrology.* McGraw Hill Book Co., New York. 588 pages.
- Dastorani, M.T., Abdollahwand, E., Asareh, M.H., Talebi, A., 2013. The evaluation of time travel flow channel of estimation for equations time concentration empirical some of application. *Watershed Manage. Res.* 99, 42-52 (in Persian).

- Dave, T., 2019. *Fundamentals of hydrology*. Routedage pub. London, 3rd ed. 221 pages.
- de Almeida, I.K., Almeida, A.K., Steffen, J.L., 2016. Model for estimating the time of concentration in watersheds. *Water Resour. Manage.* 30, 4083-4096.
- Dingman, S.L., 2002. *Physical hydrology*. Prentice Hall. 646 pags.
- Federal Aviation Agency (FAA), 1970. *Airport drainage: department of transport advisory circular*. Washington DC, USA. 83 pages.
- Ghaffari, Gh., Talebi, Z., 2016. Evaluation some of the empirical relations to estimate the concentration time and identify the most important physiographic. *J. Watershed Manage. Res.* 7(14), 188-196.
- Goel, M.K., 2011. Runoff coefficient. In: Singh V.P., Singh P. and Haritashya U.K. (eds) *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer. Dordrecht. pp. 952-953.
- Harset, D., Jayadi, R., Legono, D., 2022. The influence of two different time of concentration equations on the GIUH-based flood hydrograph estimates of Keduang and Temon sub-watersheds, Indonesia. *Current Applied Sci. Technol.* 10, 55003.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydro physical approach to quantitative morphology. *Geolog. Soci. America bullet.* 56(3), 275-370.
- Jamshidian, A., Heidarnajad, M., 2018. The effect of constructed structures on time of concentration, case study: Izeh watershed. *J. Water Soil Resour. Conserv.* 7(3), 39-54 (in Persian).
- Kamath, M.A., Varun, V.M., Dwarakish, G.S., Kavyashree, B., Shwetha, H.R., 2012. Kirpich and 448illiams times of concentration in musle: a case study. *ISH J. Hydraulic Engineer.* 17(2), 1-13.
- Kerby, W., 1959. Time of concentration for overland flow. *Civ. Eng.* 29, 174.
- Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineer.* 10(6), 362-375.
- Kousari, M.R., Saremi Naeni, M.A., Tazeh, M., Frozeh, M.R., 2010. Sensitivity analysis of some equations for estimating of time of concentration in watersheds. *J. Arid Biome.* 1(1), 57-69 (in Persian).
- Legono, D., Harset, D., Hairani, A., Ikhsan, J., Harsanto, P., 2022. Precursory characteristics of flash flood occurrence in small catchment of upper Brantas River. In *IOP conference series: Earth and Environmental Science.* 1105(1), 12002.
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graohical methods for evaluating solute transport models. Overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51-73.
- Marquette, C.M., 2009. *Water and development, Volume II*. EOLSS Pub. Oxford. UK. PP. 167.
- Mata-Lima, H., Vargas, H., Carvalho, J., 2007. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. *Revista Escola de Minas* 60(3), 40-56 (in Portuguese, summary in English).
- McCuen, R.H., Wong, S.L., Rawls, W.J., 1984. Estimating urban time of concentration. *J. Hydraulic Engineer.* 110 (7), 887-904.
- Mourier, B., Walter, C., Merot, P., 2008. Soil distribution in valleys according to stream order. *Catena* 72, 395-404.
- Motamed Vaziri, B., 2007. Investigating the effectiveness of the Kerpich method in estimating the time of flood concentration, case study: Karaj Watershed. *The Fourth National Conference of Iran Watershed Science And Engineering, Watershed Management, Karaj, Iran* (in Persian).
- Murillo-Bermúdez, L.F., Martim, A.L.S.S., de Abreu, A.E.S., Fais, L.M.C.F., Dalfré Filho, J.G., 2022. Estimation of the time of concentration from morphometric and hydrological monitoring parameters in São Paulo state watersheds. *Ciência e Natura.* 44, 24-44.
- Naghibi, S.A., Vafakhah, M., Moghaddam Nia, A., Eslamian, S., 2018. Evaluation of some probability distribution functions for derivation of unit hydrograph in the Bar Watershed, Iran. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.* 8(2), 134-147.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282-290.
- Parsamehr, A.H., Khosravani, Z., 2017. The use of empirical relationships in estimating the time of concentration of watersheds and investigating the sensitivity of parameters affecting it. *The 12th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran*. Malayer, Iran (in Persian).
- Perdikaris, J., Gharabaghi, B., Rudra, R., 2018. Reference time of concentration estimation for ungauged catchments. *Earth Sci. Res.* 7(2), 58-73.
- Razmjouyi, N., 2011. A comparison of empirical relationships in the estimation of concentration time in the 22nd district of Tehran. *The 7th National Conference of Watershed Engineering Sciences of Iran*, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- Roux, H., Amengual, A., Romero, R., Bladé, E., Sanz-Ramos, M., 2020. Evaluation of two hydrometeorological ensemble strategies for flash-flood forecasting over a catchment of the eastern Pyrenees. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20(2), 425-450.

- Shahbazi, A., Khaliqi Sygarodi, S., Malekian, A., Salajegheh, A., 2014. Selection of the best empirical formula to estimate time of concentration in urban watersheds, case study: Mahdasht. *J. Range Watershed Manage.* 67(3), 419-435 (in Persian).
- Shojaei, S., Asghari, A., Alipour, H., Hasheminasab, S.N., 2016. Comparison of some empirical relationships in estimation of time concentration of the watershed. *The Third International Conference on Research in Engineering, Science and Technology, Estahban, Iran* (in Persian).
- Todd, D., *Ground water hydrology*. 2004. 3rd ed. Wiley and son Inc. New York. 638 pages.
- Wood, P.J., Dykes, A.P., 2002. The use of salt dilution gauging technique: Ecological consideration and insights. *Water Res.* 36, 3054-3062.
- Vaezi, A.R., 2020. *Water erosion (processes and models)*. Zanjan University, Zanjan. Iran. 453 pages (in Persian).
- Zolghadr, M., Rafiee, M.R., Esmailmanesh, F., Fathi, A., Tripathi, R.P., Rathnayake, U., Gunakala, S.R., Azamathulla, H.M., 2022. Computation of time of concentration based on two-dimensional hydraulic simulation. *Water* 14, 3155.