نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 19, No. 71, Winter 2026

سال نوزدهم- شماره ۷۱- زمستان ۱۴۰۴

Evaluation of Concentration Time Estimation Equations in Selected Watersheds of Ardabil Province

Saeed Safari*[1], Ali Reza Vaezi[2], Hossein Shahab Arkhazloo[3]

Received: 25-02-2026, Revised: 02-05-2026, Accepted: 19-05-2026, Published: 23-05-2026

https://doi.org/10.22034/19.71.7

Extended Abstract

Introduction

Time of concentration (Tc) is one of the most critical hydrological parameters in rainfall-runoff analysis, widely used for estimating peak flood discharge, designing hydrographs, and determining the dimensions of hydraulic structures. Inaccurate estimation of Tc may lead to erroneous peak discharge calculations, resulting in uneconomical or unsafe hydraulic designs. Since most empirical equations for estimating Tc have been developed based on data from specific regions, their direct application to watersheds with different climatic and geomorphological conditions especially in semi-arid and mountainous regions may involve considerable errors. Therefore, evaluating and comparing these equations under the local conditions of Ardabil Province is essential. The steep slopes of the region, combined with high-intensity rainfall, can generate large amounts of runoff very rapidly, making the selection of an appropriate Tc equation crucial for accurate flood estimation and proper design of hydraulic infrastructure. Although many empirical equations are commonly used, few have been systematically evaluated to determine their applicability to the unique physiographic characteristics of northwestern Iran. This study aims to evaluate eight empirical Tc estimation methods against observed data from 15 watersheds in Ardabil Province, identify the most accurate equation for local conditions, and assess the influence of morphometric characteristics on model performance. The findings are expected to improve hydrological modeling and support safer watershed management decisions in semi-arid mountainous environments.

Materials and Methods

This study was conducted in 15 watersheds located in the central part of Ardabil Province, including Aladizgeh, Iyril, Barough, Balighloo Chay, Samian, Soola, Shams-Abad, Amooghin, Anbaran, Kozeh-Topraghi, Namin, Naneh-Karan, Nooran, Nair, and Hir. Morphometric characteristics—including area, basin length, main channel length, mean slope, shape coefficients (Horton, elongation ratio, circularity ratio, Gravelius), drainage density, and bifurcation ratio—were extracted using ArcGIS software, topographic maps, and Google Earth, followed by field verification. Observed Tc values were derived from hourly hydrometric data over the period 2009–2019. For six watersheds equipped with limnigraphs, flood hydrographs were directly recorded. For the remaining nine watersheds with only stage data, reliable stage-discharge rating curves were used to convert water levels into hourly discharge, and direct runoff hydrographs were reconstructed. Following NRCS and Chow (1988) standard procedures, Tc

*1 - PhD Student of Soil Physics and Conservation, Faculty of Agriculture, University of Zanjan. *Corresponding Author Email: s1366saeed@gmail.com
2. Full Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.
3. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili.

was determined as the time interval from the end of effective rainfall to the inflection point on the recession limb of the hydrograph after separating base flow using numerical or semi-logarithmic methods. Tc was then estimated using eight empirical equations: Bransby–Williams (1980), Giandotti (1934), Chow (1962), FAA (1970), California (1942), Kerby (1959), Kirpich (1940), and Ventura (2007). Model performance was evaluated using R^2, RMSE, ME, MAE, and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). Pearson correlation analysis examined relationships between Tc and morphometric parameters. All analyses were performed using SPSS 22, Excel 2021, and ArcGIS 10.8.2.

Results and Discussion

Observed Tc in the studied watersheds ranged from 1.07 to 10.41 hours and exhibited very strong, significant correlations with basin area ($r = 0.97$, $p < 0.01$), basin length ($r = 0.97$, $p < 0.01$), and main channel length ($r = 0.91$, $p < 0.01$), indicating that geometric dimensions are the dominant controlling factors. The FAA method achieved the best overall performance, with an NSE of 0.92, the lowest RMSE (0.67 hours), and the lowest MAE (0.53 hours). Its superiority is attributed to the consistency of its equation structure with the key controlling factors—basin area and flow path length. The California (NSE = 0.88) and Bransby–Williams (NSE = 0.78) methods also demonstrated acceptable accuracy. In contrast, the Ventura method showed the weakest performance, with a negative NSE (–0.14) and the highest error values (RMSE = 2.44, MAE = 1.67). Several equations, including Chow and Kirpich, tended to systematically underestimate Tc, which could lead to overestimation of peak discharge. Model performance improved in medium-to-large watersheds, while small, steep catchments showed higher variability and estimation errors. No single equation performed uniformly across all conditions, highlighting the scale sensitivity of empirical formulations and the need for local evaluation.

Conclusion

Based on the findings of this study, the Federal Aviation Administration (FAA) method is recommended as the most suitable equation for estimating Tc in the semi-arid and mountainous watersheds of Ardabil Province. The FAA method demonstrated balanced performance with minimal bias and high efficiency. The California and Bransby–Williams methods may be used as alternatives but require more caution due to systematic underestimation or overestimation. In contrast, the Ventura and Chow methods are not recommended for application in this region. Due to the strong dependence of model performance on watershed physical characteristics, it is strongly recommended that any selected equation be locally calibrated using hydrometric data before practical application in hydraulic and watershed structure design. Where sufficient data are unavailable, combining results from superior equations (e.g., FAA and Bransby–Williams) is advised to reduce uncertainty and improve design safety and accuracy. The results highlight that applying empirical formulas developed in different geomorphological and climatic settings without regional evaluation can greatly increase uncertainty in peak discharge estimation. Therefore, in similar semi-arid mountainous environments, integrating local calibration techniques with morphometric analysis can significantly enhance the reliability of hydrological modeling, the safety and sustainability of watershed and hydraulic structure design, and ultimately contribute to more effective flood risk management.

Keywords: Watershed management, Mountainous watershed, Peak flood discharge, Hydrological models, Semi-arid region.

Article Type: Research Article

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere appreciation for the financial and moral support provided by the University of Zanjan and Mohaghegh Ardabili University in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the content and findings of

this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this study will be made available upon reasonable request through correspondence with the corresponding author.

Authors' contribution

Saeed Safari: Data collection and preparation, data analysis, and manuscript writing.

AliReza Vaezi: Project supervision, manuscript review, and editing.

Hossein Shahab Arkhazloo: Project consultation and manuscript review.

Citation: Safari S, Vaezi A, Shahab Arkhazloo H. Evaluation of Concentration Time Estimation Equations in Selected Watersheds of Ardabil Province. jwmseir 2025; 19 (71) : 106-122

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 71, PP 106-122

Publisher: Watershed Management Society of Iran
© Author(s)

ارزیابی معادلات برآورد زمان تمرکز در برخی حوزه‌های آبخیز استان اردبیل

سعید صفری*[1]، علی‌رضا واعظی[2]، حسین شهاب آرخازلو[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶ ، تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
https://doi.org/10.22034/19.71.7

چکیده

زمان تمرکز یکی از پارامترهای مهم هیدرولوژیکی در برآورد دبی اوج سیلاب، طراحی هیدروگراف و ابعاد سازه‌های هیدرولیکی است. این پژوهش به ارزیابی عملکرد هشت رابطه تجربی برآورد زمان تمرکز در ۱۵ حوزه آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی بخش مرکزی استان اردبیل پرداخت. زمان تمرکز مشاهده‌ای از داده‌های هیدرومتری دوره ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ استخراج شد و با مقادیر برآورد شده توسط روابط جیاندوتی، کرپیچ، کالیفرنیا، کربای، چاو، هوانوردی فدرال آمریکا (FAA)، برانسبی_ویلیامز و ونتورا مقایسه شد. ارزیابی آماری با استفاده از شاخص‌های R^2، RMSE، MAE، ME و NSEانجام گرفت. نتایج نشان داد زمان تمرکز مشاهده‌ای بین ۱/۰۷ تا ۱۰/۴۱ ساعت متغیر بوده و همبستگی بسیار قوی با مساحت حوضه (r=0.97, p<0.01)، طول حوضه (r=0.97, p<0.01) و طول آبراهه اصلی (r=0.91, p<0.01) دارد. از میان روابط بررسی‌شده، روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA)با NSE=0.92، RMSE=0.67 و MAE=0.53 بهترین عملکرد را داشت. روش‌های کالیفرنیا (NSE=0.88) و برانسبی–ویلیامز(NSE=0.78) نیز دقت قابل‌قبولی نشان دادند. در مقابل، روش ونتورا با NSE منفی (۰/۱۴-) ضعیف‌ترین عملکرد را داشت و برخی روابط (مانند چاو و کربای) تمایل به کم‌برآورد سیستماتیک زمان تمرکز داشتند. یافته‌ها حاکی از آن است که دقت روابط تجربی به شدت به ویژگی‌های مورفومتری حوزه آبخیز وابسته است و هیچ رابطه‌ای در همه شرایط عملکرد یکنواخت ندارد. بر این اساس، برای حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی استان اردبیل، روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) به عنوان مناسب‌ترین رابطه پیشنهاد می‌شود. با این حال، توصیه می‌شود پیش از کاربرد عملی، روابط منتخب با داده‌های محلی واسنجی شوند یا از ترکیب روابط برتر استفاده شود تا دقت و ایمنی طراحی افزایش یابد.

کلیدواژه‌ها: آبخیزداری، حوزه آبخیز کوهستانی، دبی اوج سیلاب، مدل‌های هیدرولوژیکی، منطقه نیمه‌خشک.

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: صفری سعید، واعظی علی‌رضا، شهاب آرخازلو حسین. ارزیابی معادلات برآورد زمان تمرکز در برخی حوزه‌های آبخیز استان اردبیل. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱٤۰٤؛ (۱۹)۷۱؛ ۱۰٦-۱۲۲
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ۷۱، ۱۰٦-۱۲۲

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

© نویسندگان

CC BY NC

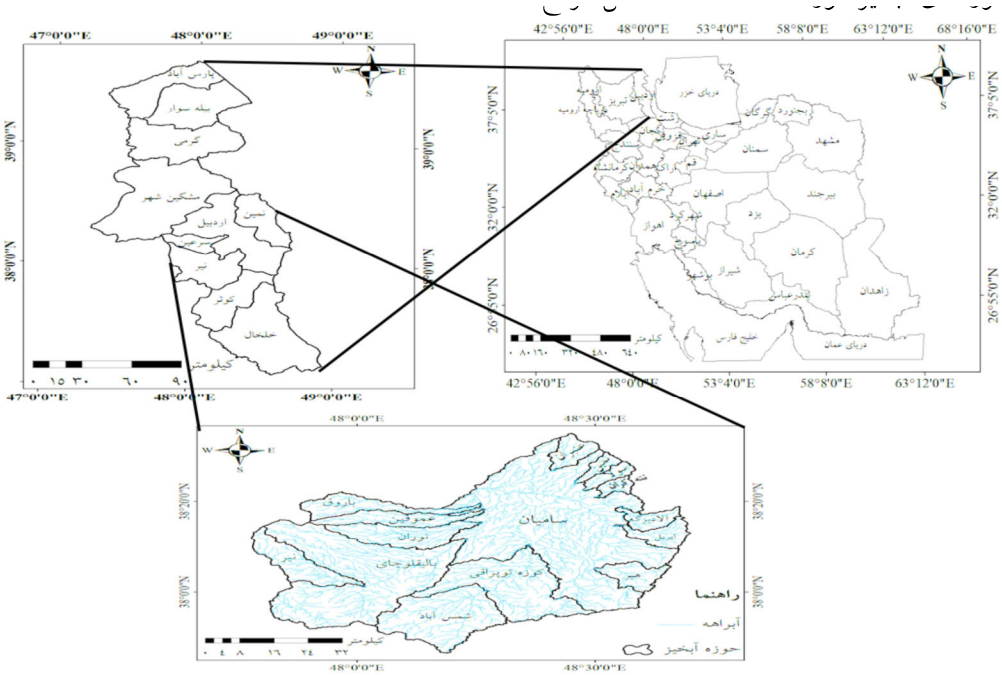
۱- دانشجو دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛ زنجان، ایران.*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:s1366saeed@gmail.com
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

مقدمه

زمان تمرکز یکی از مشخصه‌های کلیدی هیدرولوژیکی است که به عنوان زمان لازم برای رسیدن رواناب از دورترین نقطه هیدرولیکی حوضه به نقطه خروجی تعریف می‌شود [۲۰]. به عبارت دیگر زمان تمرکز مدت زمانی است که دورترین قطره نسبت به نقطه تمرکز الزام دارد تا مسیرخود را طی کند و به آن نقطه برسد. منظور از دورترین قطره نسبت به نقطه تمرکز ممکن است فاصله فیزیکی آن دو نباشد بلکه فاصله هیدرولیکی آن دو مدنظر است [۱]. این مشخصه در روش‌های برآورد دبی اوج سیلاب (مانند روش rationa)، طراحی هیدروگراف و مدل‌سازی رواناب نقش اساسی دارد. برآورد نادرست می‌تواند منجر به خطا در محاسبه دبی اوج شود؛ برآورد بیش از حد باعث کم‌برآورد دبی و برآورد کمتر از حد آن منجر به بیش‌برآورد دبی و طراحی نامناسب سازه‌ها می‌شود [۲۷]. معادلات برآورد زمان تمرکز عمدتاً تجربی هستند و بر اساس داده‌های مناطق خاص توسعه یافته‌اند، از جمله Kirpich (1940)، Kerby (1959)، FAA، Velocity NRCS، Ventura، Giandotti، Bransby-Williams ، Schaake و Carter [٦ و١٤]. این معادلات معمولاً از متغیرهایی مانند مساحت حوضه، طول مسیر جریان، شیب متوسط ، ضریب رواناب و شدت بارندگی استفاده می‌کنند. با این حال، به دلیل تفاوت‌های اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و نوع جریان، دقت این معادلات در مناطق مختلف متفاوت است و اغلب خطاهای قابل‌توجهی ایجاد می‌کند بنابراین، ارزیابی عملکرد این معادلات در حوضه‌های محلی و شناسایی بهترین گزینه‌ها ضروری است [۲].

بر اساس پژوهش‌های غفاری و طالبی [۸]، در حوضه سد قشلاق سنندج از بین روابط بررسی شده، رابطه برانسبی ویلیامز با میانگین درصد خطای نسبی ٤٣/٥ درصد و ریشه مجموع مربعات خطای ١/٨٣ نتایج قابل‌قبولی در برآورد زمان تمرکز داشت و مدل چاو با درصد خطای کمتر از ٥٧ درصد و مجموع ریشه میانگین مربعات خطا کمتر دو، نتایج نسبتاً مناسبی داشت. رزنده و همکاران [۲۲]، در تحقیقی عملکرد دوازده رابطه تجربی و نیمه‌تجربی برآورد زمان تمرکز را در حوضه‌های کوچک برزیل مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روابط مبتنی بر شیب و طول جریان (مانند Kirpich و Kerby) در حوضه‌های با شیب زیاد دقت بالاتری دارند، در حالی که روابط مبتنی بر مساحت صرف در حوضه‌های پهن عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهند. ذوالقدر و همکاران [۲۹]، به محاسبه زمان تمرکز بر اساس شبیه‌سازی هیدرولیکی دوبعدی پرداختند. نتایج نشان داد که در روش‌های تجربی زمان تمرکز، حداکثر خطا بیش از ٣٠٠ درصد و حداقل خطا ٦/٧ درصد برای منطقه مورد مطالعه بود. خطاهای نسبی خروجی‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی بین ٣ تا ٢٧ درصد بودند. همچنین بیان کردند که تنها سه روش تجربی، یعنی سیمس و هاوکینز، SCSlag و یِن و چائو، به ترتیب با خطاهای ٦/٧، ٨/٦٦ و ١٣/٥ درصد کمترین خطا را داشتند که می‌توانند برای منطقه مورد مطالعه و مناطقی با ویژگی‌های هیدرولوژیکی مشابه توصیه شوند. در مناطق گرمسیری، سلطان و همکاران [۲۷]، در شش حوضه کوچک اتیوپی، ١٠ روش تجربی را با داده‌های ١٧٦ رویداد باران–رواناب مقایسه کردند و نشان دادند که تخمین‌ها بسیار متغیر است (تفاوت تا ٢/٦ ساعت برای زمان تأخیر و ٤/٤ ساعت برای زمان تمرکز)، اکثر روش‌ها زمان تمرکز را کم‌برآورد می‌کنند که منجر به بیش‌برآورد حجم رواناب می‌شود. روش‌های Simas–Hawkins و SCS velocityبا در نظر گرفتن جریان بهترین عملکرد را داشتند. مسینجر و همکاران [١٥]، در پژوهشی به ارزیابی روش‌های برآورد زمان تمرکز در چهار حوضه کوچک روستایی در ویرجینیای غربی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مقادیر مشاهده‌شده زمان تمرکز بین ١٨ تا ٣٨ دقیقه متغیر بوده و روش منطقی با واسنجی محلی، دقت قابل‌قبولی در برآورد این پارامتر دارد، اما تعمیم مستقیم روابط تجربی بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه منجر به خطاهای قابل‌توجه می‌شود. مطالعات متعددی عملکرد معادلات مختلف زمان تمرکز را در شرایط اقلیمی متنوع ارزیابی کرده‌اند.

با توجه به نقش اصلی زمان تمرکز در برآورد دبی اوج سیلاب، طراحی هیدروگراف و تعیین اندازه سازه‌های هیدرولیکی، انتخاب رابطه مناسب برای محاسبه این مشخصه در هر منطقه بسیار مهم است. چون بیشتر معادلات تجربی زمان تمرکز بر اساس داده‌های مناطق خاص با شرایط اقلیمی و ژئومورفولوژیکی متفاوت توسعه یافته‌اند، کاربرد مستقیم آن‌ها در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی استان اردبیل می‌تواند منجر به خطاهای قابل‌توجه در برآورد زمان تمرکز و در نتیجه بیش‌برآورد یا کم‌برآورد دبی اوج شود. با توجه به تنوع قابل توجه ویژگی‌های مورفومتری حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه، از حوضه‌های کوچک و پرباران تا حوضه‌های بزرگ و کشیده، و همچنین اهمیت مدیریت سیلاب و طراحی سازه‌های آبخیزداری در منطقه، ارزیابی و مقایسه عملکرد روابط مختلف و شناسایی مناسب‌ترین معادله برای شرایط محلی لازم است. عزیزی و همکاران [۳]، با ارزیابی شاخص جامع آسیب‌پذیری سیلاب(FVI) در ٢٦ حوزه آبخیز استان اردبیل، نشان دادند که حدود ٨٠درصد از مساحت استان اردبیل (شامل ٤٦.٩٧ درصد با آسیب‌پذیری خیلی بالا و ٣٣.٦٣ درصد با آسیب‌پذیری بالا) در معرض تنش سیلابی قرار دارد. این مطالعه همچنین تأکید کرد که وقوع رویدادهای حدی اقلیمی و هیدرولوژیکی در مناطق نیمه‌خشک مانند استان اردبیل در حال افزایش است و تمامی حوضه‌های موردمطالعه، به جز بخش‌های کوچکی از مرکز، شرق و شمال استان، تحت تأثیر خطر سیلاب هستند. صلاحی و بهروزی [۲۳]، در مطالعه پتانسیل سیل‌خیزی دشت اردبیل با استفاده از پارامترهای محیطی، مشاهدات نقاط سیل گرفته و بدون سیل، و الگوریتم‌های پیش‌بینی شامل جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون لجستیک (LR) بیان کردند که خروجی پارامترهای مؤثر در سیل‌خیزی نشان داد که مناطق حاشیه‌ای اطراف مرکز دشت اردبیل، پتانسیل سیل‌خیزی کمتری نسبت به مناطق مرکزی دارند. نتایج همچنین نشان داد که با حرکت از جنوب‌غرب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبخیز موردمطالعه

Fig 1. Geographic location of the studied watersheds

دشت به سمت شمال‌شرق آن، درجه خطر سیل افزایش می‌یابد. این افزایش پتانسیل سیل‌خیزی در اطراف زهکش اصلی دشت بیشتر از سایر مناطق است. مصطفی‌زاده و همکاران [۱۷]، با بهره‌گیری از داده‌های ۳۲ ایستگاه آب‌سنجی در استان اردبیل طی دوره ٤٠ ساله (۱۹۸٤ تا ۲۰۲٤)، الگوهای فصلی و توزیع مکانی سیلاب‌ها را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که حدود ٦٣/٦٣ درصد از سیلاب‌ها در ماه آوریل رخ می‌دهد و تقریباً تمام رویدادهای سیلابی در فصل بهار متمرکز است. همچنین نقشه‌های هم‌شدت سیلاب[1] آشکار ساخت که فراوانی سیلاب در مناطق مرکزی، شمالی و ارتفاعات استان به مراتب بیشتر از سایر نواحی است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که سیلاب‌های استان اردبیل عمدتاً از نوع بهاری و ناشی از ذوب برف همراه با بارندگی‌های شدید هستند که برآورد دقیق زمان تمرکز را برای پیش‌بینی دبی اوج ضروری می‌سازد. این یافته‌ها ضرورت انجام پژوهش‌های محلی برای برآورد دقیق پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر زمان تمرکز را دوچندان می‌کند. بنابراین، در این پژوهش هدف برآورد زمان تمرکز با روش‌های مختلف، افزایش دقت مدل‌سازی هیدرولوژیکی و فراهم کردن شرایط علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه‌های آبخیز استان اردبیل انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در ۱۵ حوزه آبخیز در بخش مرکزی استان اردبیل در شمال غرب ایران انجام گرفت. محدوده‌های مطالعاتی با توجه به اینکه تعداد بیشتر ایستگاه‌های هیدرومتری و همچنین ایستگاه‌هایی که دارای داده‌های آماری مربوط به ۱۰ سال و بیشتر در این ایستگاه‌ها قرار دارد، تعیین و انتخاب شدند. حوضه‌های انتخابی شامل (آلادیزگه، ایریل، باروق، بالیقلوچای(پل الماس)، سامیان، سولا، شمس آباد، عموقین، عنبران، کوزه توپراقی، نمین، ننه‌کران، نوران، نیر و هیر) هستند (شکل ۱).

داده‌های هواشناسی و هیدرومتری از اداره کل هواشناسی استان اردبیل و سازمان آب منطقه‌ای اردبیل اخذ شد. خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها شامل مساحت، طول، ارتفاع و شیب از طریق مطالعات صحرایی، نقشه‌های گوگل ارث و وارد کردن نقشه‌های توپوگرافی پس از ژئورفرنس کردن آن‌ها در محیط ArcGIS به‌دست آمد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم غالب نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک اردبیل، میانگین بارندگی سالانه حدود ۳۰٤ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۹ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی در سطح استان بین ۲۵۰ تا ٦۰۰ میلی‌متر در نوسان بوده و بیشترین بارش‌ها در فصل بهار رخ می‌دهد [۳]. کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه عمدتاً شامل مراتع (با روند کاهشی)، اراضی زراعی دیم و آبی (با روند افزایشی)، جنگل‌ها (با روند کاهشی) و مناطق مسکونی (با روند افزایشی) است. به طوری‌که در حوزه آبخیز سامیان، مراتع ۹/۷۵ درصد کاهش و اراضی کشاورزی آبی ۸/٤٥ درصد افزایش یافته است [۲۱]. در مجموع، کاربری غالب در اکثر حوزه‌ها مرتع و زراعت دیم و آبی بوده و حوزه‌های آبخیز آلادیزگه، ایریل، سامیان و ننه‌کران دارای کاربری جنگل است.

1- Iso-severity

طول حوزه آبخیز، طول رودخانه اصلی در محیط ArcGIS و نقشه‌های گوگل ارث با احتساب تمام پیچ وخم آبراهه اصلی اندازه‌گیری شد. ضرایب شکل حوضه به روش‌های ضریب شکل (هورتون، ۱۹۳۲)، نسبت کشیدگی (شیوم، ۱۹۵٦)، ضریب گردی (میلر، ۱۹۵۳) و گراولیوس (استرالر، ۱۹٦٤) با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ٤ به‌دست آمدند.

$Rf = A / L^2$ Horton (1932) (۱)

که در آن: A مساحت حوضه (km^2) و L طول حوضه، یعنی فاصله دهانه خروجی تا دورترین نقطه حوضه (km) است. مقادیر کوچک‌تر از ۰/۵ معمولاً نشان‌دهنده حوضه کشیده، و نزدیک به یک نشان‌دهنده حوضه نزدیک به مربعی است.

$Re = D / L$ Schumm (1956) (۲)

که در آن: D قطر دایره‌ای است که مساحتش با مساحت حوضه برابر است و L طول حوضه. هرچه Re به یک نزدیک‌تر باشد، حوضه گردتر و کمتر کشیده است. مقادیر کوچک‌تر، حوضه کشیده‌تر را نشان می‌دهند.

$Rc = 4\pi A / P^2$ Miller (1953) (۳)

که در آن: A مساحت حوضه و P مساحت دایره‌ای است که محیط آن برابر محیط حوضه است. هرچه Rc به یک نزدیک‌تر باشد، حوضه گردتر و کمتر از یک حوضه را کشیده‌تر نشان می‌دهند.

$Kc = 0.282 \times P / \sqrt{A}$ Strahler (1964) (٤)

که در آن: P محیط حوضه (km) و A مساحت حوضه (km^2) است. برای یک حوضه کاملاً دایره‌ای، ضریب برابر یک است. هرچه از یک بزرگ‌تر شود، حوضه کشیده‌تر و از حالت دایره‌ای دورتر است.

دو مشخصه مهم نسبت انشعاب و تراکم آبراهه[1] برای توصیف ساختار شبکه آبراهه‌ها و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از رابطه‌های ۵ و ٦ به‌دست آمدند.

$$BR = \left[\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_{i-1}}{n_i}\right]\frac{1}{i-1} \quad (۵)$$

که در آن: BR نسبت انشعاب پذیری، n_1، n_2 و n_i تعداد آبراهه درجه ۱و ۲و. .. تا i و i تعداد درجات تعیین شده در حوضه است. هر چه مقدار عددیBR بزرگتر باشد، نشان می‌دهد هیدروگراف، دبی اوج کوتاه و زمان پایه زیاد دارد و برعکس [۱۹].

$Dd = L / A$ تراکم آبراهه(٦)

که در آن: L مجموع طول تمام آبراهه‌ها در حوضه (km) و A مساحت حوضه (km^2) است.

شکل ۲ مجموعه‌ای از نقشه‌های ارتفاع و شبکه آبراهه‌ای که هر یک از ۱۵ حوزه آبخیز مورد مطالعه (آلادیزگه، ایریل، باروق، بالیقلوچای(پل الماس)، سامیان، سولا، شمس آباد، عموقین، عنبران، کوزه توپراقی، نمین، ننه‌کران، نوران، نیر و هیر) را به تفکیک نشان می‌دهد.

1- Bifurcation Ratio

برآورد زمان تمرکز در حوزه‌های آبخیز: در این پژوهش، زمان تمرکز به هشت روش تجربی شامل مدل برانسبی-ویلیامز، مدل جیاندوتی، مدل چاو، مدل فدرال (سازمان هوانوردی امریکا)، مدل کالیفرنیا، مدل کربای، مدل کرپیچ و مدل ونتورا برآورد شد و زمان تمرکز مشاهده‌ای با استفاده از داده‌های هیدرومتری دوره آماری ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ استخراج شد. از میان ۱۵ حوضه مورد مطالعه، تعداد شش حوضه (سامیان، بالیقلوچای (پل الماس)، کوزه‌توپراقی، نیر، نوران و هیر) دارای ایستگاه‌های مجهز به لیمنیگراف بوده و هیدروگراف سیلاب به طور مستقیم ثبت شده است. برای نه حوزه آبخیز دیگر (آلادیزگه، ایریل، باروق، سولا، شمس آباد، عموقین، عنبران، نمین و ننه‌کران) که صرفاً داده اشل (سطح آب) با تفکیک زمانی ساعتی در دسترس بود، ابتدا با استفاده از منحنی‌های سنجه دبی-اشل معتبر که توسط سازمان آب منطقه‌ای اردبیل تأیید شده‌اند، مقادیر اشل به دبی جریان ساعتی تبدیل و سپس هیدروگراف جریان بازسازی شد. در ادامه، برای تمامی حوضه‌ها (اعم از دارای لیمنیگراف و دارای اشل)، به پیروی از روش استاندارد NRCS (2008) و Chow (1988)، پس از تفکیک هیدروگراف جریان مستقیم از دبی پایه (با استفاده از روش عددی یا نیمه‌لگاریتمی)، زمان تمرکز به عنوان فاصله زمانی بین پایان بارش مؤثر تا نقطه عطف در شاخه نزولی هیدروگراف تعیین شد [۲۷]. لازم به ذکر است که در کنار داده‌های نقشه‌ای و هیدرومتری، بازدیدها و مطالعات میدانی برای تأیید صحت مرز حوضه‌ها، موقعیت خروجی و آبراهه اصلی و همچنین بررسی نوع کاربری اراضی (مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، جنگل، مسکونی) انجام پذیرفته است.

$$T_c = \frac{(4\sqrt{A})+(1.5L)}{0.8\sqrt{H}}$$ Giandotti (1934) (۷)

$$T_c = 0.949\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$ Kirpich (1940) (۸)

$$T_c = \left(0.885\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$ California(1942) (۹)

$$T_c = 3.03\left(\frac{rL^{1.5}}{H^{0.5}}\right)^{0.467}$$ Kerby (1959)(۱۰)

$$T_c = 0.00032\left(\frac{L^{1.15}}{H^{0.385}}\right)$$ Chow (1962) (۱۱)

Federal Aviation Administration (1970) (۱۲)

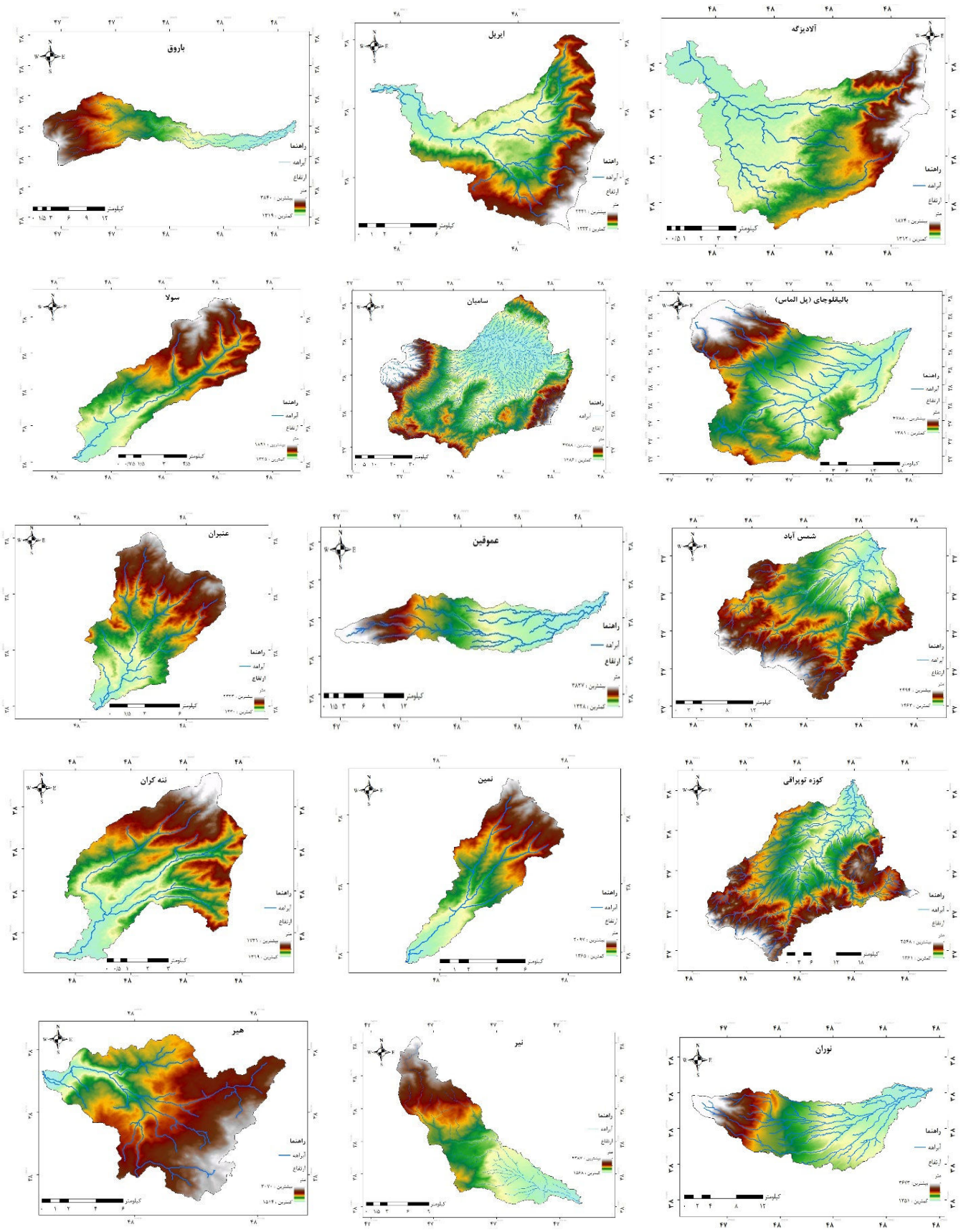
$$T_c = \frac{3.64\times(1.1-C)\times L^{0.83}}{H^{0.33}}$$

Bransby-Williams (1980) (۱۳)

$$\frac{L}{1.5D_c}\sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$$

$$T_c = 0.1272\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{S}}$$ Ventura (2007) (۱۴)

که در آن‌ها، Tcزمان تمرکز بر حسب ساعت، L طول آبراهه اصلی



شکل ۲- مجموعه‌ای از نقشه‌های ارتفاع و شبکه آبراهه‌ای حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

Fig 2. Set of elevation and drainage network maps of the studied watersheds

کیلومتر، 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 کیلومترمربع است.

تحلیل آماری و ارزیابی معادلات زمان تمرکز

با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب کارایی نش–ساتکلیف (NSE) کارآیی مدل‌های مورد مطالعه و ارزیابی و مقایسه شد [٤، ١٣ ١٩ و ٣٠]. ضریب تبیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود ضریب تبیین (R^2) در مدل‌های رگرسیونی که شامل عرض از مبدأ هستند، معمولاً بین صفر و یک قرار می‌گیرد. با این حال، در حالت کلی و به‌ویژه در ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی این شاخص می‌تواند مقادیر منفی نیز بگیرد (تا منفی بی‌نهایت)، هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است. هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد بیانگر دقت بالای مدل است. مقدار عددی ضریب کارایی نش_ساتکلیف بین منفی بی‌نهایت تا یک است و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بیانگر آن است که مدل تخمین بهتری داشته است. آماره‌های ذکر شده از روابط (١٥ تا ١٨) محاسبه شدند.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_j)^2}{n-1}} \qquad (١٥)$$

$$\mathrm{ME} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_j\right) \qquad (١٦)$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{\frac{RMSE}{\bar{x}_i}}{n} \qquad (١٧)$$

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_j)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x_i})^2} \qquad (١٨)$$

که در روابط بالا x_i مقدار زمان تمرکز مشاهده‌ای و x_j مقدار زمان تمرکز برآورد شده و n نیز برابر تعداد مقایسه‌ها است. تجزیه و تحلیل آماری به روش ماتریس همبستگی با استفاده از معیار پیرسون به کمک نرم افزار SPSS ویرایش ٢٢ انجام گرفت. نمودارها به کمک نرم افزارExcel نسخه ٢٠٢١ ترسیم شد. برای ترسیم نقشه‌ها و بررسی مشخصات حوضه‌ها از گوگل ارث انجین و نرم افزار Arc Gisنسخه ١٠/٨/٢ استفاده شد.

نتایج

ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز

جدول ١ مهم‌ترین مشخصات مورفومتریک و شبکه آبراهه‌ای ١٥ حوزه آبخیز منتخب در بخش مرکزی استان اردبیل را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها شامل مساحت، طول حوضه، شیب متوسط، طول آبراهه اصلی، تراکم آبراهه، ضرایب شکل (هورتون، نسبت کشیدگی، گردی و گراولیوس) و نسبت انشعاب هستند. بررسی این مشخصه‌ها نشان می‌دهد که حوضه‌ها از نظر اندازه و شکل هندسی تنوع قابل‌توجهی دارند. مساحت حوضه‌ها دامنه وسیعی از حدود ٥٦/ km² ٣٤(ننه‌کران) تا ٣٤/ km² ٤١٦٩(سامیان) را در بر می‌گیرد که نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه مقیاس حوضه‌ها در منطقه مورد بررسی است. طول حوضه (فاصله هیدرولیکی از نقطه خروجی تا دورترین نقطه) بین حدود ٩/٨١ km (ننه‌کران) تا ١٦٠/١٤ km (سامیان) متغیر است که این تفاوت چشمگیر عمدتاً به مساحت و شکل هندسی حوضه‌ها مربوط می‌شود. طول آبراهه اصلی نیز از ٣/٧٩ km (ننه‌کران) تا ٥٤/٨ km (سامیان) تغییر می‌کند و در حوضه‌های بزرگ‌تر (مانند سامیان، بالیقلوچای و کوزه‌توپراقی) به طور طبیعی مقادیر بالاتری دارد. شیب متوسط حوضه‌ها بین ٩/٩٣٪(آلادیزگه) تا ٢٤/٥٢٪ (هیر) قرار دارد که بیانگر وجود دامنه‌های نسبتاً شیب‌دار تا بسیار شیب‌دار در منطقه است. حوضه‌های هیر، باروق، عنبران و ایریل دارای شیب متوسط بالاتر از ١٨٪ هستند که می‌تواند به تسریع زمان تمرکز و افزایش شدت رواناب کمک کند. تراکم آبراهه (Dd) در محدوده ٠/٤٤ تا ١/٣٤ km/km² قرار دارد. بالاترین مقادیر مربوط به حوضه‌های نوران (١/٢١)، عموقین (١/٠٥) و آلادیزگه (١/٠٤) است که نشان‌دهنده شبکه آبراهه نسبتاً متراکم و احتمال پاسخ هیدرولوژیکی سریع‌تر در این حوضه‌ها است. در مقابل، حوضه بالیقلوچای با تراکم بسیار پایین ٠/٤٤ km/km²، شبکه آبراهه‌ای توسعه‌نیافته‌تری دارد که می‌تواند زمان تمرکز را افزایش دهد. شاخص‌های هندسی حوضه (ضریب شکل، نسبت کشیدگی، ضریب گردی و ضریب گراولیوس) همگی نشان‌دهنده تمایل غالب حوضه‌ها به شکل کشیده و غیرمدور هستند. به طور کلی، نتایج جدول یک نشان می‌دهد که حوزه‌های آبخیز استان اردبیل دارای تنوع قابل‌توجهی در ویژگی‌های مورفومتری هستند. حوضه‌های کوچک و پرشیب مانند هیر، نمین و ننه‌کران دارای زمان تمرکز کوتاه‌تر و واکنش سریع‌تر به بارش‌اند، در حالی که حوضه‌های بزرگ و کم‌شیب مانند سامیان و بالیقلوچای زمان تمرکز طولانی‌تر و پاسخ کندتری دارند. ضرایب شکل نیز نشان می‌دهند که بیشتر حوضه‌ها کشیده و نامنظم هستند و از حالت دایره‌ای فاصله دارند، که این امر بر شدت و زمان وقوع سیلاب‌ها تأثیر مستقیم دارد.

زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی حوزه‌های آبخیز

بر اساس جدول ٢، زمان تمرکز مشاهده‌ای در ١٥ حوزه آبخیز استان اردبیل از ١/٠٧ ساعت در حوزه آبخیز نمین تا ١٠/٤١ ساعت در حوزه آبخیز سامیان (بزرگ‌ترین حوضه با مساحت km² ٤١٦٩/٣٤) متغیر است که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین مساحت حوضه و زمان تمرکز است. مقایسه برآوردهای هشت روش تجربی با مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد که روش‌ها عملکرد متفاوتی در حوزه‌های مختلف دارند، به‌طوری‌که روش برانسبی–ویلیامز در حوزه‌های آبخیز بالیقلوچای (٤/٩٨ ساعت در مقابل ٥/٠١ ساعت

جدول ۱- مشخصات حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the studied watersheds

نام حوزه آبخیز Watershed name	مساحت حوضه Basin area (km²)	طول حوضه Basin length (km)	**شیب متوسط حوضه** Mean basin slope (%)	طول آبراهه اصلی Main channel length (km)	تراکم آبراهه Drainage density (km/km²)	ضریب شکل Form factor	نسبت کشیدگی Elongan ratio	ضریب گردی Circularity ratio	ضریب گراولیوس Gravelius coefficient	نسبت انشعاب Bifurcation ratio
آلادیزگه Aladizgeh	65.59	17.15	9.93	4.39	1.04	0.22	0.53	0.31	1.8	2.07
ایریل Iril	82.3	16.07	18.77	9.47	0.94	0.32	0.64	0.27	1.91	1.86
باروق Barough	141.43	13.42	22.75	22.09	1.34	0.79	0.61	0.19	2.28	1.78
بالیقلوچای Baliqlu Chay	1031.37	68.01	17.32	44.93	0.79	0.22	0.53	0.4	1.58	1.66
سامیان Samian	4169.34	160.14	13.87	54.8	1.01	0.16	0.45	0.38	1.63	2.61
سولا Soula	44.2	16.16	15.66	4.51	0.83	0.17	0.46	0.39	1.6	1.95
شمس آباد Shamsabad	387.39	36.3	15.99	3.03	0.94	0.29	0.61	0.46	1.48	2.45
عموقین Amoughin	133.59	22.35	15.72	5.21	1.05	0.29	0.62	0.22	2.12	2.92
عنبران Anbaran	75.65	15.31	20.08	8.63	0.84	0.32	0.64	0.44	1.51	2.2
کوزه توپراقی KozeTopraghi	824.16	59.46	13.84	24.16	0.9	0.23	0.54	0.31	1.79	1.79
نمین Namin	38.51	10.44	17.17	6.35	0.89	0.35	0.67	0.32	1.76	1.67
ننه کران Naneh Karan	34.56	9.81	12.95	3.79	0.98	0.36	0.68	0.37	1.64	2.46
نوران Nuran	186.69	25.58	13.57	22.38	1.21	0.29	0.6	0.31	1.79	1.74
نیر Nir	168.55	13.22	21.32	13.31	0.84	0.96	0.61	0.27	1.94	1.76
هیر Hir	93.34	16.17	24.52	8.1	0.87	0.36	0.67	0.34	1.72	1.86

مشاهده‌ای)، کوزه‌توپراقی (۳/۳ در مقابل ۳/۲ ساعت) و نوران (۲/۷۵ در مقابل ۲/۸۷ ساعت) دقت قابل‌قبولی داشته، در حالی‌که روش چاو در حوضه‌هایی مانند عنبران (۰/۰۱ ساعت در مقابل ۱/۳۹ ساعت مشاهده‌ای)، نوران (۰/۳۲ در مقابل ۲/۸۷ ساعت) و عموقین (۰/۳ در مقابل ۱/۲۹ ساعت) کم‌برآورد شدید ایجاد کرده است. روش ونتورا تنها در حوزه آبخیز سامیان عملکرد مناسبی داشت (۱۰/٦ در مقابل ۱۰/٤۱ ساعت)، اما در سایر حوضه‌ها مانند حوزه آبخیز کوزه‌توپراقی (۹/۸۷ در مقابل ۳/۲ ساعت) و حوزه آبخیز بالیقلوچای (۹/۸۲ در مقابل ۵/۰۱ ساعت) بیش‌برآورد قابل‌توجهی نشان داد. همچنین روش‌های کربای و کالیفرنیا در اکثر حوض‌ه‌های کوچک و متوسط زمان تمرکز را کم‌برآورد کردند، در حالی‌که روش جیاندوتی در حوزه‌های پرشیب مانند هیر (۱/۳٤ ساعت همخوانی کامل) و عنبران (۱/۳۸ در مقابل ۱/۳۹ ساعت) عملکرد بهتری داشت. این نتایج بیانگر آن است که هیچ روش تجربی واحدی در تمام شرایط ژئومورفولوژیکی منطقه قابل اعتماد نبوده و انتخاب روش مناسب مستلزم در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیوگرافی هر حوزه است.

شکل ٤ مقادیر زمان تمرکز مشاهده‌ای را در برابر مقادیر برآوردی حاصل از مدل‌های تجربی مختلف برای ۱۵ حوزه آبخیز مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این نمودار، خط نقطه‌چین ۱:۱ بیانگر انطباق کامل بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است. به عبارت دیگر، هرچه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند، دقت مدل بیشتر خواهد بود. بر اساس شکل، مدل برانسبی_ویلیامز بیشترین همگرایی را با خط ۱:۱ در اغلب حوضه‌ها نشان می‌دهد، به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز بالیقلوچای، کوزه‌توپراقی و نوران که اختلاف اندکی با مقادیر مشاهده‌ای دارند. این موضوع بیانگر آن است که این رابطه تجربی در شرایط اقلیمی و مورفومتری حوزه‌های مورد مطالعه سازگاری بیشتری دارد. در مقابل، مدل چاو در اغلب حوضه‌ها، به‌خصوص حوضه‌های کوچک و متوسط، انحراف قابل‌توجهی از خط ۱:۱ داشته و عمدتاً تمایل به کم‌برآوردی زمان تمرکز نشان می‌دهد. مدل ونتورا نیز پراکندگی زیادی نسبت به خط ۱:۱ دارد، به‌طوری‌که در برخی حوضه‌ها مانند سامیان تطابق قابل‌قبولی مشاهده می‌شود، اما در حوضه‌های متوسط نظیر کوزه‌توپراقی و بالیقلوچای بیش‌برآورد قابل‌توجهی دیده می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که مدل ونتورا به مقیاس حوضه حساس بوده و در حوضه‌های بزرگ‌تر عملکرد مناسب‌تری دارد. چنین وابستگی به ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است. در مطالعه de Almeida

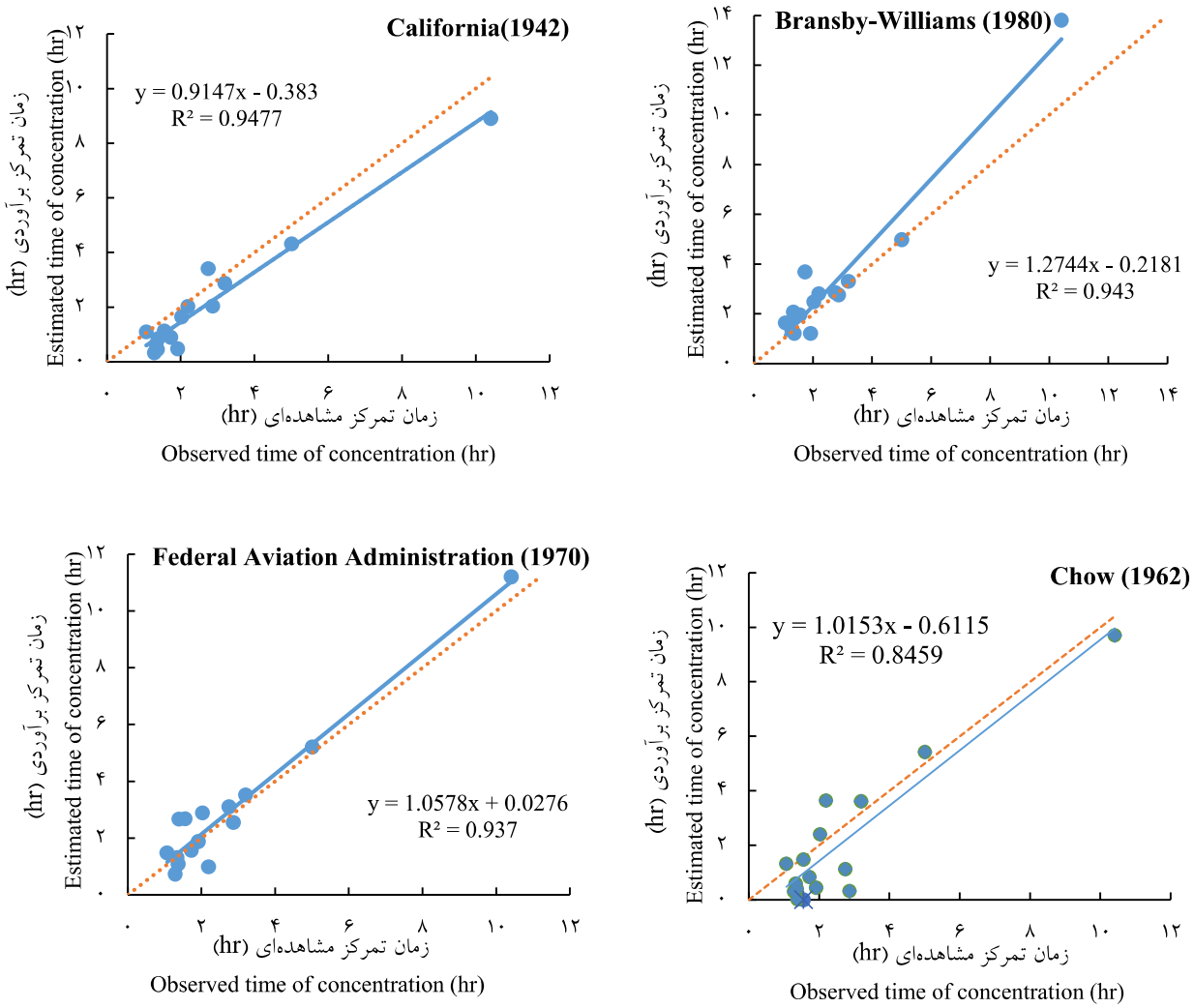
جدول ۲- مقادیر زمان تمرکز بر حسب ساعت در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

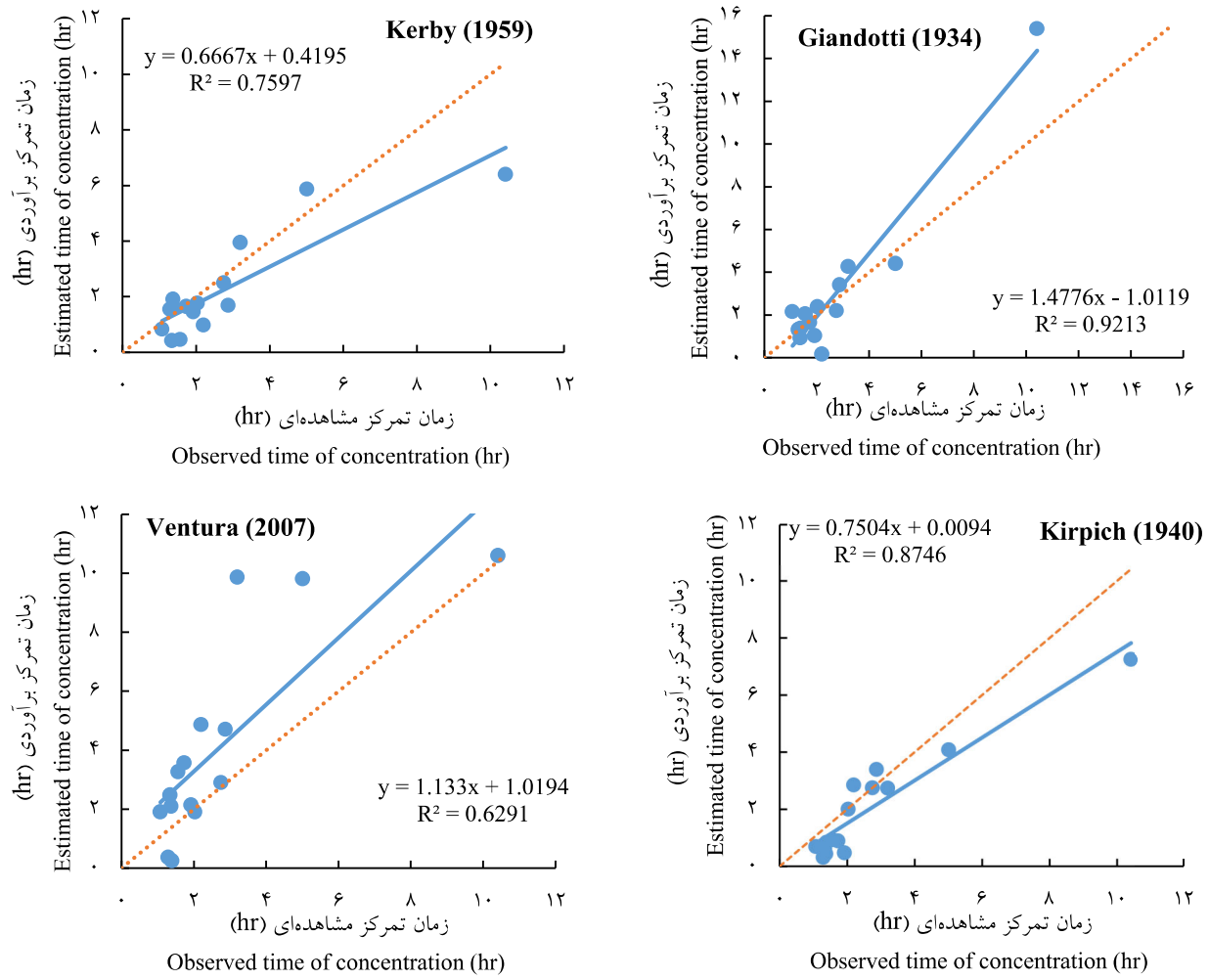
Table 2. Concentration time values (in hours) for the studied watersheds

حوزه آبخیز Watershed	مشاهده‌ای Observational	برانسبی-ویلیامز Bransby-Williams	چاو Chow	کالیفرنیا California	کربای Kerby	فدرال Federal	کرپیچ Kirpich	جیاندوتی Giandotti	ونتورا Ventura
آلادیزگه Aladizgeh	1.56	1.95	1.47	1.12	0.46	2.68	0.93	2.06	3.27
ایریل Iril	2.03	2.48	2.4	1.64	1.77	2.89	2	2.39	1.91
باروق Barough	2.75	2.85	1.12	3.4	2.5	3.1	2.75	2.2	2.9
بالیقلوچای Baliqlu Chay	5.01	4.98	5.42	4.31	5.87	5.21	4.08	4.41	9.82
سامیان Samian	10.41	13.8	9.7	8.9	6.4	11.2	7.25	15.4	10.6
سولا Soula	1.92	1.21	0.44	0.47	1.46	1.88	0.47	1.04	2.14
شمس آباد Shamsabad	2.2	2.8	3.64	2.02	0.98	0.99	2.85	0.17	4.87
عموقین Amoughin	1.29	1.33	0.3	0.32	1.55	0.73	0.31	1.32	0.37
عنبران Anbaran	1.39	1.84	0.01	0.84	1.61	2.67	0.84	1.38	0.25
کوزه توپراقی KozeTopraghi	3.2	3.3	3.61	2.87	3.95	3.52	2.74	4.27	9.87
نمین Namin	1.07	1.63	1.32	1.09	0.83	1.48	0.69	2.16	1.91
ننه کران Naneh Karan	1.37	1.21	0.41	0.44	1.91	1.09	0.44	0.93	2.1
نوران Nuran	2.87	2.75	0.32	2.03	1.69	2.55	3.39	3.41	4.71
نیر Nir	1.73	3.68	0.83	0.89	1.65	1.57	0.89	1.65	3.57
هیر Hir	1.34	2.07	0.59	0.63	0.42	1.31	0.63	1.34	2.48

و همکاران [٦] عملکرد چندین رابطه تجربی برآورد زمان تمرکز در یک حوزه آبخیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت معادلات به ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند مساحت، شیب و طول مسیر جریان وابسته است و هیچ رابطه‌ای در همه شرایط عملکرد برتر و یکنواختی ندارد. آنان تأکید کردند که استفاده از روابط تجربی بدون واسنجی محلی می‌تواند منجر به خطاهای قابل‌توجه در برآورد زمان تمرکز و در نتیجه دبی اوج شود. همچنین پراکندگی نقاط در اطراف خط ۱:۱ نشان می‌دهد که هیچ یک از روابط تجربی در تمامی شرایط ژئومورفولوژیکی منطقه عملکرد یکنواختی ندارند. این موضوع با ماهیت تجربی این معادلات مرتبط است، زیرا هر رابطه بر اساس داده‌های مناطق خاصی توسعه یافته و تعمیم آن به سایر مناطق بدون واسنجی محلی می‌تواند منجر به خطا شود.

بنابراین، نتایج شکل ٤ تأکید می‌کند که انتخاب مدل مناسب برای برآورد زمان تمرکز باید با توجه به ویژگی‌های مورفومتری، شیب، مساحت و تراکم آبراهه هر حوزه انجام گیرد. در مجموع، تحلیل بصری شکل چهار در کنار شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل برانسبی_ویلیامز از نظر انطباق با داده‌های مشاهده‌ای عملکرد مناسب‌تری داشته، در حالی که مدل چاو بیشترین انحراف را از خط تعادل نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات سلطان و همکاران [۲۷] در ارزیابی معادلات زمان تمرکز در حوزه‌های نیمه‌خشک همخوانی دارد. در پژوهش سلطان و همکاران [۲۷]، چندین رابطه تجربی زمان تمرکز در حوضه‌های کوچک گرمسیری با استفاده از داده‌های رویدادهای بارش_رواناب ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بسیاری از روش‌ها تمایل به کم‌برآوردی زمان تمرکز دارند که این امر می‌تواند به بیش‌برآورد دبی اوج منجر شود. این مطالعه بر ضرورت انتخاب و واسنجی محلی معادلات متناسب با شرایط اقلیمی و مورفومتری هر حوضه تأکید کرد.





شکل ٤- مقادیر زمان تمرکز مشاهده‌ای و مقادیر زمان تمرکز برآوردی در مدل‌های تجربی در حوضه‌های مورد مطالعه، خطوط نقطه چین نشاندهنده خط ۱:۱ است

Fig 4. Observed concentration time values and estimated concentration time values in empirical models for the studied basins; the dotted lines represent the 1:1 line.

ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز

جدول سه ماتریس همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورفومتری حوضه (مساحت، طول حوضه، طول آبراهه، تراکم آبراهه، ضریب گراولیوس و نسبت انشعاب) و مقادیر زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی به روش‌های مختلف (برانسبی–ویلیامز، چاو، کالیفرنیا، کربای، فدرال، کرپیچ، جیاندوتی و ونتورا) را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مساحت حوضه با زمان تمرکز مشاهده‌ای همبستگی بسیار قوی و مثبت ($r=0.97, p< 0.01$) و طول حوضه نیز همبستگی بسیار قوی با زمان تمرکز مشاهده‌ای دارد ($r=0.97, p< 0.01$). همچنین زمان تمرکز مشاهده‌ای با طول آبراهه اصلی نیز رابطه قوی و معنی‌دار نشان می‌دهد ($r=0.91, p<0.01$). این نتایج بیانگر آن است که در حوضه‌های مورد مطالعه، ابعاد هندسی حوضه مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده زمان تمرکز بوده‌اند. به بیان دیگر، هرچه حوضه بزرگ‌تر و طول مسیر جریان بیشتر باشد، زمان لازم برای رسیدن رواناب به خروجی افزایش می‌یابد. در مقابل تراکم آبراهه همبستگی بسیار ضعیفی با زمان تمرکز مشاهده‌ای دارد و ضریب گراولیوس رابطه منفی ولی غیر معنی‌دار نشان می‌دهد. همچنین نسبت انشعاب نیز رابطه ضعیف دارد. این نتایج نشان می‌دهد که در مقیاس حوضه‌های بررسی‌شده، نقش شکل حوضه و شاخص‌های شبکه زهکشی در مقایسه با ابعاد هندسی، کمتر بوده است. Grimaldi و همکاران [۹]، در پژوهشی با تحلیل مقایسه‌ای روش‌های برآورد زمان تمرکز در حوضه رودخانه جوندیای نشان دادند که معادلات مبتنی بر پارامترهای هندسی حوضه (مانند مساحت و طول) نسبت به معادلاتی که به شدت به عوامل دیگر وابسته هستند، عملکرد بهتری دارند، زیرا این معادلات اثرات مقیاس اصلی را بر روی حرکت رواناب بهتر منعکس می‌کنند.

بر اساس جدول ۳ روش هوانوردی فدرال آمریکا (r=0.97, p<0.01)، روش کالیفرنیا (r=0.97, p<0.01)، روش برانسبی_ویلیامز (r=0.97, p<0.01)، روش جیاندوتی (r=0.96, p< 0.01) و روش کرپیچ (r=0.94, p<0.01) بالاترین همبستگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد با مقادیر مشاهده‌ای دارند. در مقابل روش ونتورا کمترین همبستگی را نشان می‌دهد (r=0.79, p<0.01). این موضوع نشان می‌دهد که روابطی مبتنی بر پارامترهای هندسی مساحت و طول حوضه توسعه یافته‌اند، در شرایط اقلیمی و مورفومتری استان اردبیل عملکرد بهتری داشته‌اند، در حالی که مدل ونتورا به دلیل حساسیت بیشتر به شیب و ساختار خاص توسعه آن، سازگاری کمتری با شرایط منطقه داشته است. نتایج پژوهش Sultan و همکاران [۲۷]، نیز بیان می‌کند که بسیاری از روابط تجربی در خارج از منطقه توسعه خود رفتار متفاوتی نشان می‌دهند و همبستگی آن‌ها با مقادیر مشاهده‌ای وابسته به ویژگی‌های اقلیمی و ژئومورفولوژیکی حوضه است.

جدول ٤ شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین، میانگین خطا، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدرمطلق خطا و ضریب کارایی نش–ساتکلیف را برای هشت رابطه تجربی برآورد زمان تمرکز نشان می‌دهد. روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) با بالاترین NSE (۰/۹۲)، کمترین RMSE (۰/٦٧) و MAE (۰/۵۳)،

جدول۳ – ماتریس همبستگی بین برخی از ویژگی‌های حوضه با زمان تمرکز مشاهده‌ای و برآوردی در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

Table 3. Correlation matrix between some watershed characteristics and observed/estimated concentration time in the studied watersheds

	مساحت Area	طول حوضه Basin length	طول آبراهه Channel length	برانسبی_ ویلیامز Bransby-Williams	چاو Chow	کالیفرنیا California	کربای Kerby	فدرال FAA	کرپیچ Kirpich	جیاندوتی Giandotti	ونتورا Ventura	مشاهده ای Observational
مساحت Area	1											
طول Basin length	0.98**	1										
طول Channel length	0.83**	0.86**	1									
برانسبی_ ویلیامز B-W	0.98**	0.95**	0.85**	1								
چاو Ch	0.92**	0.95**	0.82**	0.9**	1							
کالیفرنیا Ca	0.93**	0.93**	0.92**	0.94**	0.92**	1						
کربای Ke	0.83*	0.85**	0.94**	0.79**	0.73**	0.86**	1					
فدرال FAA	0.94**	0.93**	0.9**	0.95**	0.88**	0.95**	0.85**	1				
کرپیچ Ki	0.86**	0.89**	0.9**	0.89**	0.89**	0.96**	0.82**	0.89**	1			
جیاندوتی Gi	0.97**	0.94**	0.85**	0.96**	0.86**	0.93**	0.79**	0.97**	0.86**	1		
ونتورا V	0.74**	0.82**	0.84**	0.73**	0.84**	0.8**	0.84**	0.73**	0.83**	0.71**	1	
مشاهده ای Ob	0.97**	0.97**	0.91**	0.97**	0.92**	0.97**	0.87**	0.97**	0.94**	0.96**	0.79**	1

** معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد و * معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد

** Significant at the 99% probability level and * Significant at the 95% probability level

و حداقل سوگیری (۰/۱۸) بهترین عملکرد کلی را داشته است. این روش در شرایط ژئومورفولوژیکی حوزه‌های آبخیز اردبیل به‌طور متعادل عمل کرده و هم دقت بالایی دارد و هم سوگیری ناچیزی نشان می‌دهد. عملکرد برتر روش هوانوردی فدرال آمریکا در برآورد زمان تمرکز حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه را می‌توان ناشی از همخوانی ساختار این معادله با مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده زمان تمرکز در منطقه دانست. نتایج ماتریس همبستگی نشان داد که زمان تمرکز مشاهده‌ای دارای همبستگی بسیار قوی و معنی‌دار با مساحت حوضه ($r=0.97, p<0.01$)، طول حوضه ($r=0.97$, $p<0.01$) و طول آبراهه اصلی ($r=0.91, p< 0.01$) است. از آنجا که معادله هوانوردی فدرال آمریکا بر پایه پارامترهای هندسی اصلی نظیر طول مسیر جریان و شیب حوضه توسعه یافته است، توانسته اثر مقیاس حوضه و نقش طول مسیر جریان را به‌خوبی بازتاب دهد و با ساختار کشیده و نیمه‌کوهستانی حوزه‌های استان اردبیل سازگاری مناسبی نشان دهد. روش کالیفرنیا با بالاترین R^2 (۰/۹۵) و NSE خوب (۰/۸۸) عملکرد مناسبی داشته، اما سوگیری منفی قابل‌توجهی (۰/۶۱-) نشان می‌دهد که بیانگر کم‌برآوردی سیستماتیک زمان تمرکز است. روش برانسبی_ویلیامز با R^2 بالا (۰/۹٤) و NSE قابل قبول (۰/۷۸) عملکرد نسبتاً خوبی داشته و در نمودار مقایسه‌ای (شکل چهار) بیشترین همگرایی را با خط ۱:۱ نشان داده است. این روش در حوزه‌های آبخیز بالیقلوچای، کوزه‌توپراقی و نوران تطابق بسیار خوبی با مقادیر مشاهده‌ای داشته است. روش‌های کربای، کرپیچ و چاو عملکرد متوسطی با NSE بین ۰/۷۱ تا ۰/۷۷ داشته‌اند، اما همگی سوگیری منفی (کم‌برآوردی) نشان می‌دهند که می‌تواند در طراحی سازه‌های هیدرولیکی خطرساز باشد. روش جیاندوتی با وجود همبستگی بالا با داده‌های مشاهده‌ای ($r=0.96, p< 0.01$)، RMSE نسبتاً بالا (۱/۵) و NSE پایین‌تر (۰/۵۷) نشان می‌دهد که در برخی حوزه‌های آبخیز (مانند سامیان) انحراف قابل‌توجهی دارد. روش ونتورا ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. روش ونتورا با پایین‌ترین ($R^2=0.63$)، بالاترین خطاها ($RMSE=2.44$)، ($MAE=1.67$) و ($NSE=-0.14$) که نشان می‌دهد این روش در شرایط منطقه مورد مطالعه عملکردی ضعیف‌تری دارد. این روش به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز متوسط مقیاس (مانند حوزه آبخیز کوزه‌توپراقی و بالیقلوچای) بیش‌برآورد شدیدی ایجاد کرده است. که با یافته‌های Nam و همکاران [۱۸] مطابقت دارد. این محققان روی ۳۹ حوضه کوچک جنگلی کوهستانی پژوهشی انجام دادند و نشان دادند که زمان تمرکز مشاهده‌ای با مساحت حوضه و طول جریان همبستگی معنی‌دار مثبت و با شیب جریان همبستگی معنی‌دار منفی دارد ($p<0.01$). و با رگرسیون چند متغیره (مساحت، طول و شیب) به $NSE = 0.88$ رسید. این نتیجه تأیید می‌کند که در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک، روش‌های تجربی استاندارد اغلب دقت کافی ندارند و نیاز به واسنجی محلی یا اصلاح ضروری است.

جدول٤ – ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد زمان تمرکز در حوضه‌های مورد مطالعه

Table 4. Performance evaluation of concentration time estimation models in the studied basins

	R^2	ME	RMSE	MAE	NSE
برانسبی_ویلیامز Bransby-Williams	0.94	0.52	1.08	0.65	0.78
چاو Chow	0.85	-0.57	1.14	0.95	0.75
کالیفرنیا California	0.95	-0.61	0.81	0.7	0.88
کربای Kerby	0.76	-0.47	1.24	0.82	0.71
فدرال Federal	0.94	0.18	0.67	0.53	0.92
کرپیچ Kirpich	0.87	-0.66	1.09	0.81	0.77
جیاندوتی Giandotti	0.92	0.27	1.5	0.88	0.57
ونتورا Ventura	0.63	1.37	2.44	1.67	-0.14

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی استان اردبیل، زمان تمرکز مشاهده‌ای همبستگی بسیار قوی و معنی‌داری با مساحت حوضه ($r=0.97$)، طول حوضه ($r=0.97$) و طول آبراهه اصلی ($r=0.91$) در سطح احتمال ۹۹ درصد دارد. این یافته تأکید می‌کند که در منطقه مورد مطالعه، ابعاد هندسی حوضه، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده زمان تمرکز بوده و نقش شاخص‌های شکل حوضه و تراکم زهکشی در مقایسه با مقیاس حوضه، کمتر است. این موضوع با نتایج Grimaldi و همکاران [۹]، همخوانی دارد که نشان دادند معادلات مبتنی بر پارامترهای هندسی (مساحت و طول) نسبت به معادلات وابسته به عوامل دیگر، عملکرد بهتری در بازتاب اثر مقیاس حوضه دارند.

مقایسه روش‌های تجربی نشان داد که روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) با دارا بودن بالاترین ضریب کارایی نش_ساتکلیف ($NSE=0.92$)، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/٦۷ ساعت) و کمترین میانگین خطای مطلق (۰/۵۳ ساعت)، بهترین و متعادل‌ترین عملکرد را در برآورد زمان تمرکز دارد. برتری این روش را می‌توان به ساختار معادله آن نسبت داد که بر پایه طول جریان و شیب حوضه توسعه یافته و به خوبی اثر همزمان مقیاس و توپوگرافی را منعکس می‌کند.

در مقابل، روش ونتورا با ضریب کارایی نش_ساتکلیف منفی (۰/۱٤-) و بالاترین خطا ($RMSE=2.44$)، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. این روش به‌ویژه در حوضه‌های با مساحت متوسط تا بزرگ

(مانند حوزه آبخیز بالیقلوچای و کوزه‌توپراقی) بیش‌برآورد شدیدی (تا سه برابر مقدار مشاهده‌ای) نشان داد که کاربرد آن را برای منطقه کاملاً نامناسب می‌سازد.

Singh و Mishra [۲۵]، با ارزیابی ۱۵ روش تجربی زمان تمرکز در ۲۲ حوزه آبخیز با اقلیم‌های مختلف هند نشان دادند که روش‌های مبتنی بر طول و شیب جریان مانند FAAو Kirpich در حوضه‌های نیمه‌خشک و کوهستانی عملکرد بهتری دارند، اما خطاها هنوز قابل توجه است و توصیه می‌شود که معادلات برتر با داده‌های محلی واسنجی شوند. یافته‌های پژوهش حاضر نیز این توصیه را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که حتی بهترین روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) نیز خطای مطلق ۰/۵۳ ساعت دارد که در حوضه‌های کوچک با زمان تمرکز کمتر از ۲ ساعت، می‌تواند منجر به خطای نسبی قابل ملاحظه‌ای شود.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی استان اردبیل، روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) به عنوان دقیق‌ترین و متعادل‌ترین رابطه تجربی برای برآورد زمان تمرکز توصیه می‌شود. روش‌های کالیفرنیا و برانسبی_ویلیامز نیز عملکرد نسبتاً خوبی داشتند، اما به دلیل سوگیری منفی یا مثبت، نیاز به احتیاط بیشتری دارند. روش ونتورا و تا حدی روش چاو برای کاربرد در منطقه مناسب نیستند. با توجه به وابستگی شدید دقت این روابط به ویژگی‌های مورفومتری محلی، تعمیم مستقیم معادلات توسعه‌یافته در سایر مناطق بدون ارزیابی و واسنجی می‌تواند خطاهای قابل‌توجهی در برآورد دبی اوج سیلاب ایجاد کند. بنابراین، برای افزایش دقت مدل‌سازی هیدرولوژیکی و طراحی ایمن سازه‌ها در استان اردبیل، توصیه می‌شود که از روش هوانوردی فدرال آمریکا (FAA) همراه با واسنجی مبتنی بر داده‌های هیدرومتری محلی استفاده شود و در صورت عدم دسترسی به داده‌های کافی، ترکیب نتایج روش‌های برتر (هوانوردی فدرال آمریکا و برانسبی_ویلیامز) به کار گرفته شود تا عدم قطعیت کاهش یابد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت مادی و معنوی دانشگاه زنجان و دانشگاه محقق اردبیلی برای انجام این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

سعید صفری: جمع آوری و آماده‌سازی داده‌ها، انجام تجزیه وتحلیل داده‌ها، نگارش مقاله. علی‌رضا واعظی: راهنمایی پروژه، بازبینی و ویرایش مقاله. حسین شهاب آرخازلو: مشاوره پروژه، بازبینی مقاله.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 1995. Principles of Applied Hydrology. Astan Quds Razavi Publications. (in Persian).

2. Azizian, A., 2017. Assessment and uncertainty analysis of different time of concentration methods. Iranian Journal of Soil and Water Research. 48(2), 275-288 (in Persian).

https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.62625.

3. Azizi, E., Mostafazadeh, R., Hazbavi, Z., et al. 2022. Spatial distribution of flood vulnerability index in Ardabil province, Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36, 4125–4142.

https://doi.org/10.1007/s00477-022-02264-5

4. 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.

5. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill. 46 pages.

6. de Almeida, I. K., Almeida, A. K., Anache, J. A. A., & Wendland, E. 2017. Evaluation of methods for estimating time of concentration in a watershed. Hydrological Sciences Journal, 62(14), 2406–2421.

https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1384549

7. Federal Aviation Agency (FAA)., 1970. Airport drainage: department of transport advisory circular: Washington DC, USA. 83 pages.

8. Ghaffari, Gh., Talebi, Z., 2016. Evaluation some of the empirical relations to estimate the concentration time and identify the most important physiographic. Journal of Watershed Management Research. 7(14), 188-196.

https://doi.org/10.29252/jwmr.7.14.196

9. Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. 2012.Time of concentration: a paradox in modern hydrology. Hydrological Sciences Journal,57(2), 217–228.

https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244

10. Horton RE, 1932. Drainage basin characteristics, Transactions, American Geophysical Union 13: 350–361.

11. Kerby, W., 1959. Time of concentration for overland flow. Civ. Eng. 29, 174.

12. Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineer. 10(6), 362- 375.

13. Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graohical methods for evaluating solute transport models. Overview and application. J. Contam. Hydrol. 7, 51-73.

14. McCuen, R.H., Wong, S.L., Rawls, W.J., 1984. Estimating urban time of concentration. J. Hydraulic Engineer. 110 (7), 887-904. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(887).

15. Messinger, T., Holmes, D. A., Scott, J. D., & Kirk, D.W. 2024. Improving time of concentration estimates for small rural watersheds in the Appalachian Plateaus physiographic province, West Virginia (Scientific Investigations Report 2024–5051). U.S. Geological Survey.

https://doi.org/10.3133/sir20245051.

16. Miller, V.C. 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Proj. NR 389-042, Columbia University.

17. Mostafazadeh, R., Nasiri Khiavi, A., & Talebi Khiavi, H. 2025. Iso-severity flood hazard patterns in diverse relief and climatic regions to support flood management. Natural Hazards, 121(15), 17793–17814.

https://doi.org/10.1007/s11069-025-07492-w

18. Nam, S., Lim, H., Choi, B., Li, Q., Moon, H., & Choi, H. T. 2024. Characteristics and estimation of the time of concentration for small forested catchments in steep mountainous terrain. Forests, 1)15), Article 186.

https://doi.org/10.3390/f15010186

19. 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.

20. NRCS (Natural Resources Conservation Service). 2008. National engineering handbook: Part 630 hydrology. United States Department of Agriculture.

21. Rasi Nezami, S., Izadifard, H., Khavarian, H., & Mostafazadeh, R. 2023. Land use/land cover changes in Samian watershed, Ardabil, and its relationship with the quality of surface water resources. Journal of Environmental and Water Engineering, 9(4), 413-426.

https://doi.org/10.22034/jewe.2022.341548.1783

22. Rezende, B. N., Boulomytis, V. T. G., Duarte, S. N., Jacomazzi, M. A., & Zuffo, A. C. 2021. Evaluation of the time of concentration estimation methods for small rural watersheds. In Proceedings of the 24th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2021) (pp. [page range if available; often omitted for online proceedings]). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

https://doi.org/10.36334/modsim.2021.J7.rezende.

23. Salahi, B., and Behrouzi, M. 2023. Evaluation of flood potential of Ardabil plain using fuzzy models and satellite images. Geography and Human Relationships, 6(2), 369–389.

https://doi.org/10.22034/GAHR.2023.385576.1816

24. Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 67(5), 597-646.

25. Singh, P.K., & Mishra, S.K. 2023. A comparative analysis of time of concentration methods for Indian watersheds under different climatic conditions. Journal of Hydrology, 617, 129045.

https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129045

26. Strahler AN, 1964. Quantitative geomorphology. Handbook of Applied Hydrology, New York, USA 3: 232. Sriwongsitanon N, Taesombat W, 2011. Effects of land cover on runoff coefficient. Journal of Hydrology 410: 226–238.

27. Sultan, D., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Fenta, A. A., Ebabu, K., Berihun, M. L., & Setargie, T. A. 2022. Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia. Journal of Hydrology: Regional Studies, 40, Article 101025.

https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101025.

28. Todd, D., Ground water hydrology. 2004. 3rd ed. Wiely and sond Inc. New York. 638 pages.

29. Zolghadr, M., Rafiee, M. R., Esmaeilmanesh, 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(19), Article 3155.

https://doi.org/10.3390/w14193155.

30. Willmott, C. J., & Matsuura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30, 79–82.

https://doi.org/10.3354/cr030079