

Comparison and Analysis of Empirical Equations for Estimating Time of Concentration (A Case Study in Khuzestan Province)

Mahin Tahvilian, Seyed Saeid Eslamian*, Ali Reza Gohari and Mohammad Jamali¹

(Received: May 17-2025 ; Revised: June 24-2025 ; Accepted: August 5-2025)

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: saeid@iut.ac.ir

Abstract

Time of concentration (T_c) is one of the key parameters in hydrological studies, playing a critical role in flood control structure design, runoff simulation, and water resource management. This study evaluates the performance of seven empirical equations—Bransby-Williams, California, Giandotti, Kirpich, Pilgrim, Rational Hydrograph (SCS), and Carter—in estimating T_c across 35 sub-watersheds in Khuzestan Province, Iran. To assess the accuracy, six sub-watersheds with reliable rainfall-runoff data were selected, and observational T_c values were calculated. The estimated results from the empirical formulas were then compared with observed data using statistical indices such as RMSE, ME, and the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE). The findings revealed that the Kirpich equation provided the most accurate and reliable estimates, with RMSE = 2 hours, ME = 0.44 hours, and NSE = 0.91. Subsequently, all seven models were applied to estimate T_c for the remaining sub-watersheds. Finally, a concentration time zoning map was generated, which can serve as a practical tool for hydraulic design, flood risk analysis, and optimal water resource planning in Khuzestan Province.

Keywords: Time of Concentration, Empirical Equations, Khuzestan Sub-watersheds, Kirpich method, Statistical analysis, Flood design

How to cite this article: Tahvilian, M., Eslamian, S., Gohari, A. and Jamali, M. 2025. Comparison and Analysis of Empirical Equations for Estimating Time of Concentration (A Case Study in Khuzestan Province). *J. Water and Soil Sci.* 29(3): 171-186. DOI: [10.47176/jwss.29.3.42932](https://doi.org/10.47176/jwss.29.3.42932)

Copyright © 2025 Tahvilian et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

مقایسه و تحلیل روابط تجربی در برآورد زمان تمرکز (مطالعه موردی استان خوزستان)

مهین تحویلیان، سعید اسلامیان^{*id}، علیرضا گوهری و محمد جمالی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱۴)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saeid@iut.ac.ir

چکیده

زمان تمرکز (Tc) یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات هیدرولوژیک است که نقش مهمی در طراحی سازه‌های کنترل سیلاب، شبیه‌سازی رواناب و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. در این پژوهش، عملکرد هفت رابطه تجربی شامل برانس - ویلیامز، کالیفرنیا، جیاندوتی، کریچ، پیلگریم، هیدروگراف استدلالی و کارتر در برآورد زمان تمرکز برای ۳۵ زیرحوضه در استان خوزستان بررسی شد. برای ارزیابی دقت این روابط، ابتدا شش زیرحوضه با داده‌های معتبر بارش - رواناب انتخاب و زمان تمرکز مشاهداتی آن‌ها محاسبه شد. سپس، خروجی روابط تجربی با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد و با استفاده از شاخص‌هایی مانند RMSE، ME و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) تحلیل آماری صورت گرفت. نتایج نشان داد که مدل کریچ با RMSE معادل ۲ ساعت، ME برابر با ۰/۴۴ ساعت و NSE برابر با ۰/۹۱، دقیق‌ترین و قابل‌اعتمادترین تخمین را ارائه می‌دهد. پس از آن، از این روابط برای تخمین زمان تمرکز در سایر زیرحوضه‌ها استفاده شد. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی زمان تمرکز تولید شد که می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای طراحی هیدرولیکی، تحلیل سیلاب و برنامه‌ریزی بهینه منابع آب در استان خوزستان مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: زمان تمرکز، روابط تجربی، زیرحوضه‌های استان خوزستان، روش کریچ، تحلیل آماری، طراحی سیلاب

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

زمان تمرکز (Time of Concentration- T_c) یکی از مفاهیم اساسی در علم هیدرولوژی است که نشان‌دهنده مدت زمان لازم برای انتقال رواناب از دورترین نقطه یک حوضه آبریز به خروجی آن (مانند دهانه رودخانه یا محل زهکشی) است (۵ و ۷). امروزه تعداد وقایع حدی از جمله سیل‌های شدید و مخرب در حال افزایش است (۱۳). این موضوع می‌تواند نقش کلیدی زمان تمرکز در تحلیل‌های رواناب - روان‌جاری، طراحی سازه‌های کنترل سیلاب، مدل‌سازی هیدرولوژیک، مدیریت منابع آب و شبیه‌سازی جریان‌های سطحی را بیش از پیش کند. تعیین دقیق زمان تمرکز، به‌ویژه در حوضه‌هایی که دارای بارش‌های شدید و سیلاب‌خیز هستند، می‌تواند نقش کلیدی در پیش‌بینی زمان وقوع سیلاب، ارتفاع دبی اوج و زمان هشدار برای اقدامات اضطراری داشته باشد (۲۴).

برآورد صحیح زمان تمرکز، فرایندی چالش‌برانگیز است؛ چرا که این پارامتر تابع عوامل متعددی است که همگی به‌صورت پیچیده و غیرخطی با یکدیگر در ارتباط‌اند. از جمله این عوامل می‌توان به مساحت حوضه، طول مسیر جریان، شیب بستر، شرایط خاک‌شناسی و زمین‌شناسی، نوع و تراکم پوشش گیاهی، شدت و مدت بارش، و حتی شرایط رطوبتی اولیه خاک اشاره کرد (۱۰ و ۱۷). در نتیجه، روش‌های مختلفی برای تخمین T_c توسعه یافته‌اند که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به دو گروه روش‌های تجربی و روش‌های تحلیلی - شبیه‌سازی تقسیم کرد. روش‌های تجربی که بر پایه مشاهدات میدانی در حوضه‌های مشخصی توسعه یافته‌اند، به دلیل سادگی، نیاز کم به داده‌های ورودی و سرعت در اجرا، از محبوبیت زیادی در پروژه‌های مهندسی برخوردارند.

از جمله شناخته‌شده‌ترین روابط تجربی می‌توان به روابط کریچ (Kirpich)، کالیفرنیا، جیاندوتی (Giandotti)، ویلیامز (Williams)، برانس - ویلیامز (Brans-Williams)، کارتر (Carter) و پیلگریم (Pilgrim) اشاره کرد. هر یک از این روابط با استفاده از ترکیبی از پارامترهای فیزیوگرافی مانند طول آبراهه

اصلی، شیب متوسط، مساحت حوضه و گاهی ویژگی‌های خاک و بارش توسعه یافته‌اند. برای نمونه، رابطه کریچ بر اساس داده‌های تجربی از حوضه‌های کوچک در مناطق کوهستانی آمریکا به دست آمده و بیشتر در حوضه‌های با شیب تند و رواناب سطحی زیاد کاربرد دارد. در مقابل، روابطی مانند جیاندوتی و ویلیامز برای شرایط اقلیمی و ژئومورفولوژیکی متفاوتی طراحی شده‌اند. این تنوع در مبانی توسعه روابط باعث شده است که عملکرد هر رابطه به‌طور قابل توجهی وابسته به ویژگی‌های منطقه‌ای باشد و ضرورت ارزیابی تطبیقی آن‌ها برای هر منطقه خاص، بیش‌ازپیش احساس شود (۲۷ و ۲۸).

مطالعات متعددی در ایران و سایر کشورها به مقایسه روابط تجربی پرداخته‌اند (۶، ۸ و ۲۰). برای نمونه، در حوضه‌های شمالی ایران که دارای بارش زیاد و توپوگرافی ناهموار هستند، رابطه جیاندوتی عملکرد بهتری نشان داده است؛ در حالی که در مناطق خشک مرکزی، رابطه ویلیامز نتایج دقیق‌تری ارائه داده است (۲۵). پژوهش‌هایی در استان‌های اصفهان، خراسان، گلستان و حتی حوضه‌های شهری مانند تهران نیز همگی بر این نکته تأکید داشته‌اند که انتخاب بهترین رابطه برای برآورد زمان تمرکز، نیازمند تحلیل منطقه‌ای و مقایسه دقیق عملکرد روش‌هاست (۲۳).

سلیمی و همکاران از روابط مختلف برای محاسبه زمان تمرکز حوزه آبخیز شفاورد واقع در غرب استان گیلان در شمال ایران استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر دبی اوج به‌دست‌آمده از روش برانسی - ویلیامز بیشترین تطابق را با مقادیر داده‌های اوج مشاهده‌شده دارد (۲۳). شریفی و حسینی در پژوهشی به شناسایی بهترین معادلات برای تخمین زمان تمرکز در ۷۲ حوزه آبخیز و زیرحوضه آبخیز در استان خراسان رضوی پرداختند. در این پژوهش روش‌های کالیفرنیا، کریچ و آریزون به‌عنوان بهترین روش‌ها انتخاب شدند (۲۵). در پژوهش دیگری در شمال ایتالیا، ۲۴ معادله تجربی زمان تمرکز از جمله کریچ، ویلیامز و جیاندوتی مقایسه شد و نتایج نشان داد که روش‌های کریچ و ویلیامز در شرایط خاص عملکرد بهتری دارند (۲۲). استان خوزستان به‌عنوان یکی از استان‌های مهم و راهبردی کشور،

راهبردی و برخوردار از منابع آبی فراوان در جنوب غربی ایران است. این استان با مساحتی بالغ بر ۶۴۲۳۶ کیلومتر مربع، حدود ۴ درصد از وسعت کل کشور را به خود اختصاص داده و بین ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه و ۳۳ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی است (شکل ۱). خوزستان از نظر مورفولوژیکی به دو ناحیه کوهستانی در شمال و شمال شرق و ناحیه جلگه‌ای در جنوب و جنوب غربی تقسیم می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۴۰ درصد از مساحت استان را مناطق کوهستانی و ۶۰ درصد را اراضی جلگه‌ای تشکیل می‌دهند (۱۱ و ۱۲).

جلگه خوزستان که بخش اعظم اراضی کشاورزی استان را در بر می‌گیرد، دارای شیب بسیار کم و خاک‌هایی با شوری متغیر است. گنبد‌های نمکی موجود در برخی نقاط این جلگه، در شور شدن منابع خاک و آبهای سطحی و زیرزمینی نقش مؤثری دارند. با وجود پنج رودخانه اصلی که از ارتفاعات زاگرس سرچشمه می‌گیرند و به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم به خلیج فارس می‌ریزند، خوزستان پرآب‌ترین استان ایران محسوب می‌شود. رودخانه‌های کارون، کرخه، دز، مارون (جراحی)، شاور و زهره، مهم‌ترین منابع آبی این استان هستند. خوزستان همچنین بخش‌هایی از سه حوضه درجه ۲ کشور شامل کارون، کرخه و زهره جراحی از حوضه آبریز اصلی خلیج فارس - دریای عمان را در بر می‌گیرد (۲۶).

مرزبندی و تعیین زیرحوضه‌ها بر اساس ایستگاه‌های هیدرومتری

برای برآورد زمان تمرکز در استان خوزستان، نخست لازم بود مرزهای حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها به‌دقت تعیین شود. بدین منظور، ۳۵ ایستگاه هیدرومتری فعال در سطح استان و نواحی مجاور به‌عنوان نقاط خروجی در نظر گرفته شدند. این ایستگاه‌ها مبنای تعیین محدوده مکانی زیرحوضه‌ها قرار گرفتند و با بهره‌گیری از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با دقت زمانی ۵ ثانیه قوسی، عملیات استخراج شبکه آبراهه‌ها و مرزبندی حوضه‌ها در محیط نرم‌افزار GIS انجام شد.

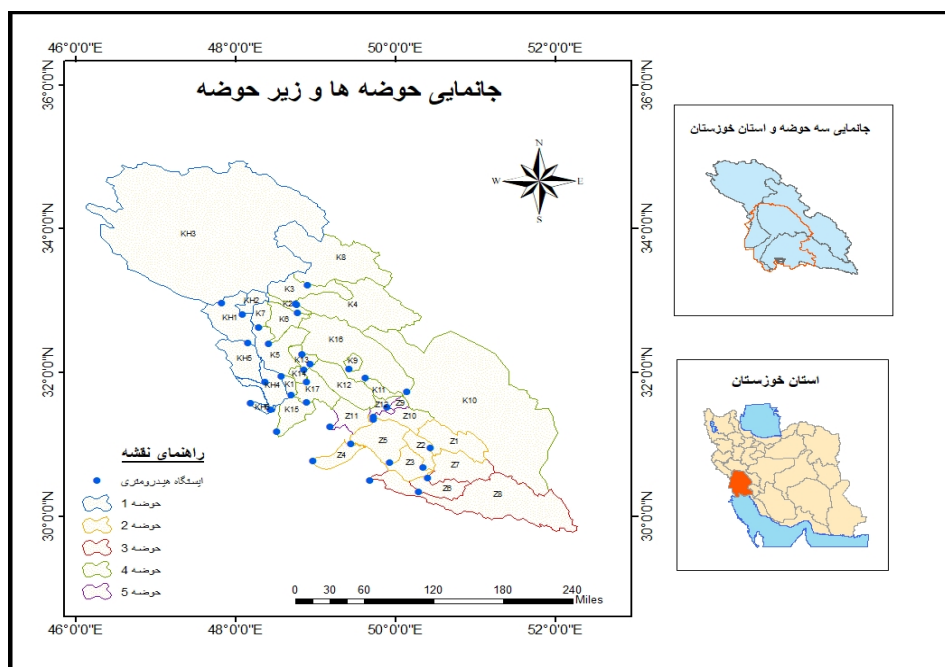
با اقلیمی گرم و خشک تا نیمه‌خشک، مستعد بارش‌های فصلی شدید و وقوع سیلاب‌های ناگهانی است (۱۴)، که نیازمند تحلیل دقیق و منطقه‌ای برای مدیریت رواناب سطحی و کنترل سیلاب است. وجود اختلافات ارتفاعی زیاد، تنوع زمین‌شناسی، تفاوت در میزان پوشش گیاهی و حضور حوضه‌های متعدد با ویژگی‌های گوناگون، بر پیچیدگی تحلیل‌های هیدرولوژیک در این استان افزوده است. با توجه به آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری و کشاورزی در برابر سیلاب، استفاده از روش‌های ساده اما قابل اعتماد برای تخمین زمان تمرکز، به‌ویژه در مراحل اولیه طراحی و برنامه‌ریزی، اهمیت زیادی دارد (۲).

در همین راستا، هدف اصلی این پژوهش، مقایسه و ارزیابی عملکرد هفت رابطه تجربی شناخته‌شده شامل برانس - ویلیامز، کالیفرنیا، جیان‌دوتی، کرپیچ، پیلگریم، هیدروگراف استدلالی و کارتر در تخمین زمان تمرکز برای ۳۵ زیرحوضه واقع در استان خوزستان است. به این منظور، ابتدا با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، پارامترهای مورفومتریک مانند طول آبراهه اصلی، شیب مسیر جریان و مساحت زیرحوضه‌ها استخراج شد. سپس، زمان تمرکز برای هر زیرحوضه با استفاده از روابط یادشده محاسبه شد. در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های مشاهداتی شش زیرحوضه منتخب و تحلیل آماری شاخص‌هایی مانند میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار نسبی و خطای مطلق، دقت و پایداری روابط ارزیابی شد. به‌منظور ارائه ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری، در پایان نقشه پهنه‌بندی زمان تمرکز در سطح استان تهیه شد. این نقشه مبنایی برای تحلیل‌های هیدرولوژیک، طراحی سازه‌های کنترل سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب در خوزستان و مناطق دارای شرایط مشابه فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان با مرکزیت شهر اهواز، یکی از استان‌های پرجمعیت،



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، زیرحوضه های آن و ایستگاه های هیدرومتری

انتخاب روابط تجربی بر اساس جامعیت، سابقه کاربرد در ایران و میزان وابستگی به پارامترهای قابل محاسبه با داده های موجود انجام شد. در نهایت، با اعمال این روابط در هر زیرحوضه، مقادیر زمان تمرکز برآورد شد و برای تحلیل فضایی نتایج از روش درون یابی کریجینگ استفاده شد که یکی از دقیق ترین روش های زمین آمار در مدل سازی مکانی متغیرهای پیوسته است.

فرمول های تجربی برآورد زمان تمرکز

زمان تمرکز به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای هیدرولوژیک در تحلیل رواناب سطحی، به بیشترین زمان لازم برای حرکت قطره ای از بارش از دورترین نقطه حوضه تا خروجی آن تعریف می شود. این پارامتر نقش کلیدی در طراحی سازه های آبی، مدل سازی سیلاب و پیش بینی پاسخ هیدرولوژیک حوضه ها دارد. تخمین صحیح زمان تمرکز، مستلزم در نظر گرفتن ویژگی های فیزیوگرافی حوضه از جمله مساحت، طول و شیب آبراهه اصلی، شیب متوسط حوضه، نوع خاک و پوشش اراضی است. در طول دهه های گذشته، فرمول های متعددی برای برآورد تجربی زمان تمرکز توسط پژوهشگران مختلف

در مرحله نخست، با استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی مانند Flow Direction، Flow Accumulation و Basin در نرم افزار ArcGIS، مسیرهای جریان سطحی شناسایی و ساختار شبکه آبراهه ای برای سه حوضه اصلی (کارون، کرخه و جراحی - زهره) ترسیم شد. سپس با تعیین ایستگاه های هیدرومتری به عنوان خروجی حوضه ها، منطقه به ۵ حوضه اصلی و ۳۵ زیرحوضه هیدرولوژیک تفکیک شد (جدول ۱ و شکل ۱). در مرحله بعد، برای استخراج ویژگی های فیزیوگرافی هر زیرحوضه، از تلفیق داده های DEM و تصاویر ماهواره ای موجود در Google Earth استفاده شد. طولانی ترین مسیر جریان (آبراهه اصلی) در هر زیرحوضه مشخص شده و با ترسیم در محیط GIS، طول دقیق آن محاسبه شد. علاوه بر آن، با به کارگیری ابزارهای Zonal Statistics و Spatial Analyst، مقادیر کمینه و بیشینه ارتفاع، شیب متوسط آبراهه ها، شیب کلی زیرحوضه، میانگین ارتفاع و مساحت هر زیرحوضه استخراج شد.

این متغیرها به عنوان پارامترهای ورودی به روابط تجربی تخمین زمان تمرکز استفاده شدند. گفتنی است که

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های هیدرومتری و زیرحوضه های منطقه مورد مطالعه

شماره حوضه	کد زیر حوضه	مساحت زیرحوضه (کیلومتر مربع)	شماره ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	KH1	۲۷۷۵	۱	پای پل	۴۸ ۰۹	۳۲ ۲۵	۹۰
	KH2	۶۷۸	۲	پل زال	۴۸ ۰۵	۳۲ ۴۹	۳۰۰
	KH3	۳۹۵۲۲	۳	جلوگیر	۴۹ ۴۳	۳۲ ۵۸	۳۷۰
	KH4	۱۷۱۲	۴	حمیدیه	۴۸ ۲۴	۳۱ ۳۰	۳۵۶
	KH5	۱۹۴۴	۵	عبدالخان	۴۸ ۲۲	۳۱ ۵۰	۳۲
	KH6	۲۴۳	۶	نیسان - سوسنگرد	۴۸ ۱۱	۳۱ ۳۳	۱۳
۲	Z1	۲۷۴۴	۷	ایندک	۵۰ ۲۵	۳۰ ۵۷	۵۶۰
	Z2	۱۱۱۳	۸	بهبهان	۵۰ ۲۰	۳۰ ۴۱	۲۸۰
	Z3	۱۵۰۹	۹	چم نظام	۴۸ ۲۶	۳۰ ۴۵	۱۷۸
	Z4	۱۱۴۷	۱۰	گرگر	۴۸ ۵۷	۳۰ ۴۶	۱۷
	Z5	۳۰۰۴	۱۱	مشراکه	۴۹ ۲۶	۳۱ ۰۰	۳۰
۳	Z6	۱۵۳۱	۱۲	پل فلور	۵۰ ۱۷	۳۰ ۲۰	۱۹۵
	Z7	۲۸۱۶	۱۳	خیر اباد	۴۸ ۵۶	۳۲ ۳۲	۱۵۷۲
	Z8	۸۸۳۹	۱۴	دهملا	۴۸ ۵۳	۳۱ ۳۰	۶
۴	K1	۳۷۹	۱۵	بامدژ	۴۸ ۴۱	۳۱ ۴۱	۲۰
	K2	۴۶۹	۱۶	تله زنگ	۴۸ ۴۶	۳۲ ۴۹	۶۳۹
	K3	۲۱۲۶	۱۷	تنگ پنج سزار	۴۷ ۴۸	۳۲ ۵۶	۵۷۱
	K4	۶۴۵۸	۱۸	تنگ پنج بختیاری	۴۹ ۳۷	۳۲ ۵۶	۵۵۵
	K5	۳۰۰۷	۱۹	حرمه	۵۰ ۲۴	۳۱ ۵۷	۶۸
	K6	۱۵۰۷	۲۰	دزفول	۴۹ ۴۰	۳۲ ۲۴	۱۲۲
	K7	۷۰۸	۲۱	دوکوهه	۴۸ ۵۱	۳۲ ۳۵	۲۸۰
	K8	۷۱۴۵	۲۲	سپیددشت زاز	۴۸ ۲۳	۳۳ ۱۳	۹۷۵
	K9	۳۸۷	۲۳	اندیکا	۳۷ ۴۹	۳۱ ۵۴	۵۰۰
	K10	۲۴۹۹۸	۲۴	پل شالو	۵۰ ۰۸	۳۱ ۴۵	۷۰۰
	K11	۶۳۶	۲۵	جلوگیر-مرغاب	۴۹ ۵۵	۳۱ ۵۴	۴۵۵
	K12	۲۵۸۸	۲۶	دشت بزرگ	۴۸ ۱۷	۳۲ ۰۷	۵۱
	K13	۳۶۳	۲۷	شوشتر-گرگر	۴۸ ۵۳	۳۲ ۰۳	۳۳
	K14	۳۶۲	۲۸	عرب اسد	۴۹ ۵۳	۳۱ ۵۱	۲۱
	K15	۱۵۵۴	۲۹	فارسیات	۴۸ ۲۲	۳۰ ۵۹	۱۰
	K16	۷۷۱۹	۳۰	گتوند	۴۸ ۴۹	۳۲ ۱۵	۱۰۰
	K17	۱۷۵۳	۳۱	ملاثانی	۴۸ ۵۳	۳۱ ۳۵	۱۷
۵	Z9	۲۸۵	۳۲	پل منجینق	۴۹ ۵۴	۳۱ ۳۱	۶۸۷
	Z10	۱۴۲۶	۳۳	جوکنگ	۴۸ ۳۳	۳۱ ۲۰	۳۰۶
	Z11	۱۵۴۵	۳۴	کوپال نمره ۳	۴۹ ۱۰	۳۱ ۱۵	۴۰
	Z12	۵۸۲	۳۵	ماشین	۴۹ ۴۳	۳۱ ۲۳	۳۵۰

کریچ (Kirpich)

$$T_c = 0.0195(L^{0.77})(S^{-0.385}) \quad (4)$$

در معادله (۴)، T_c زمان تمرکز (دقیقه)، L طول آبراهه اصلی (متر) و S شیب متوسط حوزه (متر/متر) است (۱۸).

پیلگریم (Pilgrim)

$$T_c = 0.76(A^{0.38}) \quad (5)$$

در معادله (۵)، T_c زمان تمرکز (ساعت) و A مساحت حوزه (کیلومتر مربع) است.

هیدروگراف استدلالی (Soil Conservation Service Lag Time)

$$T_c = 0.057\left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.66} \quad (6)$$

در معادله (۶)، T_c زمان تمرکز (ساعت)، L طول آبراهه (متر) و S شیب حوزه (درصد) است (۱).

کارتز (Carter)

$$T_c = 2.833(L^{0.6})(S^{-0.3}) \quad (7)$$

در معادله (۷)، T_c زمان تمرکز (ساعت)، L طول آبراهه (مایل) و S شیب متوسط آبراهه (فوت/مایل) است (۴).

شاخص‌های ارزیابی مدل‌های محاسبه زمان تمرکز

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز، از شش شاخص آماری شامل میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد شده (SME)، ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (SRMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (ASE) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) استفاده شد. این شاخص‌ها برای مقایسه مستقیم مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌ها با مقادیر مرجع مشاهده شده (بر اساس هیدروگراف واقعی) به کار گرفته شدند. همچنین، به منظور استانداردسازی مقایسه بین زیرحوضه‌هایی با مقیاس‌های زمانی متفاوت، شاخص‌های SME و SRMSE نیز

ارائه شده‌اند. هر یک از این روابط، بسته به شرایط اقلیمی، مورفولوژی حوضه و نوع داده‌های در دسترس، دارای محدوده کاربرد خاصی هستند. برخی از این روابط بر اساس مشاهدات تجربی در مناطق خاص توسعه یافته‌اند و برخی دیگر، از تحلیل‌های آماری بر داده‌های گسترده‌تر حاصل شده‌اند (۲۶).

در این پژوهش، به منظور افزایش دقت در تخمین و ارزیابی تطبیقی روابط مختلف، از هفت رابطه تجربی شناخته شده برای محاسبه زمان تمرکز در ۳۵ زیرحوضه استان خوزستان استفاده شده است. هر یک از این روابط با توجه به پارامترهای فیزیوگرافی استخراج شده از GIS، به صورت جداگانه در هر زیرحوضه اعمال شده‌اند تا مقادیر متناظر زمان تمرکز به دست آید.

در ادامه، مشخصات و ساختار ریاضی هر یک از این روابط، به همراه محدوده اعتبار و مفروضات آن‌ها، به تفصیل معرفی خواهد شد.

روش برانس - ویلیامز (Brans-Williams)

$$T_c = \frac{0.96L^{0.5}}{H^{0.2} \cdot A^{0.1}} \quad (1)$$

در معادله (۱)، T_c زمان تمرکز (ساعت)، L طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، A مساحت حوزه (کیلومتر مربع) و H اختلاف ارتفاع بین پایین‌ترین و بالاترین نقطه حوزه (متر) است (۳).

کالیفرنیا (California)

$$T_c = \left(0.885 \frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (2)$$

در معادله (۲)، T_c زمان تمرکز (ساعت)، L طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، H اختلاف ارتفاع بین پایین‌ترین و بالاترین نقطه حوزه (متر) است (۱۹).

جیاندوتی (Giandotti)

$$T_c = \frac{(4A^{0.5}) + (1.5L)}{0.8(H)^{0.5}} \quad (3)$$

در معادله (۳)، T_c زمان تمرکز (ساعت)، A مساحت حوزه (کیلومتر مربع)، L طول آبراهه اصلی (کیلومتر) و H ارتفاع متوسط حوزه (متر) است.

بودند، چند رویداد سیلابی با پاسخ مشخص انتخاب شد. زمان تمرکز مشاهداتی (T_{c-obs}) به صورت مدت زمان بین وقوع پیک بارش و پیک دبی در ایستگاه خروجی محاسبه شد. این روش یکی از رایج ترین و عملی ترین روش های تعیین زمان تمرکز واقعی در مطالعات هیدرولوژیک است. جدول ۲ خلاصه ای از مقادیر زمان تمرکز مشاهده شده را نشان می دهد.

نتایج و بحث

مشخصات فیزیکی حوضه ها

به منظور بررسی هیدرولوژیک حوضه مورد مطالعه، ابتدا مشخصات فیزیوگرافی آن شامل مساحت، طول و شیب آبراه اصلی، ارتفاع نقاط مختلف حوزه و سایر پارامترهای مرتبط استخراج شد. این ویژگی ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در برآورد زمان تمرکز مؤثر بوده و مبنای استفاده از روابط تجربی قرار می گیرند.

جدول ۳، خلاصه ای از مشخصات هیدرولوژیک ۵ حوضه اصلی و ۳۵ زیرحوضه منتخب در منطقه مورد مطالعه را ارائه می دهد. طبق جدول ۳، مقادیر پارامترها در بین زیرحوضه ها دارای تنوع قابل توجهی هستند؛ برای نمونه، مساحت زیرحوضه ها از حدود ۲۴۳ کیلومترمربع (نیسان - سوسنگرد) تا بیش از ۳۹,۰۰۰ کیلومترمربع (جلوگیر) متغیر است. همچنین شیب حوضه ها از کمتر از یک درصد در مناطق دشت (مانند حمیدیه، دشت بزرگ، عرب اسد) تا بیش از ۱۸ درصد در نواحی کوهستانی (مانند تله زنگ و پل منجیق) متغیر می باشد.

این تفاوت های مکانی نقش مهمی در رفتار هیدرولوژیک جریان و زمان تمرکز دارند و استفاده از روابط مختلف برای برآورد زمان تمرکز در چنین شرایطی ضروری به نظر می رسد. تحلیل های دقیق تر در بخش های بعدی بر اساس این داده های فیزیوگرافی انجام خواهد شد.

مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآورد شده زمان تمرکز

در جدول ۴، مقادیر زمان تمرکز مشاهداتی (T_{c-obs}) که از تحلیل رویدادهای بارش - رواناب در شش زیرحوضه منتخب استان خوزستان به دست آمده اند، با خروجی هفت رابطه تجربی شامل

محاسبه شدند. فرمول های ریاضی مربوط به این شاخص ها از معادله (۸) تا (۱۳) به شرح زیر است (۹، ۱۵، ۱۶ و ۲۱):

میانگین خطا (ME)

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{o_i} - T_{c_i}) \quad (8)$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{o_i} - T_{c_i})^2} \quad (9)$$

میانگین خطای استاندارد شده (SME)

$$SME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{o_i} - T_{c_i}}{T_{o_i}} \right) \quad (10)$$

ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (SRMSE)

$$SRMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{o_i} - T_{c_i}}{T_{o_i}} \right)^2} \quad (11)$$

میانگین قدرمطلق خطا (ASE)

$$ASE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{o_i} - T_{c_i}| \quad (12)$$

ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{o_i} - T_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{T}_o - T_{o_i})^2} \quad (13)$$

در معادلات یادشده، T_{o_i} مقدار زمان تمرکز مشاهده ای در زیرحوضه i ، T_{c_i} مقدار زمان تمرکز محاسبه شده با روش های تجربی، $\bar{T}_o$ مقدار میانگین زمان تمرکز مشاهداتی و n تعداد زیرحوضه ها است.

محاسبه زمان تمرکز مشاهداتی

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی روابط تجربی، از داده های ثبت شده در برخی ایستگاه های هیدرومتری استان خوزستان استفاده شد. برای این منظور از ۶ زیرحوضه شامل KH1، KH2، Z1، K4، K6 و Z9 که دارای داده های مناسب بارش - رواناب

جدول ۲. مشخصات رویدادهای سیلابی منتخب و محاسبه زمان تمرکز مشاهداتی در برخی زیرحوضه‌های استان خوزستان

کد زیرحوضه	تاریخ رویداد	پیک بارش (UTC)	پیک دبی (UTC)	زمان تمرکز مشاهداتی (T _{c-obs})
KH1	۱۴۰۲/۰۹/۱۵	۱۲:۰۰	۱۴:۰۰	۲۳/۶
KH2	۱۴۰۱/۱۲/۰۳	۸:۰۰	۰۹:۲۰	۱۲/۵
Z1	۱۴۰۲/۰۱/۲۸	۱۰:۳۰	۱۳:۰۰	۲۶/۰۰
K4	۱۴۰۲/۱۰/۰۵	۰۴:۰۰	۰۷:۰۰	۶/۰۰
K6	۱۴۰۱/۱۱/۲۰	۰۹:۳۰	۱۱:۰۰	۱۸/۵۰
Z9	۱۴۰۲/۰۲/۱۷	۱۵:۰۰	۱۶:۲۰	۷/۶۰

ارزیابی آماری و گرافیکی عملکرد روابط تجربی در تخمین زمان تمرکز

به‌منظور بررسی دقت مدل‌های تجربی در برآورد زمان تمرکز، از شش شاخص آماری شامل میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد شده (SME)، ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (SRMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (ASE) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) استفاده شد (شکل ۲). علاوه بر این، به‌منظور ارزیابی کلی عملکرد مدل‌ها، نمودار پراکندگی بین زمان تمرکز مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط روابط تجربی ترسیم شد (شکل ۳) و ضریب تبیین (R^2) برای هر مدل محاسبه شد.

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که رابطه کریچ به نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته و در بیشتر شاخص‌ها کمترین میزان خطا را از خود نشان داده است. مقدار RMSE این مدل برابر با ۲ ساعت و میانگین خطای آن برابر با ۰/۴۴ ساعت است که نشان‌دهنده نبود سوگیری چشمگیر در نتایج است. همچنین، بیشترین مقدار ضریب کارایی NSE (۰/۹۱) و کمترین مقدار SRMSE (۱۰/۰۶ درصد) نیز برای این رابطه ثبت شده که مؤید دقت زیاد مدل و انطباق مناسب آن با داده‌های مشاهده‌ای است.

رابطه کالیفرنیا نیز با $R^2 = ۰/۹۲۹$ و RMSE نسبتاً کم (۴/۱۷ ساعت) در جایگاه دوم قرار می‌گیرد. سایر روابط مانند کارتر ($R^2 = ۰/۸۶۲$) و جیانودوتی ($R^2 = ۰/۷۶۳$) نیز عملکرد قابل قبولی داشته‌اند؛ اگرچه دقت آن‌ها نسبت به کریچ و

ویلیامز، جیانودوتی، کریچ، کالیفرنیا، پیلگریم، هیدروگراف استدلالی و کارتر مقایسه شده‌اند. مقادیر مشاهداتی بر اساس مدت‌زمان بین پیک بارش و پیک دبی در هر زیرحوضه تعیین شده‌اند. این داده‌ها مبنایی برای ارزیابی عملکرد روابط تجربی در تخمین زمان تمرکز در شرایط واقعی منطقه فراهم می‌کنند.

بررسی جدول ۴ نشان می‌دهد که رابطه کریچ در بیشتر زیرحوضه‌ها مقداری نزدیک به مقدار مشاهداتی ارائه می‌دهد. به‌عنوان نمونه، در زیرحوضه‌های KH1، K4، Z1 و K6 اختلاف بین مقدار کریچ و T_{c-obs} کمتر از یک ساعت است که نشان از دقت مناسب این رابطه دارد. همچنین رابطه کالیفرنیا نیز در برخی موارد مانند KH2 و Z9 تطابق مناسبی با مقدار مشاهده‌ای دارد. از سوی دیگر، روابطی مانند هیدروگراف استدلالی و ویلیامز در بیشتر زیرحوضه‌ها زمان تمرکز را به‌صورت قابل توجهی بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند و تمایل به بیش‌برآورد دارند. برای نمونه، در زیرحوضه Z1، مقدار زمان تمرکز حاصل از رابطه ویلیامز حدود سه برابر مقدار مشاهده‌ای است.

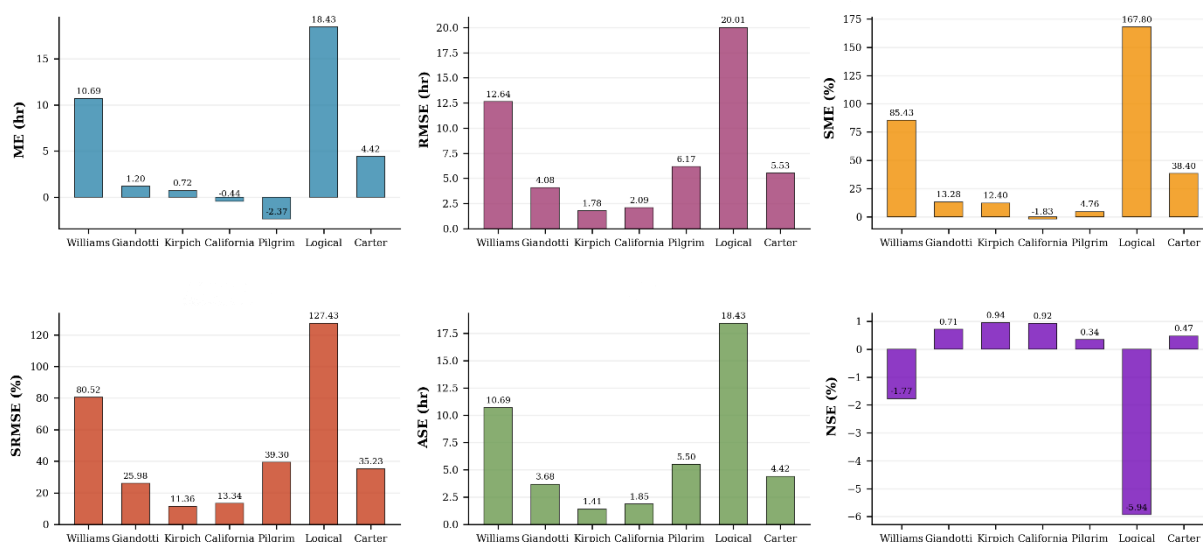
مقادیر حاصل از رابطه جیانودوتی در بیشتر زیرحوضه‌ها نیز دچار انحراف از مقدار مشاهداتی هستند و بیشتر تمایل به بیش‌برآورد دارند. رابطه پیلگریم نیز در بعضی زیرحوضه‌ها مانند KH2 مقدار مناسبی ارائه داده؛ ولی در برخی دیگر دقت کمی دارد. به‌طور کلی، رابطه کریچ با کمترین خطای مطلق و میانگین، بیشترین همخوانی را با داده‌های میدانی داشته است و می‌توان آن را به‌عنوان گزینه قابل اعتماد در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد کرد.

جدول ۳. مشخصات هیدرولوژیک حوضه ها و زیرحوضه های مطالعاتی

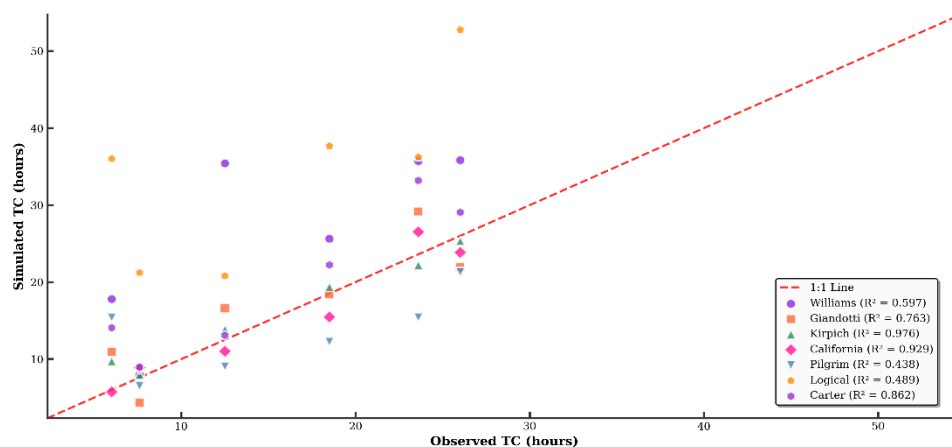
شماره حوضه	کد زیر حوضه	نام ایستگاه	مساحت (کیلومتر مربع)	ارتفاع آبراهه (متر)		ارتفاع حوزه (متر)			طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	شیب حوضه (درصد)	شیب آبراهه (درصد)	
				حداکثر	حداقل	اختلاف	حداقل	حداکثر				متوسط
۱	KH1	پای پل	۲۷۷۵	۴۵۳	۹۲	۳۶۱	۹۲	۲۲۵۵	۵۹۲	۲۰۷/۵	۷/۱۴	۴/۵۲
	KH2	پل زال	۶۷۸	۲۴۱۱	۳۲۶	۲۰۸۵	۲۸۶	۲۶۹۶	۱۳۶۴	۶۶/۲	۱۴/۵۶	۱۰/۲۱
	KH3	جلوگیر	۳۹۵۲۲	۲۳۷۱	۳۴۸	۲۰۲۳	۳۷۹	۳۶۲۳	۱۶۱۶	۶۸۲	۸/۶۶	۲/۹۷
	KH4	حمیدیه	۱۷۱۲	۶۱	۰	۶۱	۰	۲۲۶	۴۰	۱۰۳	۰/۷۶	۱/۱۰
	KH5	عبدالحان	۱۹۴۴	۱۱۰	۰	۱۱۰	۰	۳۷۳	۱۱۴	۱۰۸/۲	۰/۹۲	۱/۲۹
	KH6	نیسان - سوسنگرد	۲۴۳	۲۱	۰	۲۱	۰	۷۵	۱۴	۳۷/۱	۰/۸۴	۰/۸۸
۲	Z1	ایندک	۲۷۴۴	۱۴۱۸	۵۸۶	۸۳۲	۵۸۱	۳۴۸۵	۱۸۴۶	۶۷/۶	۱۴/۸۷	۸/۳۹
	Z2	بهبهان	۱۱۱۳	۶۶۵	۳۳۰	۳۳۵	۳۲۹	۳۱۰۳	۱۱۵۷	۵۰/۷	۱۲/۶۱	۷/۵۷
	Z3	چم نظام	۱۵۰۹	۳۶۰	۱۶۱	۱۹۹	۱۶۱	۳۴۸۵	۴۹۶	۵۷/۱	۵/۱۰	۲/۰۹
	Z4	گرگر	۱۱۴۷	۳۷	۷	۳۰	۶	۳۳۲	۲۱	۱۱۴/۲	۰/۶۴	۰/۶۴
	Z5	مشراکه	۳۰۰۴	۲۲۱	۲۱	۲۰۰	۲۲	۲۶۷۹	۴۸۹	۹۵/۶	۵/۸۵	۱/۱۰
۳	Z6	پل فلور	۱۵۳۱	۳۹۷	۱۸۴	۲۱۳	۱۸۴	۳۱۵۶	۱۸۴	۳۴/۳	۵/۸۱	۲/۹۰
	Z7	خیر اباد	۲۸۱۶	۱۱۹۴	۳۴۸	۸۴۶	۳۵۴	۳۴۷۵	۱۴۰۰	۶۲/۵	۱۲/۶۴	۶/۵۹
	Z8	دهملا	۸۸۳۹	۲۹۰۸	۸	۲۹۰۰	۸	۳۴۰۷	۱۲۵۲	۴۰۷	۹/۱۷	۵/۱۶
۴	K1	بامدژ	۳۷۹	۴۵	۰	۴۵	۰	۶۴	۲۶	۵۶/۳	۰/۵۳	۰/۷۰
	K2	تله زنگ	۴۶۹	۷۲۳	۴۴۲	۲۸۱	۴۴۲	۲۶۷۳	۱۳۷۷	۲۴/۴	۲۱/۱۱	۱۳/۲۹
	K3	تنگ پنج سزار	۲۱۲۶	۹۹۲	۵۴۹	۴۴۳	۵۴۹	۳۸۷۵	۵۴۹	۶۹/۳	۱۸/۴۸	۱۰/۳۷
	K4	تنگ پنج بختیاری	۶۴۵۸	۲۷۲۰	۵۴۵	۲۱۷۵	۵۴۵	۴۰۳۷	۲۲۱۵	۲۶۴	۱۸/۲۶	۱۱/۴۰
	K5	حرمله	۳۰۰۷	۱۳۸	۱۰/۵	۱۲۷/۵	۸/۲۸	۱۷۵۴	۲۲۷	۸۴/۶	۲/۶۶	۱/۰۷
	K6	دزفول	۱۵۰۷	۵۹۱	۱۰۵	۴۸۶	۱۰۱	۲۶۲۵	۷۸۴	۱۵۲	۱۱/۱۳	۹/۲۴
	K7	دوکوهه	۷۰۸	۲۱۰۸	۲۳۷	۱۸۷۱	۲۳۷	۲۵۴۰	۸۴۵	۵۹/۶	۹/۶۱	۶/۳۲
	K8	سپیددشت زاز	۷۱۴۵	۲۳۴۶	۹۸۵	۱۳۶۱	۹۷۰	۴۰۵۰	۲۰۴۲	۱۴۸	۸/۴۸	۳/۷۷
	K9	اندیکا	۳۸۷	۸۹۷	۵۰۱	۳۹۶	۴۴۴	۱۴۷۹	۷۳۷	۳۶/۱	۵/۹۰	۳/۷۱
	K10	پل شالو	۲۴۹۹۸	۲۹۱۲	۷۰۰	۲۲۱۲	۷۰۰	۴۳۹۱	۲۳۰۲	۲۸۶	۱۲/۴۴	۸/۷۰
	K11	جلوگیر - مرغاب	۶۳۶	۱۶۱۳	۴۶۲	۱۱۵۱	۵۱۵	۲۹۸۴	۱۰۱۲	۷۶/۳	۳/۰۸	۴/۳۸
	K12	دشت بزرگ	۲۵۸۸	۷۹۸	۴۶	۷۵۲	۴۶	۱۳۷۲	۴۲۰	۱۷۰	۵/۲۳	۲/۵۳
	K13	شوشتر - گرگر	۳۶۲/۶۲	۱۰۳	۲۳	۸۰	۲۲	۶۱۴	۱۵۰	۳۶/۳	۳/۰۸	۱/۵۸
	K14	عرب اسد	۳۶۲	۳۹	۰	۳۹	۰	۱۷۱	۴۱	۴۰/۸	۰/۸۳	۰/۹۱
	K15	فارسیات	۱۵۵۴	۴۴	۰	۴۴	۰	۸۰	۱۴	۱۱۰/۳	۰/۶۲	۱/۱۶
	K16	گتوند	۷۷۱۹	۸۶۲	۲۷	۸۳۵	۴۲	۳۷۲۹	۱۱۵۰	۲۴۱/۴	۱۴/۸۷	۸/۷۲
	K17	ملاثانی	۱۷۵۳	۴۰	۰	۴۰	۰	۵۸۷	۵۹	۸۵	۱/۴۷	۱/۰۸
۵	Z9	پل منجیق	۲۸۵	۲۹۷۷	۶۹۱	۲۲۸۶	۶۸۷	۳۲۹۵	۱۸۶۵	۳۳/۹	۱۸/۵۵	۱۴/۰۷
	Z10	جوکنگ	۱۴۲۶	۲۰۴۵	۳۰۶	۱۷۳۹	۳۰۶	۳۵۷۹	۱۶۴۱	۹۳	۱۳/۹۸	۷/۰۳
	Z11	کوپال نمره ۳	۱۵۴۵	۳۲۲	۳۰	۲۹۲	۲۶	۶۹۱	۱۷۴	۸۳/۵	۲/۴۶	۱/۳۴
	Z12	ماشین	۵۸۲	۲۵۷۰	۳۴۶	۲۲۲۴	۳۴۶	۲۸۴۱	۸۴۷	۶۸/۶	۷/۶۲	۶/۴۷

جدول ۴. مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآورد شده زمان تمرکز در زیرحوضه‌های منتخب با استفاده از روابط تجربی مختلف

کد زیر حوضه	Tc-obs (hr)	ویلیامز (ساعت)	جیاندوتی (ساعت)	کرپیچ (ساعت)	کالیفرنیا (ساعت)	پیلگریم (ساعت)	هیدروگراف استدلالی (ساعت)	کارتر (ساعت)
KH1	۲۳/۶	۳۵/۷۰	۲۹/۱۸	۲۲/۲۱	۲۶/۵۴	۱۵/۴۶	۳۶/۲۵	۳۳/۲۲
KH2	۱۲/۵	۳۵/۴۲	۱۶/۶۱	۱۳/۸۷	۱۱/۰۳	۹/۰۵	۲۰/۸۰	۱۳/۱۱
K4	۲۶/۰۰	۳۵/۸۴	۲۱/۹۴	۲۵/۳۱	۲۳/۸۵	۲۱/۳۳	۵۲/۷۶	۲۹/۰۸
Z1	۶/۰۰	۱۷/۸۰	۱۰/۹۵	۹/۷۲	۵/۷۵	۱۵/۴۰	۳۶/۰۴	۱۴/۰۸
K6	۱۸/۵	۲۵/۶۳	۱۸/۳۹	۱۹/۴۰	۱۵/۴۸	۱۲/۲۶	۳۷/۶۹	۲۲/۲۴
Z9	۷/۶	۷/۹۷	۴/۳۲	۷/۹۹	۸/۹۰	۶/۵۱	۲۱/۲۴	۸/۹۷



شکل ۲. مقایسه آماری عملکرد روابط تجربی در تخمین زمان تمرکز در زیرحوضه‌های منتخب



شکل ۳. نمودار پراکندگی مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده زمان تمرکز

ویژگی‌های توپوگرافی تند این مناطق مطابقت دارد. در مقابل، در زیرحوضه‌هایی با وسعت زیاد و شیب کم مانند جلوگیر (KH3) و دهملا (Z8)، زمان تمرکز بیشتری به دست آمده که می‌تواند نشان‌دهنده تأخیر بیشتر در رسیدن رواناب به خروجی حوضه باشد. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که انتخاب رابطه مناسب برای برآورد زمان تمرکز باید با توجه به شرایط فیزیکی و هیدرولوژیک حوضه انجام شود و استفاده از میانگین چند رابطه یا ترکیب آن‌ها می‌تواند در شرایط عدم قطعیت، برآورد قابل اعتمادتری ارائه دهد.

پهنه‌بندی فضایی احتمال کاربرد مدل کریپچ در برآورد زمان تمرکز
نقشه ترسیم‌شده در شکل ۴، توزیع فضایی احتمال به‌کارگیری مدل کریپچ در تخمین زمان تمرکز در سطح زیرحوضه‌های استان خوزستان را نمایش می‌دهد. این نقشه با استفاده از روش کریجینگ احتمالاتی تولید شده و بر پایه نتایج حاصل از ارزیابی و مقایسه مدل‌های تجربی متعدد شامل ویلیامز، جیان‌دوتی، کالیفرنیا، کارتر، پیلگریم و هیدروگراف استدلالی است. هدف از این تحلیل، شناسایی قابلیت اعتماد مکانی مدل کریپچ و ارزیابی دقت و تعمیم‌پذیری آن در مواجهه با ناهمگنی‌های طبیعی در سطح حوضه است.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین احتمال انتخاب مدل کریپچ مربوط به نواحی غربی و جنوب‌غربی حوضه است؛ مناطقی همچون زیرحوضه‌های KH4، KH6 و KH15 با احتمال بیش از ۸۰ درصد. این مناطق به‌طور معمول دارای ویژگی‌هایی مانند شیب‌های کم، طول مسیرهای جریان زیاد و تأخیر زیاد در پاسخ به بارش هستند که با فرضیات بنیادین مدل کریپچ تطابق زیادی دارد. بنابراین، سازگاری طبیعی بین ساختار مدل و ویژگی‌های فیزیکی این نواحی، موجب بیشتر شدن دقت آن شده است. در مقابل، بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی حوضه، به‌ویژه زیرحوضه‌های Z1، Z2، Z3 و Z6، دارای کمترین احتمال کاربرد مدل کریپچ (کمتر از ۲۰ درصد) هستند. این نواحی به‌دلیل شیب‌های تند، پوشش گیاهی ضعیف‌تر و واکنش سریع‌تر رواناب به بارش، ماهیتی متفاوت با فرضیات مدل دارند. در چنین شرایطی، مدل‌هایی که رفتار رواناب سریع و متمرکز را بهتر بازنمایی می‌کنند، محتمل‌تر است که عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان دهند.

کالیفرنیا کمتر است. در مقابل، روابط ویلیامز ($R^2 = 0/597$)، پیلگریم ($R^2 = 0/438$) و مدل هیدروگراف استدلالی ($R^2 = 0/489$) دقت کمتری را نشان دادند. این مدل‌ها تمایل به بیش‌برآورد زمان تمرکز دارند؛ به‌ویژه رابطه ویلیامز با مقدار ME برابر با ۱۰/۶۹ ساعت و SME برابر با ۱۱۸/۶، بیانگر سوگیری مثبت قابل توجه در تخمین‌هاست.

نمودار پراکندگی (شکل ۳) نیز تطابق زیاد خروجی مدل کریپچ با داده‌های مشاهده‌ای را تأیید می‌کند؛ به‌طوری که نقاط متناظر با این مدل به‌طور منظم در اطراف خط ۱:۱ توزیع شده‌اند، درحالی‌که سایر مدل‌ها، به‌ویژه ویلیامز و استدلالی، دارای پراکندگی و انحرافات محسوسی هستند.

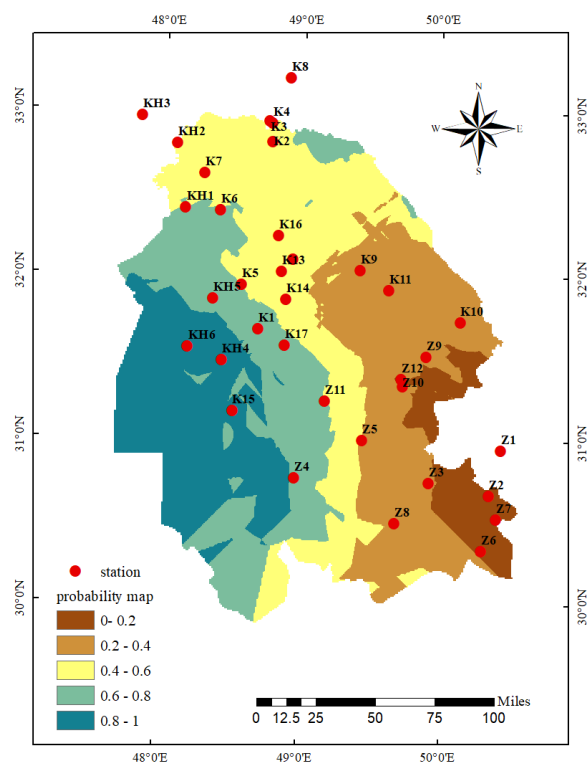
برآورد زمان تمرکز با استفاده از روابط تجربی مختلف

برای تخمین زمان تمرکز در سایر زیرحوضه‌های مورد مطالعه، از هفت رابطه تجربی مختلف شامل ویلیامز، جیان‌دوتی، کریپچ، کالیفرنیا، پیلگریم، هیدروگراف استدلالی و کارتر استفاده شد. نتایج این برآوردها در جدول ۵ ارائه شده است. طبق این جدول، مقادیر زمان تمرکز حاصل از روابط مختلف در یک زیرحوضه ممکن است اختلاف قابل توجهی با یکدیگر داشته باشند. برای نمونه، در زیرحوضه KH3 (ایستگاه جلوگیر)، مقدار زمان تمرکز بر اساس رابطه ویلیامز ۱۸۲/۷۸ ساعت و بر اساس رابطه پیلگریم ۴۲/۴۲ ساعت تخمین زده شده است که بیانگر تفاوت ماهیتی این روابط در در نظر گرفتن پارامترهای فیزیوگرافی و هیدرولیک است. در حالت کلی، رابطه هیدروگراف استدلالی بیشترین مقدار زمان تمرکز را در بیشتر زیرحوضه‌ها تخمین زده است که به علت ماهیت محافظه‌کارانه این رابطه در برآورد زمان پاسخ حوضه است. از سوی دیگر، روابط کریپچ و کالیفرنیا معمولاً زمان تمرکز کوتاه‌تری را ارائه داده‌اند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این روابط به شیب و طول آبراهه است.

در برخی زیرحوضه‌های کوچک با شیب زیاد مانند تله‌زنگ (K2) و پل منجینق (Z9)، زمان تمرکز به نسبت کمی در تمامی روابط دیده می‌شود (کمتر از ۱۰ ساعت) که با

جدول ۵. برآورد زمان تمرکز برای زیرحوضه‌های مطالعاتی بر اساس روابط مختلف تجربی

شماره حوضه	کد زیر حوضه	ویلیامز (ساعت)	جیانودوتی (ساعت)	کریچ (ساعت)	کالیفرنیا (ساعت)	پیلگریم (ساعت)	هیدروگراف استدلالی (ساعت)	کارتر (ساعت)
۱	KH1	۳۵/۷۰	۲۹/۱۸	۲۲/۲۱	۲۶/۵۴	۱۵/۴۶	۳۶/۲۵	۳۳/۲۲
	KH2	۳۵/۴۲	۱۶/۶۱	۱۳/۸۷	۱۱/۰۳	۹/۰۵	۲۰/۸۰	۱۳/۱۱
	KH3	۱۸۲/۷۸	۶۳/۸۳	۷۹/۱۶	۷۹/۵۸	۴۲/۴۲	۱۹۸/۰۳	۷۶/۹۶
	KH4	۵۲/۱۵	۶۳/۲۵	۲۴/۸۷	۲۵/۰۱	۱۲/۸۷	۱۲۶/۹۲	۳۳/۳۱
	KH5	۴۸/۵۵	۳۹/۶۵	۲۱/۷۱	۲۱/۸۳	۱۳/۵۱	۱۲۳/۲۵	۳۲/۷۷
	KH6	۲۳/۰۴	۳۹/۴۲	۱۱/۶۹	۱۱/۷۶	۶/۱۳	۶۲/۷۱	۱۹/۳۰
۲	Z1	۱۷/۸۰	۱۰/۹۵	۹/۷۲	۵/۷۵	۱۵/۴۰	۳۶/۰۴	۱۴/۰۸
	Z2	۱۶/۵۴	۹/۱۱	۴/۱۸	۴/۲۰	۱۰/۹۳	۳۱/۴۷	۱۲/۲۲
	Z3	۲۰/۵۴	۱۶/۴۶	۴/۴۷	۴/۴۹	۱۲/۲۷	۴۵/۸۸	۱۹/۳۱
	Z4	۷۰/۸۱	۱۰۲/۴۸	۲۴/۳۴	۲۴/۴۷	۱۱/۰۵	۱۴۳/۶۷	۴۱/۶۹
	Z5	۳۵/۵۵	۲۰/۹۵	۸/۸۴	۸/۸۸	۱۵/۹۳	۶۱/۶۴	۳۱/۸۸
	Z6	۱۰/۹۸	۱۲/۲۰	۲/۵۹	۲/۶۰	۱۲/۳۳	۳۱/۴۱	۱۲/۸۹
	Z7	۱۶/۱۰	۱۱/۷۹	۵/۰۸	۵/۱۱	۱۵/۵۵	۳۶/۱۱	۱۴/۴۴
	Z8	۱۰۶/۳۳	۳۴/۹۶	۴۲/۸۳	۴۳/۰۶	۲۴/۰۱	۱۳۸/۲۵	۴۷/۸۴
۴	K1	۳۱/۲۲	۳۹/۷۹	۲۰/۱۲	۲۰/۲۳	۷/۲۶	۹۶/۱۷	۲۶/۵۵
	K2	۷/۷۷	۵/۰۴	۱/۹۵	۱/۹۶	۷/۸۷	۱۶/۳۹	۶/۶۵
	K3	۲۱/۳۴	۱۰/۲۶	۵/۵۹	۵/۶۲	۱۳/۹۷	۳۴/۱۰	۱۳/۴۱
	K4	۳۵/۸۴	۲۱/۹۴	۲۵/۳۱	۲۳/۸۵	۲۱/۳۳	۵۲/۷۶	۲۹/۰۸
	K5	۳۳/۵۹	۲۹/۴۱	۹/۰۲	۹/۰۷	۱۵/۹۴	۷۳/۷۱	۲۹/۸۶
	K6	۲۵/۶۳	۱۸/۳۹	۱۹/۴۰	۱۵/۴۸	۱۲/۲۶	۳۷/۶۹	۲۲/۲۴
	K7	۱۴/۹۰	۹/۹۳	۵/۴۱	۵/۴۴	۹/۲۰	۳۸/۳۰	۱۴/۲۱
	K8	۳۷/۵۳	۲۱/۵۳	۱۳/۸۳	۱۳/۹۰	۲۲/۱۵	۷۲/۷۶	۲۸/۶۵
	K9	۱۱/۸۳	۱۰/۸۰	۴/۱۳	۴/۱۵	۷/۳۱	۳۲/۳۱	۱۲/۳۴
	K10	۶۶/۲۵	۳۳/۱۴	۲۷/۶۱	۲۷/۷۶	۳۵/۶۵	۹۹/۰۵	۳۳/۰۹
	K11	۲۲/۳۲	۱۱/۴۸	۷/۰۱	۷/۰۴	۸/۸۳	۶۵/۶۶	۱۸/۳۹
	K12	۵۵/۲۴	۲۹/۶۴	۲۲/۴۵	۲۲/۵۷	۱۵/۰۶	۹۳/۴۹	۳۵/۰۷
	K13	۱۶/۵۰	۱۴/۴۹	۵/۱۵	۵/۱۸	۷/۱۴	۴۰/۲۲	۱۵/۹۹
	K14	۲۱/۹۳	۲۶/۸۰	۹/۵۰	۹/۵۵	۷/۱۳	۶۶/۹۷	۲۰/۲۳
	K15	۶۱/۰۳	۱۰۷/۹۵	۴۰/۱۶	۴۰/۳۷	۱۲/۴۰	۱۴۱/۸۱	۳۴/۲۲
	K16	۷۳/۸۷	۲۶/۶۲	۲۲/۷۱	۲۲/۸۳	۲۲/۸۱	۸۳/۴۸	۲۹/۸۶
	K17	۴۴/۹۶	۴۸/۰۰	۱۳/۸۰	۱۳/۸۷	۱۲/۹۹	۸۹/۹۳	۲۹/۸۸
۵	Z9	۷/۹۷	۴/۳۲	۷/۹۹	۸/۹۰	۶/۵۱	۲۱/۲۴	۸/۹۷
	Z10	۲۴/۰۴	۹/۹۴	۷/۹۰	۷/۹۴	۱۲/۰۱	۴۵/۴۰	۱۷/۹۷
	Z11	۲۹/۹۵	۲۹/۴۲	۱۲/۸۸	۱۲/۹۵	۱۲/۳۸	۷۵/۰۰	۲۷/۷۰
	Z12	۱۷/۳۸	۱۱/۱۴	۶/۱۷	۶/۲۰	۸/۵۴	۴۵/۳۷	۱۵/۳۵



شکل ۳. نقشه احتمال کاربرد مدل Kirpich در برآورد زمان تمرکز زیرحوضه‌های استان خوزستان با استفاده از روش کریچینگ

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد هفت رابطه تجربی شناخته‌شده در تخمین زمان تمرکز (T_c) برای ۳۵ زیرحوضه استان خوزستان ارزیابی شد. در گام نخست، شش زیرحوضه دارای داده‌های معتبر بارش - رواناب انتخاب شدند و زمان تمرکز مشاهداتی آن‌ها با استفاده از فاصله زمانی میان پیک بارش و پیک دبی استخراج شد. سپس مقادیر حاصل از روابط تجربی شامل برانس - ویلیامز، کالیفرنیا، جیاندوتی، کریچ، پیلگریم، هیدروگراف استدلالی و کارتر با داده‌های واقعی مقایسه و با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف تحلیل شدند.

نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که رابطه کریچ با RMSE معادل ۲ ساعت، میانگین خطا (ME) برابر ۰/۴۴ ساعت و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE) برابر با ۰/۹۱، دقیق‌ترین و باثبات‌ترین تخمین‌ها را ارائه داده است. این رابطه در چهار زیرحوضه از شش زیرحوضه، اختلافی کمتر از یک ساعت با مقادیر مشاهداتی داشته و توزیع نقاط آن در نمودار پراکندگی نیز نزدیکی زیادی به

در نواحی میانی و مرکزی حوضه، مانند K1، K7 و K16، احتمال استفاده از مدل کریچ در محدوده متوسط (۴۰ تا ۶۰ درصد) قرار دارد. این موضوع بیانگر آن است که مدل کریچ نه تنها در نواحی خاص، بلکه در شرایط متنوع فیزیوگرافی نیز عملکرد متعادلی از خود نشان داده است. این ویژگی، مدل را برای کاربردهای مقیاس حوضه‌ای و شبیه‌سازی‌های نیمه‌توزیعی یا پیوسته مناسب می‌کند.

به‌طور کلی، نتایج حاصل از تحلیل فضایی گواه آن است که مدل کریچ از دیدگاه آماری و جغرافیایی، در طیف وسیعی از زیرحوضه‌ها عملکردی قابل قبول و هم‌راستا با شرایط طبیعی منطقه دارد. این سازگاری زیاد موجب شده تا مدل یادشده، نه تنها برای برآورد زمان تمرکز در این مطالعه، بلکه به‌عنوان مرجع اولیه برای واسنجی مدل‌های پیشرفته‌تری نیز پیشنهاد شود. همچنین این تحلیل نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های ژئواستاتیکی با مدل‌های تجربی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌سازی دقیق و مکان‌مبنا در مدیریت منابع آب باشد.

نقشه پهنه‌بندی زمان تمرکز در سطح استان تهیه شد. این نقشه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی در طراحی و مکان‌یابی سازه‌های کنترل سیلاب، تدوین طرح‌های تغذیه مصنوعی، تحلیل رفتار حوضه‌ها در شرایط بحرانی و واسنجی مدل‌های بارش - رواناب استفاده شود.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مدل تجربی مناسب در سطح منطقه‌ای نیازمند تحلیل‌های آماری، فضایی و عملکردی دقیق است. رابطه کریچ با توجه به سادگی، دقت زیاد، نیاز به پارامترهای قابل محاسبه و پایداری آماری، می‌تواند به‌عنوان مدل پایه در برآورد زمان تمرکز در حوضه‌های مشابه استفاده شود. همچنین، ترکیب رویکردهای عددی با ابزارهای مکان‌محور می‌تواند مسیر دستیابی به مدیریت هوشمند منابع آب و کاهش ریسک سیلاب را در مناطق آسیب‌پذیر هموار سازد.

خط ۱:۱ نشان داده است. مدل کالیفرنیا نیز عملکرد قابل قبولی داشت و در برخی شاخص‌ها رتبه دوم را به خود اختصاص داد. در مقابل، مدل ویلیامز با ME برابر ۱۰/۶۹ ساعت، RMSE برابر ۱۲/۸۵ ساعت و R^2 معادل ۰/۵۹۷، بیشترین خطا و کمترین تطابق با مشاهدات را نشان داد و در بیشتر زیرحوضه‌ها زمان تمرکز را به‌طور محسوس بیش‌برآورد کرد.

پس از تحلیل تطبیقی، این روابط در سایر زیرحوضه‌های استان نیز اعمال شدند. مقایسه نتایج حاصل از روابط مختلف نشان داد که تفاوت‌های فاحشی بین مدل‌ها در تخمین زمان تمرکز وجود دارد؛ برای نمونه، در برخی زیرحوضه‌ها مانند KH3، اختلاف بین بیشینه و کمینه زمان تمرکز برآوردی به بیش از ۱۴۰ ساعت رسید. این موضوع اهمیت انتخاب دقیق مدل با توجه به شرایط فیزیوگرافی، اقلیم و شیب منطقه را برجسته می‌کند. در گام نهایی، با استفاده از نتایج حاصل از مدل کریچ،

References

منابع مورد استفاده

1. Abdullahi, M. A., J. Abedi Koupai and M. M. Matinzadeh. 2024. The Effect of the Sub-Basins Area and Methods of Calculating Concentration Time on the Simulation of Urban Runoff Volume Using SewerGEMS Software. (Case Study: Shahrekord). *Journal of Water and Soil Science* 28(3): 1-15.
2. Bahmani, R., S. Eslamian, M. Khorsandi and E. Z. Hosseini-pour. 2013. Combination of L-Moments Method and Hydrological Model for Design Flood Hydrograph Determination. *In: World Environmental and Water Resources Congress 2013*. Cincinnati, Ohio, USA.
3. Beran, M. and G. B. Williams. 1979. TECHNICAL NOTE. THE BRANSBY WILLIAMS FORMULA - AN EVALUATION. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 66(2): 293-299.
4. Carter, R. 1961. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. US Geological Survey Professional Paper. 424: 9-11.
5. Chow, V. 1971. Applied hydrology. McGraw-hill, Columbus.
6. Dastorani, M., E. Abdollahwand, M. Asareh, A. Talebi and A. Moghaddamnia. 2013. Evaluation of the application of some empirical concentration time for equations for estimating of channel flow travel time. *Watershed Management Research* 26(2): 42-52.
7. Eslamian, S. 2014. Handbook of engineering hydrology: fundamentals and applications. CRC Press, Boca Raton, USA.
8. Eslamian, S. and A. Mehrabi. 2005. Identifying empirical equations for time of concentration in mountainous watersheds. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 12(5): 1-11.
9. Ferreira, P. M. D. L., A. R. D. Paz and J. M. Bravo. 2020. Objective functions used as performance metrics for hydrological models: state-of-the-art and critical analysis. *Rbrh* 25: e42.
10. García-Ayllón, S. and J. Pilz. 2024. Editorial: Territorial spatial evolution process and its ecological resilience. *Frontiers in Environmental Science* 12: 1373672
11. Ghiasvand, F., A. A. Babaei, M. Yazdani and Y. Tahmasebi Birgani. 2021. Spatial modeling of environmental vulnerability in the biggest river in Iran using geographical information systems. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 19(1): 1069-1074.
12. Golabkesh, F., N. Ghanavati, A. Nazarpour and T. B. Nejad. 2021. Monitoring Soil Salinity Changes, Comparison of Different Maps and Indices Extracted from Landsat Satellite Images (Case Study: Atabieh, Khuzestan). *Polish Journal of Environmental Studies* 30(2): 1-16.

13. Jamali, M., A. Gohari and G. Akhavan Saraf. 2024. Spatiotemporal evaluation of temperature and precipitation extremes indices over Iran under the influence of climate change. *Water and Irrigation Management* 14(3): 743-752.
14. Jamali, M., A. Gohari, A. Motamedi and A. T. Haghighi. 2022. Spatiotemporal Changes in Air Temperature and Precipitation Extremes over Iran. *Water* 14.21 (2022): 3465. doi:10.3390/w14213465
15. Jamali, M., H. Yazdian, G. Bahman and S. Eslamian. 2025. Water agriculture nexus a system dynamics approach for the next three decades. *Scientific Reports* 15(1): 5946.
16. Jamali Jeze, M., M. Shayannejad and S. M. Hejazi. 2021. Evaluation the performance of filters made of BC, PET and PP textiles in removing oil contaminants from water. *Journal of Water and Soil Science* 24(4): 295-312.
17. Kiani, S., F. Azariun and A. Ahmadabadi. 2024. Analysis of flooding in the south of Tabriz city and its effects on the implementation of the sixth section of freeway project of Urmia-Tabriz. *Physical Geography Research* 56(3): 115-131.
18. Kirpich, Z. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10(6): 362.
19. Lee, J., C. Yoo and J. Sin. 2013. Theoretical backgrounds of basin concentration time and storage coefficient and their empirical formula. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(2): 155-169.
20. Mehrabi, A. 2000. Detemination of the appropriate empirical relationship for estimating the concentration time of basins. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
21. Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai and P. Daggupati. 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763-1785.
22. Ravazzani, G., L. Boscarello, A. Cislighi and M. Mancini. 2019. Review of Time-of-Concentration Equations and a New Proposal in Italy. *Journal of Hydrologic Engineering* 24(10): 04019039.
23. Salimi, E. T., A. Nohegar, A. Malekian, M. Hoseini and A. Holisaz. 2017. Estimating time of concentration in large watersheds. *Paddy and Water Environment* 15(1): 123-132.
24. Shahraiyini Hamid, T. and B. Ataie-Ashtiani. 2012. Mathematical Forms and Numerical Schemes for the Solution of Unsaturated Flow Equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(1): 63-72.
25. Sharifi, S. and M. Hosseini Seyed. 2011. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(11): 712-719.
26. Tahvilian, M. 2025. Flood frequency analysis using rational - probabilistic method and regionalization of runoff coefficients with various return periods (case study of Khuzestan Province). Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
27. Wong Tommy, S. 2005. Assessment of Time of Concentration Formulas for Overland Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(4): 383-387.
28. Zahraei, A., R. Baghbani and A. Linhoss. 2021. Applying a Graphical Method in Evaluation of Empirical Methods for Estimating Time of Concentration in an Arid Region. *Water* 13(19): 2624. doi:10.3390/w13192624