Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 125- 137

OPEN ACCESS

Research Paper

Performance Evaluation of the WetSpa Hydrological Distributed Model for Runoff Simulation in the Sarbaz Watershed of Sistan and Baluchistan

Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno

Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran, (Corresponding author: mr.dahmardeh@uoz.ac.ir)

Received: 05 September, 2025 Revised: 10 November, 2025 Accepted: 07 December, 2025

Extended Abstract

Background: The application of hydrological models in watersheds has always been considered by water resources researchers. This subject is of special importance in arid and semi-arid regions due to the greater complexity of hydrological processes in these regions. Optimal utilization and consumption of water resources and their optimal management require a better understanding of the hydrological model. Precipitation and subsequently surface runoff are important phases of the hydrological cycle. Given the present situation in most of Iran's watersheds in terms of missing statistics and high complexity and impossibility of fully understanding hydrological ecosystems, it is essential to use some approaches and methods to estimate runoff in watersheds with missing data or incomplete statistics. Rainfall-runoff models can simulate processes within a watershed and serve as a tool to estimate runoff and study hydrological processes. In the present research, the WetSpa distributed hydrological model was applied to simulate river flow in the Sarbaz watershed of Sistan and Baluchistan Province.

Methods: With an area of 6324.29 km^2, the Sarbaz watershed is located in Sistan and Baluchistan Province, the southeast of Iran. The discharge of the Sarbaz River is more affected than the northern areas of the basin. The base discharge of the Sarbaz River is low, but its flood discharge is high even for the periods of low return. The Wetspa distributed hydrological model was used to simulate the runoff of this area. WetSpa is a distributed, continuous, and physical model with daily or hourly time step that explains precipitation, runoff, and evapotranspiration processes for both simple and complex contexts. The WetSpa model first calculates water balance in the root zone because this is the most important area in water retention and, at the same time, it controls surface and subsurface runoff, evapotranspiration, and underground water flow. The model uses the modified rational method to calculate runoff and to estimate snowmelt runoff growth; it applies the day-degrees coefficient method. After determining the initial values of the parameters, the model was calibrated manually in this study. Then, PEST software was used to obtain more accurate results in the calibration. PEST software adjusts the parameters step by step according to its algorithm and the program execution is repeated using the local search method until the best parameter values are obtained. To run the model, daily data on flow, precipitation, temperature, and evaporation for years (2018-2022) were considered for calibration and validation. From this statistical period, the years 2018-2020 and 2020-2022 were considered for model recalibration and model evaluation, respectively. The efficiency of the model in the calibration and validation stage was evaluated using Nash-Sutcliffe evaluation indices, the mean squared error, and the bias model.

Results: After preparing the WetSpa model based on the daily data of discharge, precipitation, temperature, evaporation, and maps of land use, soil texture, and digital elevation map, the model was implemented for two periods of calibration and validation. Based on the Nash-Sutcliffe general criterion, the model showed daily hydrographs with an accuracy of more than 69.02 percent for the calibration period, and with an accuracy of 88.18 percent based on the adapted Nash-Sutcliffe criterion for maximum discharges. In the validation period, the model based on the general Nash-Sutcliffe criterion simulated daily hydrographs with an accuracy of more than 57.4 percent, and with an accuracy of 69.39 percent based on the adapted Nash-Sutcliffe criterion for maximum flow rates. Moreover, the model is more effective in estimating high flows than low flows, but overall, the model has simulated the total flow with acceptable accuracy. The model did not simulate the discharge well at some points during the validation stage, which could be due to the structure of the model, the field conditions, or the data. The response of the model to precipitation in the area is reasonable; thus, the lack of simulation in the specified areas can be caused by the conditions of the area or errors in the recorded data. The investigations carried out

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

Copyright ©2026. Dahmardeh Ghaleno. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

at the field level revealed that a diversion dam was built to extract water before the outlet hydrometric station, which caused the simulated flow rate to be higher than the observed amount, and this lack of accurate simulation is due to the construction of this dam. Furthermore, this shows that when the simulation results are not suitable, it is not related to the inefficiency of the model. **Conclusion:** The results of the evaluation indicators in the calibration and validation stage demonstrate that the model has the necessary efficiency to simulate the flow in the Sarbaz watershed. According to the investigations, most of the studies on the WetSpa model in humid and semi-humid conditions of most European countries have confirmed the appropriate use and efficiency of the model in these conditions. However, considering that a large part of our country has a dry and semi-arid climate, it is necessary to evaluate the effectiveness of this model in dry and semi-arid regions of the country. Because the climatic conditions of the Sarzab watershed are dry to semi-arid, the research results indicate that the WetSpa model has the necessary efficiency for hydrograph simulation in these climatic conditions.

Keywords: Calibration, Flow simulation, Validation, Sarzab watershed, WetSpa hydrological-distributed model

How to Cite This Article: Dahmardeh Ghaleno, M. R. (2026). Performance Evaluation of the WetSpa Hydrological Distributed Model for Runoff Simulation in the Sarbaz Watershed of Sistan and Baluchistan. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 125-137. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز سرباز سیستان و بلوچستان

محمدرضا دهمرده قلعه نو

دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران، (نویسنده مسوول: mr.dahmardeh@uoz.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶
صفحه: ۱۲۵ تا ۱۳۷

چکیده مبسوط

مقدمه: کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز همواره موردتوجه محققین منابع آب بوده است. این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل پیچیدگی بیشتر فرآیندهای هیدرولوژیکی در این مناطق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهره‌برداری و استفاده مطلوب از منابع آب و مدیریت بهینه آن مستلزم شناخت بهتر مدل‌های هیدرولوژیکی است. بارش و به‌دنبال آن تشکیل رواناب سطحی از فازهای مهم چرخه‌ی هیدرولوژیکی هستند. با توجه به شرایط موجود در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور از لحاظ کمبود آمار، پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم امکان شناخت کامل آن‌ها، استفاده از روش‌هایی که بتوانند با کمک آن‌ها میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار یا آمار ناقص تخمین زد از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. مدل‌های بارش – رواناب توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای داخل حوضه را دارند و ابزاری جهت تعیین رواناب و مطالعه فرایندهای هیدرولوژیکی هستند. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز سرباز سیستان و بلوچستان است.

مواد و روش‌ها: حوزه آبخیز سرباز با مساحت ۶۳۲۴/۲۹ کیلومتر مربع در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. دبی پایه رودخانه سرباز کم ولی دبی سیلابی آن حتی برای دوره‌های بازگشت پایین قابل‌توجه است. جهت شبیه‌سازی رواناب این حوضه از مدل WetSpa استفاده شد. WetSpa یک مدل توزیعی، پیوسته و فیزیکی با گام زمانی روزانه یا ساعتی است که فرآیندهای بارش، رواناب و تبخیر و تعرق را برای هر دو زمینه ساده و پیچیده شرح می‌دهد. این مدل ابتدا تعادل آب در زون ریشه را محاسبه می‌کند، چون این مهمترین بخش در نگهداشت آب است و همچنین این بخش کنترل کننده حجم رواناب سطحی و زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی است. WetSpa برای محاسبه رواناب از روش استدلالی اصلاح شده و برای تخمین رواناب ناشی از ذوب برف از روش ضریب روز- درجه استفاده می‌نماید. در این مطالعه، ابتدا مقادیر اولیه پارامترها تعیین و مدل به‌صورت دستی واسنجی شد. سپس از نرم‌افزار PEST جهت حصول نتایج دقیق‌تر در واسنجی استفاده گردید. نرم‌افزار PEST طبق الگوریتم موجود در خود به‌صورت مرحله به مرحله پارامترها را مطابقت می‌دهد و اجرای برنامه به‌روش جستجوی محلی تکرار می‌شود تا زمانی‌که بهترین مقدار پارامترها به‌دست آیند. برای اجرای مدل از داده‌های روزانه بارش، دما و تبخیر برای سال‌های آماری ۱۳۹۷-۱۴۰۱ استفاده گردید. از این دوره آماری، سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۷ برای واسنجی مدل و سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۹ برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شدند. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، از شاخص‌های ارزیابی نش- ساتکلیف، مجذور میانگین مربعات خطا و بیاس مدل استفاده شد.

یافته‌ها: پس از آماده‌سازی مدل WetSpa براساس داده‌های روزانه دبی، بارش، دما، تبخیر و نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک و نقشه رقومی ارتفاع، مدل برای دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتا خوبی را بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده به‌خصوص در دوره واسنجی در خروجی حوضه نشان دادند. مدل بر اساس معیار نش- ساتکلیف کلی، هیدروگراف‌های روزانه را با دقتی بیش از ۶۹/۰۲ درصد برای دوره واسنجی و بر اساس معیار تطبیق داده شده نش- ساتکلیف برای دبی‌های حداکثر با دقت ۸۸/۱۸ درصد را نشان داد. در دوره اعتبارسنجی نیز مدل براساس معیار نش- ساتکلیف کلی، هیدروگراف‌های روزانه را با دقتی بیش از ۵۷/۴ درصد و بر اساس معیار تطبیق داده شده نش- ساتکلیف برای دبی‌های حداکثر جریان را با دقتی برابر ۶۹/۳۹ درصد شبیه‌سازی کرد. مدل در برآورد جریان‌های بالا کاراتر از جریان‌های با دبی کم بود ولی در مجموع، مدل جریان کل را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کرد. مدل در مرحله اعتبارسنجی در برخی مقاطع دبی را به‌خوبی شبیه‌سازی نکرد که این موضوع می‌تواند ناشی از ساختار مدل، به شرایط حوزه و یا داده‌ها مربوط شود. نتایج نشان دادند که پاسخ مدل به بارش در حوزه منطقی بود. بنابر این، عدم شبیه‌سازی در نواحی مشخص شده می‌تواند ناشی از شرایط حوزه و یا اشکال در داده‌های ثبت شده باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته در سطح حوزه، قبل از ایستگاه هیدرومتری خروجی، کانال انتقال جهت استحصال آب احداث شده است که این امر سبب بیشتر شدن میزان دبی شبیه‌سازی شده از میزان مشاهداتی می‌شود که این عدم شبیه‌سازی دقیق ناشی از احداث همین بند می‌باشد و این نشان‌دهنده آن است که در مواردی که نتایج شبیه‌سازی مناسب نبوده است با عدم کارایی مدل ارتباطی ندارد.

نتیجه‌گیری: نتایج شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مشخص می‌کنند که مدل از کارایی لازم جهت شبیه‌سازی جریان در حوزه آبخیز سرباز برخوردار است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، اکثر مطالعات مربوط به مدل WetSpa در شرایط مرطوب و نیمه‌مرطوب بیشتر کشورهای اروپایی استفاده و کارایی مناسب مدل در این شرایط تایید شده است. اما با توجه به این‌که بخش عظیمی از کشور ما دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، ضروری است که کارایی این مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور نیز ارزیابی گردد. از آن جهت که شرایط اقلیمی حوزه آبخیز سرباز خشک تا نیمه‌خشک است، نتایج تحقیق حاکی از آن هستند که مدل WetSpa در این شرایط اقلیمی نیز از کارایی لازم جهت شبیه‌سازی هیدروگراف برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، حوزه آبخیز سرباز، شبیه‌سازی جریان، مدل هیدرولوژیکی–توزیعی WetSpa، واسنجی

مقدمه

بهره‌برداری و استفاده مطلوب از منابع آب و مدیریت بهینه آن مستلزم شناخت بهتر مدل‌های هیدرولوژیکی است. بارش و به‌دنبال آن تشکیل رواناب سطحی از فازهای مهم چرخه‌ی هیدرولوژیکی هستند (Goodarzi *et al.*, 2017). با توجه به شرایط موجود در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور از لحاظ کمبود آمار، پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم امکان شناخت کامل آن‌ها، استفاده از روش‌هایی که بتوانند با کمک آن‌ها میزان رواناب حاصل از بارندگی را درحوزه‌های آبخیز فاقد آمار یا آمار ناقص تخمین زد از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (Javidan *et al.*, 2018؛ Kiyani Majd *et al.*, 2023). به‌سبب پیامدهای ویرانگر و آسیب‌های بی‌شمار ناشی از رواناب و سیل و از سوی دیگر پیچیدگی و دشواری مسائل مربوط به فرایند بارش–رواناب، روش‌ها و مدل‌های

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

زیادی برای برآورد آن‌ها پیشنهاد شده‌اند (Dahmardeh Ghaleno *et al.,* 2020). مدل‌های بارش–رواناب توانایی شبیه‌سازی فرایندهای داخل حوضه را دارند و ابزاری جهت تعیین رواناب و مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند. مدل WetSpa یک مدل توزیعی، پیوسته و فیزیکی با گام زمانی روزانه یا ساعتی است که فرآیندهای بارش، رواناب و تبخیر و تعرق را برای هر دو زمینه ساده و پیچیده شرح می‌دهد. فرایندهای هیدرولوژیکی مدل شامل بارش، ذوب برف، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر وتعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب و ورودی‌های مدل شامل داده رقومی ارتفاعی، تیپ خاک، داده کاربری و سری‌های زمانی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند (Hosseinabadi *et al.*, 2017). لیو و د اسمت (Liu& De Smedt, 2005) مدل WetSpa را با گام زمانی یک ساعت در حوزه آبخیز کوچکی با مساحت مدل ۶۷/۸ کیلومترمربع در بلژیک اجرا نمودند. آنالیز آماری هیدروگراف‌های حاصل از مدل و هیدروگراف‌های مشاهده‌ای نشان داد که مدل به‌خوبی توانست جریان‌های عادی و سیلابی را پیش‌بینی کند. بهره‌مند و د اسمیت (Bahremand & De Smedt, 2008) در تحقیقی با عنوان مدل‌سازی هیدرولوژیکی توزیعی و آنالیز حساسیت در حوضه توریسا اسلواکی، تطابق خوبی بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در خروجی حوضه مشاهده شد. پیش‌بینی‌های دبی روزانه مدل با دقت خوب ۷۳٪ براساس معیار نش- ساتکلیف صورت گرفت. نتایج نشان دادند که فاکتور اصلاح تبخیر و تعرق واقعی و Kg (مقدار تبخیر از آب زیرزمینی) به ترتیب دارای بیشترین و کمترین حساسیت نسبی بودند. صفری و همکاران (Safari *et al.,* 2009) کاربرد مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را برای پروژه‌ای در آمریکا (DMIP1) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل از معیار یکپارچگی که نشان‌دهنده میزان اختلاف شکل، اندازه و حجم هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است، استفاده کردند. نتایج برای واسنجی پنج رودخانه حوضه، به جز رودخانه بلو، عالی تا خیلی‌خوب و برای کل دوره اعتبارسنجی، خوب تا خیلی‌خوب بودند، به این معنی که مدل توانست فرآیندهای هیدرولوژیکی را با دقت شبیه‌سازی کند. پورتا و همکاران (Porretta *et al.,* 2010) در تحقیقی به ارزیابی و تطبیق[2] مدل WetSpa در حوضه‌های روستایی (Wkra، Kamienna، Sidra) در لهستان پرداختند. مدل با استفاده از نرم‌افزار PEST به صورت خودکار واسنجی گردید، معیار نش-ساتکلیف کیفیت مطمئنی برای مدل‌سازی جریان‌های زیاد در دو حوزه Kamienna و Sidra نشان داد، اما کیفیت جریان‌های کم تایید نشد. مقادیر برای حوزه Wkra کیفیت خیلی‌خوب و خوب را تایید کردند. کبیر و همکاران (Kabir *et al.,* 2011) مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa را در حوضه گرگانرود با مساحت ۶۷۱۷ کیلومترمربع مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی را بین هیدروگراف‌های محاسبه شده و مشاهده‌ای نشان دادند و با توجه به معیار نش–ساتکلیف، مدل هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۷۱ تا ۷۷ درصد پیش‌بینی کرد. یعقوبی و بهره‌مند (Yaghoubi & Bahremand, 2011) در مطالعه‌ای جریان رودخانه را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان شبیه‌سازی نمودند. نتایج شبیه‌سازی مدل براساس معیار نش–ساتکلیف، هیدروگراف‌های روزانه را با دقت نسبتاً خوبی بیش از ۵۰ و ۵۷ درصد به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی برآورد کردند. آذین مهر و همکاران (Azinmehr *et al.,* 2013) در تحقیقی ضمن مرور مطالعات مختلف انجام شده در دنیا در زمینه شبیه‌سازی اثر تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف خروجی حوزه با استفاده از مدل WetSpa اشاره نمودند که پتانسیل مدل در رابطه با شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی در مطالعات لیو و د اسمت (Liu& De Smedt, 2005)، بهره‌مند و د اسمیت (Bahremand & De Smedt, 2008) و بهره‌مند و همکاران (Bahremand *et al.,* 2010) به‌دلیل عدم قطعیت پایین آن به اثبات رسید. توکلی و همکاران (Tavakoli *et al.,* 2014) تأثیرات تغییر اقلیم و رشد شهری را با استفاده از مدل WetSpa در حوزه آبخیز GroteNete در بلژیک بررسی کردند. نتایج نشان دادند که اثر هم زمان این دو عامل تاثیر زیادی در افزایش فراوانی سیلاب‌ها در زمستان و افزایش جریان‌های حد پایین را در تابستان داشت. آذین‌مهر و همکاران (Azinmehr *et al.,* 2015) در مطالعه دیگری با استفاده از مدل WetSpa اثر سناریوهای تغییر کاربری اراضی را بر هیدروگراف جریان حوزه آبخیز دینور کرخه شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان دادند که مدل توانست هیدروگراف روزانه را با ضریب نش- ساتکلیف ۶۶ درصد شبیه‌سازی نماید. همچنین با توجه به نتایج آنالیز عدم قطعیت مشخص گردید که مدل مجوز لازم برای شبیه‌سازی اثر سناریوهای تغییر کاربری را داشت. رحمتی و همکاران (Rahmati *et al.,* 2017) به ارزیابی مدل WetSpa در شبیه‌سازی بارش– رواناب حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی پرداختند. نتایج نشان دادند که شبیه‌سازی مدل WetSpa با استناد به مقدار ضریب نش–ساتکلیف ۰/۶۹ در دوره ارزیابی از دقت خوبی برخوردار است. ضرایب رواناب حاصل از مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بارش- رواناب دوره ارزیابی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۹ و ۰/۵۷ به‌دست آمدند که بیانگر کارایی مدل در تخمین رواناب حاصل از بارش در حوزه آبخیز مورد مطالعه بود. دهمرده قانلو (Dahmardeh Ghaleno, 2018) به شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز زیارت استان گلستان با استفاده از مدل WetSpa پرداخت. نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتاً خوبی بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده در خروجی حوضه نشان داد. مدل برای دوره واسنجی براساس معیار ناش-ساتکلیف، هیدروگراف‌های روزانه را با دقتی بیش از ۵۹ درصد و دبی‌های حداکثر را با دقت ۸۵ درصد برآورد نمود. نتایج نشان دادند که مدل WetSpa در برآورد جریان‌های بالا کاراتر از جریان‌های کم بود که این امر می‌تواند ناشی از ضعف ساختار مدل در برآورد جریان کم

1. Distributed Model Intercomparsion Project
2. Verification

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

باشد ولی در مجموع، مدل جریان کل را با دقت قابلی شبیه‌سازی کرد. محمدی و همکاران (Mohammady *et al.,* 2018) به بررسی اثرات تغییرکاربری اراضی بر پارامترهای رواناب پرداختند. در این مطالعه، نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۷ با استفاده ازروش‌های تلفیقی تهیه و نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۳۲ نیز با استفاده از مدل GLUE-S شبیه‌سازی شدند. در ادامه، از این نقشه‌های کاربری برای شبیه‌سازی رواناب با مدل WetSpa استفاده شد. مهمترین تغییرات کاربری اراضی طی این سال‌ها، تبدیل جنگل و مرتع به کشاورزی و انواع کاربری مسکونی بودند که به افزایش رواناب کل شبیه‌سازی شده منجر شد. کاویان و همکاران (Kavian *et al.,* 2020) با استفاده از مدل WetSpa و زنجیره مارکوف به پیش‌بینی اثرات تغییرات کاربری اراضی و فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز شهری پرداختند. نتایج نشان‌دهنده برخی اثرات منفی تغییرات کاربری اراضی مانند افزایش رواناب سطحی، دبی اوج و سرعت جریان دربازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۳۲، کاهش زمان تمرکز از ۶ ساعت در سال ۲۰۰۱ به ۵ ساعت در سال ۲۰۱۶ و ۴ ساعت در سال ۲۰۳۲ بودند. الماسی و همکاران (Almasi *et al.,* 2021) به بررسی ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مندرجان پرداختند. ضرایب ارزیابی نش-ساتکلیف برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۵۸ حاصل شدند و بیانگر این بودند که مدل WetSpa عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مندرجان داشت. شاهدی و فروتن دانش (Shahedi & Forotan Danesh, 2022)، شبیه‌سازی رواناب رودخانه در حوزه آبخیز قورچای را با استفاده از مدل WetSpa انجام دادند. نتایج ارزیابی مدل، صحت شبیه‌سازی دبی جریان و تطابق بسیار خوب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را براساس معیار نش-ساتکلیف ۰/۳۱ درصد در دوره واسنجی و ۰/۲۰ درصد در دوره اعتبارسنجی نشان دادند. همچنین، ضریب رواناب محاسبه شده توسط مدل وتسپا برای کل حوضه ۳۱/۲۱ درصد بود که در مقایسه با ضریب رواناب مشاهداتی۲۴/۱۳ درصد، شبیه‌سازی خوب مدل را نشان داد. آژان و همکاران (Azhan *et al.,* 2022) شبیه‌سازی هیدروگراف جریان رودخانه را با استفاده از مدل WetSpa-Python انجام دادند. ارزیابی مدل بر اساس شاخص کلینگ- گوپتا صورت گرفت که به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر۰/۶ و ۰/۵۳ به‌دست آمدند که تطابق قابل‌قبول بین هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان دادند. شریفی شاد و همکاران (Safari Shad *et al.,* 2023) به بررسی شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل WetSpa در حوزه آبخیز بهار همدان پرداختند. نتایج ارزیابی مدل در این تحقیق نشان دادند که ضرایب تبیین میان رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۸۳ بودند. نتایج ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق خروجی مدل WetSpa، قابلیت مدل را در شبیه‌سازی رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه آب زیرزمینی با دقت قابل‌قبول تایید کردند. تدمول و همکاران (Tade mule *et al.,* 2024) به شبیه‌سازی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از ترکیب مدل‌های WetSpa و MODFLOW پرداختند. در شبیه‌سازی که مدل wetspa انجام داد، مشخص شد که از کل بارش بلندمدت سالانه حدود ۷/۱ درصد سفره های آب زیرزمینی و ۵۱/۷ درصد را رواناب را تغذیه می‌کرد و ۴۱/۱ درصد نیز از طریق تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شد. این تحقیق نشان داد که مدل Wetspa از توانایی لازم برای شبیه‌سازی بیلان آبی برخوردار بود.

به‌طور کلی، مطالعات مختلف انجام گرفته در کشورهای مختلف از جمله لوگزامبرگ، بلژیک، اسلواکی، مجارستان، تانزانیا، تایلند، لهستان و ایران بیانگر این هستند که مدل WetSpa در نواحی مختلف با توپوگرافی‌های کاملاً متنوع و همچنین در حوضه‌های کوچک تا خیلی بزرگ به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان اعم از سیل و یا جریان روزانه رودخانه است. با این‌حال، اکثر این حوضه‌ها در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب واقع شده‌اند که مدل در این نواحی شبیه‌سازی خوبی را انجام داده است و مطالعات بسیار محدودی از کارایی این در مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت گرفته است. از طرفی، با توجه به محدودیت آمار و اطلاعات در حوزه‌های آبخیزی که کمتر موردتوجه و مطالعه قرار گرفته‌اند، مانند اکثر حوزه‌های آبخیز استان سیستان و بلوچستان، لازم است تا اجرای مدل در پایه‌های زمانی کوتاه‌تر نیز مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. در تحقیقات مشابه در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب، اجرای مدل WetSpa در دوره‌های زمانی دو و سه‌ساله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی جریان رودخانه سرباز است که تنها رودخانه دائمی در منطقه بلوچستان است، اطلاعات آماری آن محدود است و در یک حوضه خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد تا کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک با پایه‌های زمانی محدود مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

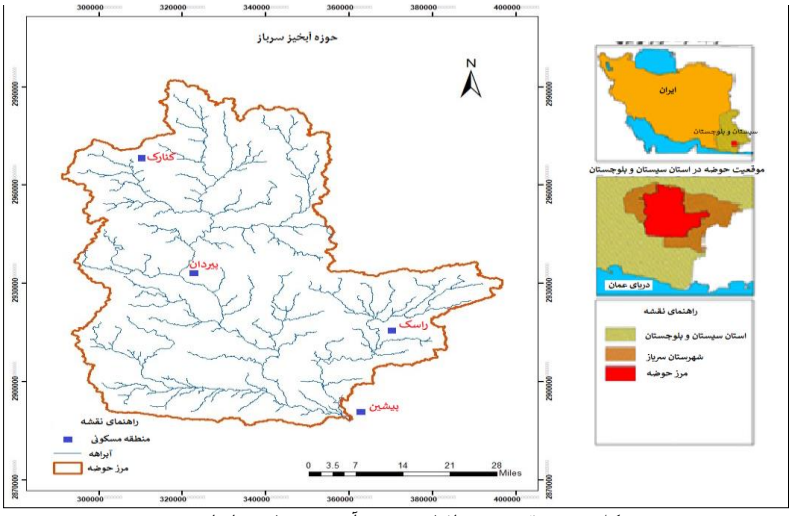
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

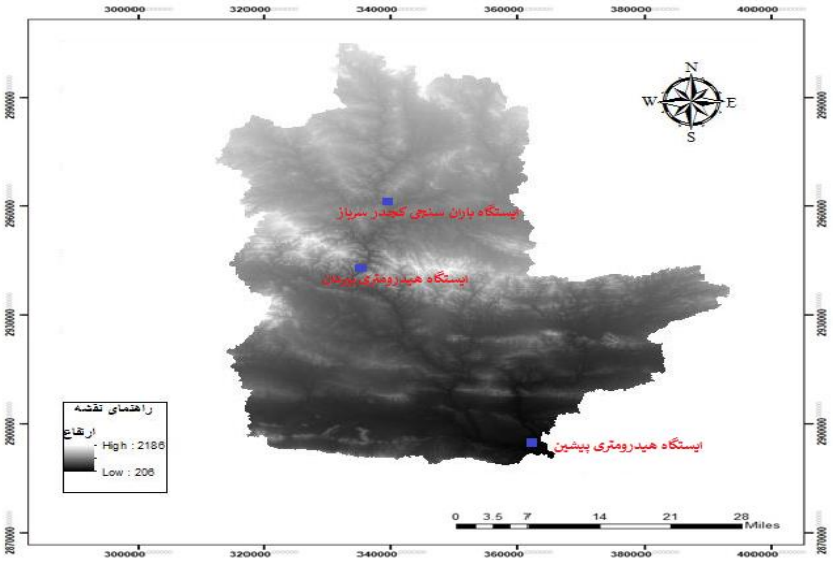
حوزه آبخیز سرباز در جنوب شرق ایران و محدوده َ۵۶ °۶۰ تا َ۳۵ °۶۱ طول شرقی و ° ۲۶ تا َ۰۵ °۲۷ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). از شرق به کشور پاکستان، از جنوب به باهوکلات و دشتیاری، از غرب به حوزه آبریز کاجو و از شمال به سلسله کوه‌های مکران محدود می‌گردد. این حوضه در بالادست ایستگاه هیدرومتری پیشین قرار دارد. مساحت این حوضه ۶۳۲۴/۲۹ کیلومترمربع و شیب متوسط آن ۱۶/۸۳ درصد است. رودخانه سرباز پرآب‌ترین رودخانه بلوچستان است که پس از مشروب ساختن نواحی سرباز، باهوکلات، پیشین و دشتیاری به خلیج گواتر در دریای عمان می‌ریزد. رودخانه سرباز تنها رودخانه دائمی در بلوچستان است که اراضی ساحلی را مشروب می‌کند. دبی رودخانه سرباز بیشتر از نواحی شمال حوزه متأثر است؛ دبی پایه رودخانه سرباز کم ولی دبی سیلابی آن حتی برای دوره‌های بازگشت پایین قابل توجه است. شکل ۲ مدل رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز سرباز که از نقشه‌های توپوگرافی حاصل شده است را نشان می‌دهد. در این تحقیق نقشه مدل

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

رقومی ارتفاع از روی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با دقت ۳۰ متر تهیه شده است. با توجه به شکل ۲، بالاترین و پایین‌ترین نقاط ارتفاعی حوضه به‌ترتیب ۲۱۸۶ و ۲۰۶ متر هستند. در حوزه آبخیز موردنظر، سه ایستگاه هواشناسی شامل ایستگاه هیدرومتری پیشین، ایستگاه هیدرومتری پیردان و ایستگاه باران‌سنجی کجدر سرباز وجود دارند.



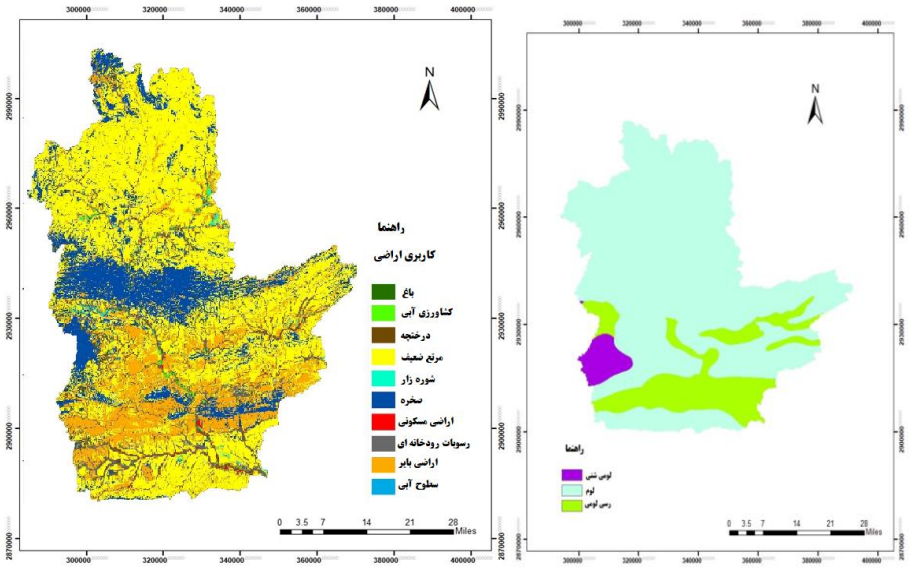
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سرباز در ایران
Figure 1. The geographical location of the Sarbaz Watershed in Iran



شکل ۲- نقشه مدل رقومی ارتفاع حوزه آبخیز سرباز
Figure 2. The digital elevation model map of the Sarbaz watershed

شکل (۳) نقشه کاربری اراضی و بافت خاک حوزه آبخیز سرباز را نشان می‌دهد. در جدول (۱) نیز مشخصات کاربری اراضی حوضه ارائه شده است. با توجه به جدول (۱)، در حوزه آبخیز سرباز هشت طبقه کاربری اراضی شامل باغ، کشاورزی آبی، درختچه، مرتع ضعیف، شوره‌زار، صخره، اراضی مسکونی، رسوبات رودخانه‌ای، اراضی بایر و سطوح آبی وجود دارند. از بین کاربری‌های ذکر شده، بیشترین مساحت کاربری را مراتع ضعیف با ۵۵/۰۴ درصد و کمترین کاربری را سطوح آبی با ۰/۰۱ درصد به‌خود اختصاص داده‌اند. در جدول (۲)، مشخصات بافت خاک حوزه آبخیز سرباز آورده شده است. بر اساس جدول (۲)، بافت لوم با ۷۲/۵۵ درصد و بافت خاک لومی- شنی با ۶/۰۲ درصد به‌ترتیب بیشترین و کمترین درصد مساحت حوضه را به‌خود اختصاص داده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی (سمت چپ) و نقشه بافت خاک (سمت راست) حوزه آبخیز سرباز
Figure 3. The land use map and soil texture of the Sarbaz watershed

جدول ۱- مشخصات کاربری اراضی حوزه آبخیز سرباز
Table 1. Characteristics of land use in the Sarbaz Watershed

ردیف Row	کاربری اراضی Land use	مساحت (کیلومتر مربع) Area (km^2)	درصد (٪)
1	باغ Garden	4.98	0.07
2	کشاورزی آبی Rainy agricultural Lands	38.37	0.61
3	درختچه Shrub	205.56	3.27
4	مرتع ضعیف Poor pasture	3418.32	54.05
5	شوره زار Dandruff	30.29	0.48
6	اراضی مسکونی Residential Lands	21.62	0.34
7	رسوبات رودخانه‌ای River sediments	401.37	6.35
8	اراضی بایر Barren Lands	1099.49	17.39
9	سطوح آبی Blue Surfaces	0.71	0.01

جدول ۲- مشخصات بافت خاک حوزه آبخیز سرباز
Table 2. Characteristics of the soil texture in the Sarbaz watershed

نوع بافت خاک Type of Soil Texture	گروه هیدرولوژیکی Hydrological Group	درصد (٪)
لوم LOAM	D	72.55
رسی لومی CLAY -LOAM	C	21.43
لومی شنی SANDY -LOAM	B	6.02

مدل Wetspa

مدل Wetspa اولین بار توسط وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 1996) در حوزه آبخیز ترکلپ- مولنبیک در بلژیک اجرا و سپس توسط د اسمت و همکاران (De Smedt *et al.*, 2000) و لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2002) توسعه پیدا کرد. WetSpa یک مدل توزیعی، پیوسته و فیزیکی با گام زمانی روزانه یا ساعتی است که فرآیندهای بارش، رواناب و تبخیر و تعرق را برای هر دو زمینه ساده و پیچیده شرح می‌دهد (Dahmardeh Ghaleno, 2018). در مدل WetSpa برای هر شبکه سلولی، چهار لایه در جهت عمودی در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از لایه تاج پوشش، زون ریشه، زون انتقال و زون اشباع. مدل WetSpa ابتدا تعادل آب در زون ریشه را محاسبه می‌کند، چون این مهمترین بخش در نگهداشت آب است و همچنین این بخش کنترل کننده حجم رواناب سطحی و زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی است. رابطه (۱) تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی را نشان می‌دهد (Liu & De Smedt, 2004).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

$$D\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = P - I - V - E - R - F \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن D عمق ریشه (متر)، $\Delta\theta$ تغییرات رطوبتی خاک (مترمکعب برمترمکعب)، Δt گام زمانی (ساعت/روز)، P بارش (متربرساعت/روز)، $I = I_a + D_a$ تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی (Ia) و ذخیره چالابی (Da) در گام زمانی (متربرساعت/روز)، V رواناب سطحی یا بارش مازاد (متربرساعت/روز)، E تبخیر و تعرق (متربرساعت/روز)، R میزان نفوذ عمقی از زون ریشه (متربرساعت/روز) و F میزان جریان زیر سطحی در زمان (متربرساعت/روز) هستند.

مدل برای محاسبه رواناب از روش استدلالی اصلاح شده و برای تخمین رواناب ناشی از ذوب برف از روش ضریب روز- درجه استفاده می‌نماید. جریان زیرسطحی بر مبنای قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. جریان آب زیرزمینی با استفاده از روش مخزن خطی تعیین می‌گردد. رواناب در طول مسیر جریان با استفاده از روش معادلات موج پخشی روندیابی می‌گردد که وابسته به شیب، سرعت و خصوصیات مسیر جریان است. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه‌ای در طول مسیر جریان توسط روش تقریب موج پخشی معادله سنت ونانت انجام می‌شود که وابسته به شیب، سرعت و خصوصیات مسیر جریان است و براساس رابطه (۲) بدست می‌آید (Yaghoubi & Bahremand, 2011).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} - d\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = 0 \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه بالا، Q دبی (متر مکعب بر ثانیه)، t زمان (روز)، X مسافت در جهت جریان (متر)، و C سرعت موج سینماتیکی در سلول (پیکسل) هستند و از رابطه (۳) به‌دست می‌آید، در اینجا، V سرعت جریان (متر بر ثانیه) و d ضریب پخش در سلول است که از رابطه (۴) برآورد می‌شود که در آن R شعاع هیدرولیکی یا متوسط عمق جریان (متر) و S0 شیب کف آبراهه است و فرض بر این است که در مسیر ثابت می‌ماند. این دو پارامتر بستگی به سرعت و عمق دارند. برای محاسبه میزان دبی در انتهای مسیر جریان از رابطه (۵)، به‌عنوان یک تابع پاسخ خطی سنت ونانت استفاده می‌گردد (De Smedt *et al.*, 2000).

$$C = (5/3) \times v \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

$$d = \left(\frac{VR}{2S_0}\right) \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\sigma = \sqrt{\int \frac{2d}{c^3}\,dx} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

با در نظر گرفتن یک سیستم محدود بین دو سطح مقطع بالا دست و پایین دست، راه‌حل معادله (۲) در خروجی سلول را می‌توان با استفاده از تابع چگالی احتمال معکوس گوس به‌صورت رابطه (۶) بیان نمود (Zeinivand, 2009).

$$U(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t^3/{t_0}^3}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\frac{2\sigma^2 t}{t_0}}\right] \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن $U(t)$ تابع پاسخ مسیر جریان برای تعیین هیدروگراف لحظه‌ای جریان به‌کار می‌رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوضه را ممکن می‌سازد. t_0 زمان پیماش جریان (T)، σانحراف استاندارد زمان جریان است. در نهایت، هیدروگراف‌های مستقیم جریان در خروجی حوضه یا در هر نقطه پایین‌دست که جریان به هم می‌پیوندد از رابطه (۷) (رابطه حلقه‌ای جریان) محاسبه می‌گردند.

$$Q(t) = \int A \int_0^{\tau} V(\tau)U(T-\tau)\,d\tau\,dA \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن Q(t) میزان دبی خروجی، U تابع پاسخ مسیر جریان، τ تاخیر زمانی و V حجم رواناب خروجی هستند.

در مدل Wetspa، کلیه فرآیندهای هیدرولوژیکی در محیط GIS شبیه‌سازی می‌شوند و برنامه موردنیاز برای اجرای مدل، Arcview 3.2 GIS است. فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل شامل بارش، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، جریان سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان اشباع و بیلان آب و ورودی‌های مدل شامل داده رقومی ارتفاعی، تیپ خاک، داده کاربری اراضی و سری‌های زمانی بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند. به‌منظور فراهم نمودن فرآیند واسنجی در مدل WetSp، ۱۱ پارامتر قراردادی وجود دارند؛ این پارامترها فیزیکی هستند و بر هیدروگراف خروجی حوزه آبخیز تاثیر فراوانی می‌گذارند. مشخص کردن مقادیر دقیق برای این پارامترها در مقیاس شبکه سلولی بسیار دشوار است؛ بنابر این، واسنجی این پارامترها در برابر داده‌های رواناب مشاهده‌ای برای کسب نتایج بهتر در مدل، لازم و ضروری است. در این مطالعه، ابتدا مقادیر اولیه پارامترها تعیین و مدل به‌صورت دستی واسنجی شد. سپس، از نرم‌افزار PEST جهت حصول نتایج دقیق‌تر در واسنجی استفاده گردید. نرم‌افزار PEST طبق الگوریتم موجود در خود به‌صورت مرحله به مرحله پارامترها را مطابقت می‌دهد و اجرای برنامه به‌روش جستجوی محلی تکرار می‌شود تا زمانی‌که بهترین مقدار پارامترها به‌دست آید. در این نرم‌افزار که روشی برای تخمین غیرخطی پارامترها است، مقادیر بهینه پارامترها از طریق به حداقل رساندن اختلاف مجموع مربعات دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی تعیین می‌گردند (Bahremand & De Smed, 2010).

با توجه به محدودیت داده‌ها و اطلاعات در حوزه آبخیز مورد مطالعه و از طرفی با توجه به این که یکی از اهداف تحقیق نیز ارزیابی اجرای مدل در پایه‌های زمانی کوتاه‌تر است، در این تحقیق از داده‌های روزانه دبی، بارش، دما و تبخیر سال‌های آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹-۱۳۹۸ برای واسنجی و از داده‌های سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. همچنین، از داده‌های سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ برای دوره گرم‌کردن مدل (Warm Up) جهت کاهش خطاهای مربوط به شرایط اولیه و نقص مدل، استفاده گردید و در انتها نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات مشاهده‌ای به‌صورت آماری و گرافیکی مقایسه گردیدند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

معیارهای کارایی و ارزیابی مدل

جهت مقایسه کمی کارایی مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از معیارهای ارزیابی استفاده گردید. این معیارها به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند (Liu & De Smedt, 2004).

خطا (بیاس) مدل

خطای مدل را می‌توان به‌صورت تفاوت میانگین نسبی بین جریان مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در یک شبیه‌سازی بزرگ بیان نمود. این معیار به‌صورت رابطه (۸) بیان می‌گردد.

$$MB = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(QS_i - Qo_i)}{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i)}\right] \quad \text{(رابطه ۸)}$$

MB بیاس مدل، Qsi و Qoi به‌ترتیب جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در گام زمانی ام (مترمکعب بر ثانیه) و N تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی هستند. مقادیر MB پایین نشان‌دهنده برازش بهتر و میزان صفر نمایانگر شبیه‌سازی کامل میزان جریان مشاهده‌ای هستند.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

این معیار نشان دهنده تفاوت مقدار پیش‌بینی و مشاهده شده در مدل و به شرح رابطه (۹) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(XO - XS)^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

XO و XS به‌ترتیب دبی مشاهده و دبی شبیه‌سازی شده، و N تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی هستند. هر چقدر این مقدار کمتر باشد نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و برای آن حدود خاصی بیان نگردیده است.

ضریب نش-ساتکلیف[3]

این ضریب نشان می‌دهد که دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند؛ معادله آن به شرح رابطه (۱۰) است.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_{oi} - \overline{Q_o})^2} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

NS شاخص کارایی نش– ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان آبراهه به‌کار می‌رود، مقدارNS از یک مقدار منفی تا ۱ در تغییر است و زمانی که میزان آن ۱ باشد، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است.

معیار کارایی نش- ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان‌های کم[4]

معیار نش- ساتکلیف لگاریتمی در رابطه (۱۱) ارائه شده است که تاکید آن بر ارزیابی شبیه‌سازی جریان‌های کم است.

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}[\ln(Qs_i) - \ln(Qo_i)]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left[\ln(Qo_i) - \overline{\ln(Qo_i)}\right]^2} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

NSL ضریب کارایی نش–ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی دبی‌های پایین است. در یک شبیه‌سازی کامل، میزان NSL برابر با یک خواهد بود.

معیار کارایی نش– ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان‌های زیاد[5]

معیار نش- ساتکلیف در رابطه (۱۲) ارائه شده است که برای ارزیابی توانایی شبیه‌سازی جریان‌های زیاد به‌کار می‌رود. برای میزان تطابق کامل شبیه‌سازی با مشاهده‌ای، میزان ضریب NSH برابر با یک است.

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i + \overline{Qo})(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Qo_i + \overline{Qo})(Qo_i - \overline{Qo_i})^2} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

نتایج و بحث

جهت ارزیابی میزان کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی، مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده لازم و ضروری است. بعد از اجرای اولیه مدل و مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، مقادیر پارامترهای عمومی تغییر داده می‌شود تا جایی که تطابق مناسبی بین هیدروگراف‌ها ایجاد گردد. جدول (۳) مقادیر واسنجی شده پارامترها را با استفاده از نرم‌افزار PEST نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای واسنجی شده نسبت به مقادیر اولیه ممکن است تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته باشند که این نیز بر میزان عملکرد مدل در شبیه‌سازی تاثیر فراونی دارد. دلیل این موضوع غیر خطی بودن ساختار مدل و عدم غیر قطعیت پارامترهای آن است. بحث غیر خطی بودن مدل‌ها یکی از مشکلات مدل‌های توزیعی در هیدرولوژی است. مشکل عدم قطعیت فرآیند مدل‌سازی به داده‌های ورودی نظیر تغییرپذیری مکانی و زمانی پارامترها، شرایط اولیه و شرایط مرزی، فرضیات مدل و الگوریتم‌های به‌کار رفته در توصیف فرآیندها و اندازه‌گیری‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مربوط می‌شود بهره‌مند و د اسمت (Bahremand & De Smedt, 2010). برای اجرای مدل WetSpa در منطقه مورد مطالعه در هر مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، از یک دوره دو ساله آماری استفاده گردید. با توجه به محدودیت آماری در منطقه مورد مطالعه و از طرفی تحقیقات مشابه در مناطق مرطوب تا نیمه‌مرطوب با دوره آماری کوتاه مدت انجام و نتایج قابل قبول دریافت شدند. برای مثال، مطالعه دهمرده قالنو (Dahmardeh Ghaleno, 2018) که از سال‌های آماری ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa استفاده نمود و کارا بودن مدل مورد تأیید قرار گرفت و همچنین تحقیقات یعقوبی و بهره‌مند (Yaghoubi & Bahremand, 2011) که از سال‌های آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ برای ارزیابی کارایی مدل استفاده نمودند و نشان دادند که مدل از توانایی لازم برای شبیه‌سازی رواناب برخوردار بود. صفری و همکاران (Safari *et al.,* 2022) شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی را با استفاده از مدل WetSpa برای دوره دو ساله آماری یعنی سال‌های آماری ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ برای مرحله واسنجی و سال آماری ۹۲ برای مرحله اعتبارسنجی استفاده نمودند و نتایج قابل قبول برای مدل ارائه شدند. همچنین، رحمتی و همکاران (Rahmati *et al.,* 2017) از یک دوره تقریباً چهارساله از سال‌های آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۷ برای ارزیابی مدل WetSpa استفاده نمودند و نتایج قابل‌قبولی نیز

3. Nash-Satcliffe
4. Nash-Satcliffe Low
5. Nash- Satcliffe High

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

به‌دست آوردند. در این تحقیق، از یک دوره آماری کوتاه‌مدت ولی برای یک منطقه خشک تا نیمه‌خشک برای ارزیابی مدل WetSpa استفاده گردید. نتایج ارزیابی مدل با استفاده از شاخص‌های ارزیابی در جدول (۴) آورده شده‌اند. با توجه به جدول (۴)، نتایج بررسی معیارهای ارزیابی نشان می‌دهند که مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نتایج قابل‌قبولی را ارائه کرده است. شکل (۴) مقایسه گرافیکی نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف مشاهده‌ای در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد. مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل‌ها را فراهم می‌نماید. مشاهده چشمی شکل (۴) و همچنین نتایج جدول (۴) نشان می‌دهند که مدل در برآورد جریان‌های بالاتر از دقت بیشتری نسبت به جریان‌های کمتر برخوردار است. مطالعات لیو و د اسمت (Liu & De Smedt, 2005)، بهره‌مند و همکاران (Bahremand *et al.*, 2005)، دهمرده قالنو (Dahmardeh Ghaleno, 2018) و شاهدی و فروتن دانش (& Shahedi Forotan Danesh, 2022) نیز نشان دادند که مدل در برآورد دبی‌های بالاتر دقت بیشتری دارد. ولی در مجموع هم در تحقیقات ذکر شده و هم در این مطالعه، مدل WetSpa جریان کل را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی نموده است.

جدول ۳- مقادیر واسنجی‌شده پارامترهای عمومی مدل Wetspa در حوزه آبخیز سرباز

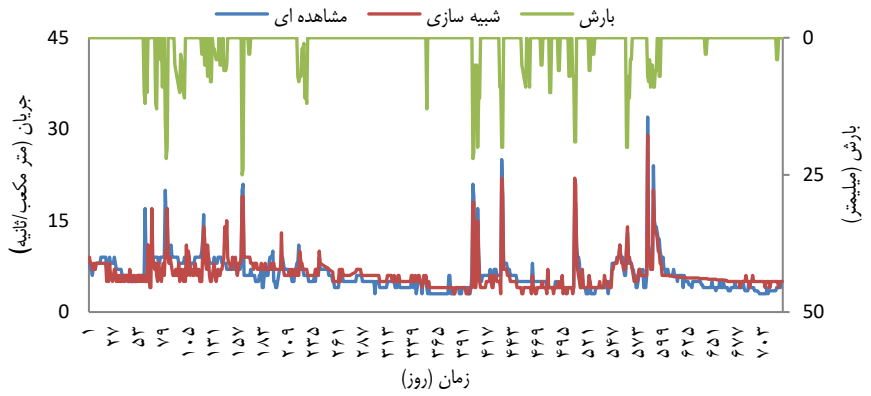
Table 3. Calibrated values of the general parameters of the Wetspa model in the Sarbaz Watershed

مقدار واسنجی شده Calibrated value	واحد Unit	علامت Symbol	پارامتر Parameter
1.18	(-)	K_i	فاکتور جریان زیر سطحی Interflow scaling factor
0.0087	(h^{-1})	K_g	ضریب افت آب زیر زمینی Groundwater recession coefficient
0.84	(mm)	K_{ss}	رطوبت اولیه خاک Initial soil moisture
1.073	(-)	K_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل Correction factor for PET
67.32	(mm)	G_0	ذخیره آب زیر زمینی اولیه Initial groundwater storage
419.25	(mm)	G_{max}	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی Groundwater storage scaling factor
0.63	(°C)	T_0	ضریب درجه حرارت آستانه Threshold temperature coefficient
0.325	(mm/°C/day)	K_{snow}	ضریب درجه روز دما Degree day temperature coefficient
0.069	(mm/mm/°C/day)	K_{rain}	ضریب روز درجه بارش Rainfall degree day coefficient
2.64	(-)	K_{run}	توان رواناب سطحی Surface runoff capacity
128.6	(mm)	P_{max}	حداکثر شدت بارش Rainfall intensity scaling factor

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

Table 4. Values for model efficiency criteria during calibration and validation periods

اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	معیار کارایی Performance criteria
-0.065	-0.089	خطای مدل برای تعادل حجم جریان (بیلان) Model Bias for Flow Volume Balance (Balance)
55.31	65.77	RMSE
57.4	69.02	ضریب نش – ساتکلیف کلی (درصد) Overall Nash-Sutcliffe Coefficient (Percentage)
69.39	88.18	ضریب نش – ساتکلیف برای جریان های بالا(درصد) Nash-Sutcliffe Coefficient for High Flows (Percentage)
44.1	50.26	ضریب نش – ساتکلیف برای جریان های کم(درصد) Nash-Sutcliffe Coefficient for Low Flows (Percentage)



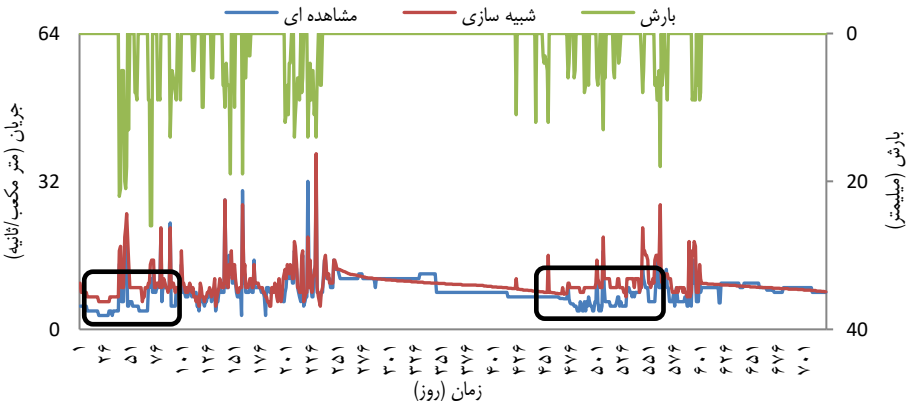
شکل ۴- مقایسه بین جریان‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره واسنجی حوزه آبخیز سرباز

Figure 4. A comparison between the observed and simulated daily flows for the calibration period in the Sarzab watershed

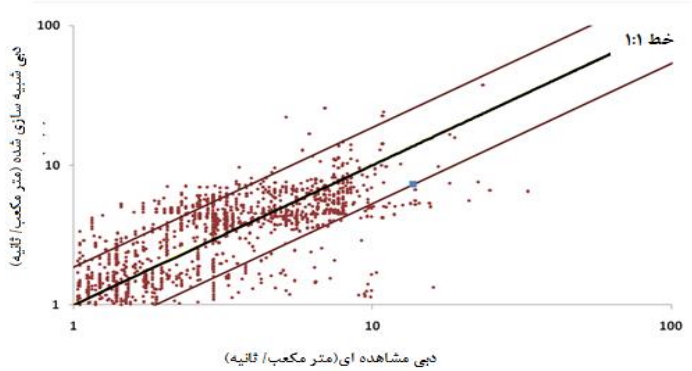
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

شکل (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دوره اعتبارسنجی در مقایسه با داده‌های دبی مشاهداتی را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل (۵) ملاحظه می‌شود، مدل WetSpa رواناب را در دوره اعتبارسنجی به جز مواردی که با شکل مربع نشان داده شده است، به‌خوبی شبیه‌سازی نموده است. عدم شبیه‌سازی مناسب در ابتدای مرحله شبیه‌سازی را می‌توان به‌دلیل کوتاه بودن دوره گرم کردن مدل بیان کرد. جدول (۴) نیز نشان می‌دهد که ضرایب نش- ساتکلیف در مرحله اعتبارسنجی مقادیر کمتری را نسبت به مرحله واسنجی به خود اختصاص داده است ولی ضریب کلی نش- ساتکلیف در این مرحله قابل قبول است که با تحقیقات دهمرده قالنو (Dahmardeh Ghaleno, 2018)، الماسی و همکاران (Almasi *et al.*, 2021) و شاهدی و فروتن دانش (Shahedi &Forotan Danesh, 2022) همخوانی دارد. در حالت کلی، نتایج واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهند که پاسخ مدل به بارش در حوضه منطقی است. عدم شبیه‌سازی در نواحی مشخص شده می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله وجود مخزن یا سد و هرگونه برداشت آب در سطح حوضه، عدم ثبت بارش متناسب در حوضه مورد مطالعه و اشکال در برداشت داده‌های دبی باشد هر چند که مطالعاتی مانند دهمرده قالنو (Dahmardeh Ghaleno, 2018)، شادمان ظفر و همکاران (Shademan Zafar *et al.*, 2019) عدم شبیه‌سازی مناسب دبی‌های پایین در مدل WetSpa را به ساختار مدل نسبت داده‌اند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در حوضه مورد مطالعه، در سال ۱۳۹۹ قبل از ایستگاه هیدرومتری خروجی، بند انحرافی موقتی جهت استحصال آب احداث شد. به‌همین دلیل، مدل WetSpa میزان دبی شبیه‌سازی شده را بیشتر از میزان مشاهداتی برآورد کرد. بررسی ایستگاه هیدرومتری خروجی نشان داد که مقطع برداشت جهت اندازه‌گیری دبی در طی این سال‌ها هیچ‌گونه تغییری نداشت. پس استفاده از نمودار دبی-اشل بدون اشکال بوده است و داده‌های برداشت شده صحیح هستند. میزان بارش در طی دو سال ارزیابی ۲۷ درصد نسبت به دو سال واسنجی افزایش داشت و تبخیر تقریباً یکی است در حالی‌که رواناب ۱۷ درصد کاهش داشت. این کاهش نیز برداشت در حوضه را کاملاً ثابت می‌کند و نشان می‌دهد که در مواردی که نتایج شبیه‌سازی مناسب نبود با عدم کارایی مدل ارتباطی نداشت و ناشی از برداشت آب از سطح حوضه قبل از ایستگاه هیدرومتری بود. شکل (۶) پراکنش ابر نقاط لگاریتمی جریان مشاهده‌ای را در مقابل جریان محاسبه شده را با حدود اطمینان ۹۵ درصد، برای دوره ارزیابی مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، دبی‌های شبیه‌سازی شده اطراف خط ۱:۱ و در محدوده ۹۵ درصد واقع شده‌اند و این نشان از کارایی و شبیه‌سازی خوب مدل دارد.



شکل ۵- مقایسه بین جریان‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه برای دوره اعتبارسنجی حوزه آبخیز سرباز
Figure 5. A comparison between the observed and simulated daily flows for the validation period in the Sarzab watershed



شکل ۶- نمایش لگاریتمی ابر نقاط جریان مشاهده‌ای در مقابل جریان شبیه‌سازی برای دوره ارزیابی با اطمینان ۹۵ درصد
Figure 6. Logarithmic representation of cloud points of observation flow versus simulation flow for the evaluation period with 95% confidence

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

نتیجه‌گیری کلی

نتایج بررسی این تحقیق و مرور مطالعات دیگران نشان می‌دهند که مدل به‌خوبی قادر به اداره فرایندهای هیدرولوژیکی در شرایط گوناگون اقلیمی، توپوگرافی، خاک، کاربری و مساحت است و در این زمینه از توانایی لازم برخوردار است. با توجه به شرایط خاص حوزه آبخیز سرباز که در یک منطقه خشک تا نیمه‌خشک واقع گردیده است و از طرفی در این تحقیق از یک دوره آماری کوتاه جهت شبیه‌سازی رواناب استفاده شد، نتایج نشان می‌دهند که مدل WetSpa از توانایی لازم جهت شبیه‌سازی رواناب در مناطق خشک تا نیمه‌خشک با یک دوره آماری کوتاه برخوردار است. در این تحقیق، در بعضی از گام‌های زمانی در مرحله اعتبارسنجی در برابر وقایع بارش رخ داده در حوضه، عکس‌العمل سیلاب مشاهده نشد ولی به‌وسیله مدل شبیه‌سازی انجام گردید. پس از بررسی در منطقه، مشخص گردید که در همان دوره‌های زمانی، برداشت آب قبل از ایستگاه هیدرومتری در حوضه اتفاق افتاده بود. این نیز نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی رواناب منتاظر با بارش از توانایی لازم برخوردار است. این قابلیت مدل WetSpa که امکان شبیه‌سازی رواناب در تمام شبکه سلولی حوضه را دارد شرایطی را برای مدیران و برنامه‌ریزان فراهم می‌نماید که قبل از انجام هرگونه عملیات اجرایی، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی نمایند.

تشکر و قدردانی

این مقاله تحت حمایت مالی دانشگاه زابل با کد گرنت UOZ-GR-5059 انجام شده است.

References

Almasi, P., Moghaddam nia, A., Khalighi Sigaroodi, S., Salajegheh., A & Soltani Kopaei. (2021). Performance Evaluation of WetSpa Hydrological Model for Runoff Simulation in Semi-Arid Climatic Conditions (Case Study: Menderjan Basin), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 469-482. https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.315031.668827. [In Persian]

Azhan, M., Bahremand, A., Sheikh, V., Bairam Komaki, Ch., & Mohammadrezai, M. (2022). Simulation of Stream Flow Hydrographs Using Flexible Distributed Hydrological Modelling (WetSpa-Python). *Iran-Water Resources Research,* 17(4), 242-251. 20.1001.1.17352347.1400.17.4.15.2. [In Persian]

Azinmehr, M., Bahremand, A & Kabir, A. (2013). Sensitivity Analysis of Effective Parameters in Flow Hydrograph Simulation using WetSpa Spatial Distribution Hydrological Model in Dinur Watershed Upstream of Karkheh Dam, 6th National Conference on Watershed Management and Water and soil Resources Management Kerman, Iran. [In Persian]

Azinmehr, M., Bahremand, A., & Kabir, A. (2015). Simulating the effects of landuse change scenarios on flow hydrograph using the spatially distributed hydrological model, WetSpa, in the Dinvar Watershed, Karkheh, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 7(4), 500-510. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.103137. [In Persian]

Bahremand A & De Smedt, F. (2010). Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model. *Water Resources Management*, 24, 2869-2880. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9584-1

Bahremand, A., Corluy, J., Liu, Y.B & De Smedt, F. (2005). Stream Flowsimulation by WetSpa Model in Hornad River Basin, Slovakia, floods, fromDefence to management edited by van Alphen, j., van Beek, E., and Taal, M.,Taylor- Francis Group, London. 67-74.

Bahremand., A & De Smedt, F. (2008). Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia, *Water Resources Management*, 22(3), 393-408. https://doi.org/10.1007/s11269-007-9168-x

Dahmardeh Ghaleno, M.R. (2018). Runoff Simulation using WetSpa Distributed Hydrological Model in Ziarat Watershed of Golestan Province, Iran. *Ecopersia*, 6(1), 11-20. http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-13237-en.html. [In Persian]

Dahmardeh Ghaleno, M.R., Meshram, S.G. & Alvandi, E. (2020). Pragmatic Approach for Prioritization of Flood and Sedimentation Hazard Potential of Watersheds. *Soft Computing*, 24, 15701–15714. https://doi.org/10.1007/s00500-020-04899-4. [In Persian]

De Smedt, F., Liu, Y.B & Gebremeskel, S. (2000). Hydrologic Modelling on a Catchment Scale using GIS and Remote Sensed Land use Information. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 45. https://doi.org/10.2495/RISK000281

Goodarzi, M., Hoseini, M., & Parekar, M. (2017). Evaluation of Statistical Downscaling Method in Simulation of Climate Change of Karkheh Basin up to the Karkheh Dam. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 10(35), 51-64. http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1395.10.35.9.2. [In Persian]

Javidan, N., Bahremand, A., javidan, R., Onagh, M. & Komaki, C.B. (2018). Impacts of Land use Changes Scenarios on Water Balance Components using WetSpa Model (Case Study: Ziarat Watershed of Golestan Province). *Journal of Watershed Management Research*, *9*(17), 168-181. https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.168. [In Persian]

Kabir, A. Mahdavi, M. Bahremand, A & Noora, N. (2011). Application of a Geographical Information System (GIS) Based Hydrological Model for Flow Prediction in Gorganrood River Basin, Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 6(1), 35-45. https://doi.org/10.5897/AJAR10

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]

Kavian, A., Javidan, N., Bahrehmand, A., Gyasi-Agyei, Y., Hazbavi, Z., & Rodrigo-Comino, J. (2020). Assessing the hydrological effects of land-use changes on a catchment using the Markov chain and WetSpa models. *Hydrological Sciences Journal*, 65(15), 2604-2615. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1797046

Kiyani Majd, M., Nohtani, M., Dehmardeh Ghaleh No, M R. & Shikh, Z. (2023). Simulating the Runoff of Watersheds in Dry Areas on A Monthly Scale using the SWAT Model (Case Study: Lar Watershed). *Journal of Watershed Management Research*, 14(27), 135-145. https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.135. [In Persian]

Liu, Y. B., & De Smedt, F. (2004). WetSpa extension, a GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management. Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Liu, Y. B., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2005). Assessing Land Use Impacts on Flood Processes in Complex Terrain by using GIS and Modeling Approach. *Environmental Modeling& Assessment*, 9(4), 227-235. https://doi.org/10.1007/s10666-005-0306-7

Liu, Y.B & De Smedt, F. (2005). Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information. *Water Resources Management*, 19, 605-624. https://doi.org/10.1007/s11269-005-6808-x

Liu, Y.B., De Smedt, F., & Pfister, L., (2002). Flood Prediction with the WetSpa Model on Catchment Scale. In Flood Defence. Science PressNew York, 499-507.

Mohammady, M., Moradi, H. R., Zeinivand, H., Temme, A. J. A. M., Yazdani, M. R., & Pourghasemi, H. R. (2018). Modeling and Assessing the Effects of Land Use Changes on Runoff Generation with the CLUE-s and WetSpa Models. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(1-2), 459-471. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2190-x

Nameghi, Z., Bahremand, A., Ownegh, M., & Golkarian, A. (2013). River Flow Simulation Using Distributed Hydrological Model WetSpa in Atrak Watershed. *Journal of Water and Soil Research*, 27(5), 1067-1076. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.23037. [In Persian]

Porretta, B. Chormanski, J. Ignar, S. Okruszko, T. Brandyk, A. Szymczak, T & Krezalek, K. (2010). Evaluation and verification of the WetSpa Model Based on Selected Rural Catchments in Poland. *Journal of Water and Land Development*, 14, 115- 133.

Rahmati, H., Ansari, H., Ziaei, A., & Zeinivand, H. (2017). Evaluation of WetSpa Model for Rainfall-Runoff Simulation in Semi-Arid and Mountainous Watersheds (Case Study: Bar Arye Watershed). *IrrigationSciencesandEngineering*, 40(2), 75-87. https://doi.org/10.22055/JISE.2017.13162. [In Persian]

Sadeghi, S.H., Ghasemieh, H., & Sadatinegad, S.J. (2015). Simulation of Streamflow using a Hydrological Model-Distributed WetSpa (Case study: Navrud Basin). *Journal of Water and Soil Science*, 19(73), 23-33. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3133-fa.html. [In Persian]

Safari Shad, M., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K., Ildoromi, A., & Zeinivand, H. (2023). Simulation of water balance components using WetSpass model, case study: Hamedan-Bahar Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 15(1), 42-54. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.122548.1516. [In Persian]

Safari, A., De Smedt, F., & Moreda, F. (2009). WetSpa model Application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*, 418, 78-89. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.001

Shahedi, K., & Forotan Danesh, M. (2022). River Flow Simulation in the Ghorichay Watershed using the Wetspa Model. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 25-42. 10.22034/hyd.2022.49767.1619. [In Persian]

Tade mule, A., Kassahun Birhanu, T., Mulu Sewinet, K., Solomon Bogale, A., & Natnael Yasab, A. (2024) Combining WetSpass and MODFLOW to assess the groundwater recharge in the agricultural highlands of Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 69(16), https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2420894

Tavakoli, M., De Smedt, F., Vansteenkiste, T & Willems, P. (2014). Impact of Climate Change and Urban Development on Extreme Flows in the Grote Nete Watershed, Belgium. *Natural Hazards*, 71, 2127–2142. https://doi.org/10.1007/s11069-013-1001-7

Yaghoubi, F., & Bahremand, A.R. (2011). Streamflow Simulation using Spatially Distributed Hydrologic Model, WetSpa in Chehel-Chai Watershed in Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*,18(3), 115- 185. [In Persian]

ZafarShademan, F., Ajorlo, M., Dahmardeh Ghaleno, M., & Ebrahimian, M. (2019). Effect of Land Use Change on Water Balance Components of Gharib Abad Watershed, Sistan and Baluchestan Province. *ECOPERSIA*, 7(4), 233-244. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.23037. [In Persian]

Zeinivand, H. (2009). Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion, and sediment transport. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1314]