Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 1 (49)

Received:
2022-12-01

Accepted:
2023-04-06

Pages: 41-51

Simulation of Stream Flow Hydrographs Using Flexible Distributed Hydrological Model (WetSpa) in Khorram Abad Basin

Ehsan Fatapour[1], Ali Afrous[2*], Babak Aminnejad[3], Ali Saremi[4], Amir Khosrojerdi[5]

1) Ph.D. Candidate of water structures, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Azad University, Faculty of Science and Research, Tehran, Iran.
2) Assistance Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Dezful Branch, Dezful, Iran.
3) Assistance Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Roudhan Branch, Tehran, Iran.
4) Assistance Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran, Iran.
5) Assistance Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran, Iran.
*Corresponding author email: Ali.afrous@gmail.com

Abstract:

Background and Purpose: The use of hydrological models in watersheds has always been of interest to water resources researchers. Hydrological simulation models are valuable tools for investigating challenging issues related to watershed management, such as the effect of climate change on water resources and the effect of urbanization on floods and droughts. Spatial distribution hydrological model WetSpa is used to simulate river flow at basin scale. The model uses the observed topography, land use, soil map, and daily meteorological time series (rainfall, evaporation and temperature) to predict hydrographs and distributional-spatial hydrological parameters of the basin. In this article, the object-oriented, modular and process-oriented model of WetSpa, which is prepared based on the flexible modeling approach, is applied to simulate the daily hydrograph in Khorramabad basin.

Method: The inputs of the model include digital elevation maps, soil type, land use, and time series of precipitation, temperature, and potential evaporation and transpiration, which are from the statistics of 6 meteorological stations in a ten-year period (water year 84-85 until 93-94) is used. After preparing the inputs of the model, at first the maps of the distribution parameters are automatically generated in the map format by the GIS pre-processing component of the model. After that, the model is calibrated using a 5-year statistical period (water year 84-85 to 89-88) of precipitation, temperature, and potential evaporation and transpiration data. The model uses Thiessen polygons to apply precipitation, temperature, and evaporation data. For this purpose, the daily discharges of Jam Anjir hydrometric station located at the outlet of the studied watershed are used. Model calibration is done manually by determining the values of 11 global (general) parameters of the model, so that the best match between simulation and observational hydrograph is obtained. And finally, the validation of the model is carried out based on a 5-year statistical period (water year 89-88 to 94-93) and the values of the global parameters obtained in the calibration stage.

Findings: The maps of distributed parameters are produced, which after preparing the inputs of Mashdand's production model showed that the average potential runoff coefficient of the area is 63% and the concentration time of the area is 17 hours. In the following, according to the 11 global parameters, which symbol and range of changes are specified in table (3), the model global (general) parameters values are obtained in the calibration stage. Comparing the simulated hydrograph by the model and the observed hydrograph in the calibration stage shows that the best match between the observed and simulated data is established with a correlation coefficient of 0.39. Validation of the model is also based on a 5-year statistical period (water year 89-88 to 94-93) and the values of global parameters. The output files of the model illustrate that 26.15% of the precipitation becomes runoff during the calibration period. During the validation period, the share of total runoff from precipitation is 26.42%. Moreover, the simulation results of the model demonstrate the ratio of evaporation to precipitation in the calibration and validation periods is 57.18 and 69.20%, respectively. Additionally, the results of the evaluation of the model based on the Kling-Gupta index (KGE) present the value of 0.68 for the calibration period and 0.74 for the validation period.

Results: In this article, the effectiveness of WetSpa model is investigated in order to simulate the daily flow of Khorram Abad River at Cham Anjir hydrometric station. According to the results obtained from this research, it can be said that the Wetspa spatial distribution model has the ability to simulate the hydrological behavior of the basin with acceptable accuracy. The graphical comparison of the calculated and observed hydrographs for the calibration and evaluation period also shows a relatively good match between the two hydrographs. Examining the results of calculating of the water balance components by the model demonstrates that the outflow in the calibration and validation period accounted for 26.15 and 26.42% of the total precipitation respectively, seems logical considering the major land use of mountains and pastures in the irrigation basin.

Keywords: Simulation, flexible hydrological modeling, WetSpa model

10.30495/WSRCJ.2023.70489.11332

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی هیدروگراف جریان رودخانه با مدل هیدرولوژیکی-توزیعی انعطاف‌پذیر WetSpa در حوزه خرم‌آباد

احسان فتاپور[1]، علی افروس[2*]، بابک امین نژاد[3]، علی صارمی[4]، امیر خسرو جردی[5]

۱)دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲)دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ایران.
۳)دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران.
۴)دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات، تهران، ایران.
۵)دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات، تهران، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: ali.afrous@gmail.com

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم
شماره ۱ (۴۹)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۱/۱۷

صفحات: ۵۱-۴۱

چکیده:

زمینه و هدف: کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبریز همواره مورد توجه محققین منابع آب بوده است. مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی ابزارهای ارزشمندی برای بررسی موضوعات چالش برانگیز مرتبط با مدیریت حوزه آبریز همچون اثر تغییر اقلیم بر منابع آب و تأثیر شهرسازی بر سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها هستند. مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در مقیاس حوزه به‌کار برده می‌شود. این مدل جهت پیش‌بینی هیدروگراف‌ها و پارامترهای هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی حوزه از نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، نقشه خاک و سری زمانی روزانه هواشناسی (بارندگی، تبخیر و درجه حرارت) مشاهده شده استفاده می‌کند. در این مقاله از مدل شیءگرا، مدولار و فرآیندمحور WetSpa که بر اساس رویکرد مدل‌سازی انعطاف‌پذیر تهیه شده، جهت شبیه‌سازی هیدروگراف روزانه در حوزه خرم‌آباد استفاده شده است.

روش پژوهش: ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های رقومی ارتفاع، تیپ خاک، کاربری اراضی و سری‌های زمانی بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل است که از آمار ۶ ایستگاه هواشناسی در یک دوره ده ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۹۴-۹۳) استفاده گردید. پس از آماده‌سازی ورودی-های مدل، در ابتدا نقشه‌های پارامترهای توزیعی به‌وسیله مؤلفه پیش‌پردازش GIS مدل، به‌طور خودکار به قالب map تولید می‌شوند. پس از آن، واسنجی مدل با استفاده از یک دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۸۹-۸۸) از داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل انجام شد. مدل جهت استفاده از داده‌های بارش، دما و تبخیر از پلیگون‌های تیسن استفاده می‌کند. بدین منظور از دبی‌های روزانه ایستگاه هیدرومتری چم‌انجیر واقع در خروجی حوزه آبریز مورد مطالعه استفاده گردید. واسنجی مدل با تعیین مقادیر ۱۱ پارامتر عمومی (کلی) مدل به‌صورت دستی صورت گرفت، به‌نحوی که بهترین انطباق بین هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به‌دست آید. در نهایت اعتبارسنجی مدل براساس یک دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۹-۸۸ تا ۹۴-۹۳) و مقادیر پارمترهای عمومی (کلی) به‌دست آمده در مرحله واسنجی انجام شد.

یافته‌ها: نقشه‌های پارامترهای توزیعی تولید شده که بعد از آماده‌سازی ورودی‌های مدل تولید می‌شدند نشان داد که متوسط ضریب رواناب پتانسیل حوزه ۶۳ درصد و زمان تمرکز حوزه ۱۷ ساعت می‌باشد. در ادامه طبق۱۱پارامتر کلی که نماد و دامنه تغییرات آن‌ها در جدول (۳) مشخص شده‌اند، مقادیر پارامترهای کلی مدل در مرحله واسنجی به‌دست آمد. مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای در مرحله واسنجی نشان داد که بهترین انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با ضریب همبستگی ۰/۳۹ ایجاد شده است. اعتبارسنجی مدل نیز براساس دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۹-۸۸ تا ۹۴-۹۳) و مقادیر پارامترهای کلی به‌دست آمد. فایل‌های خروجی مدل نشان داد که در دوره واسنجی ۲۶/۱۵ درصد از بارش تبدیل به رواناب می‌شود. در دوره اعتبارسنجی سهم کل رواناب از بارش برابر ۲۶/۴۲ درصد بدست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل، نسبت تبخیر به بارش را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۵۷/۱۸ و ۶۹/۲۰ درصد را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی مدل بر اساس شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) نیز، مقدار ۰/۶۸ برای دوره واسنجی و ۰/۷۴ را برای دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

نتایج: در این مقاله به بررسی کارایی مدل WetSpa بهمنظور شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد در محل ایستگاه هیدرومتری چم‌انجیر پرداخته شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان گفت که مدل توزیع مکانی Wetspa توانایی شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوزه را با دقت قابل قبولی دارد. مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره واسنجی و ارزیابی نیز نشان‌دهنده تطابق نسبتاً خوبی بین دو هیدروگراف می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از محاسبه مؤلفه‌های بیلان آبی توسط مدل نشان می‌دهد که جریان خروجی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۲۶/۱۵ و ۲۶/۴۲ درصد از کل بارش را به خود اختصاص داده است که با توجه به کاربری عمده کوهستان و مرتع در حوزه آبریز منطقی به نظر می‌رسد.

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی انعطاف‌پذیر، مدل WetSpa

10.30495/WSRCJ.2023.70489.11332

مقدمه

مدل‌سازی مناسب فرآیندهای هیدرولوژیکی نیازمند ابزارهای انعطاف‌پذیری است که قادر باشد با خصوصیات غالب سیستم و نیازمندی کاربردهای خاص انطباق یابد، زیرا مدل‌ها اغلب برای پاسخ به یک نیاز خاص توسعه یافته‌اند و بنابراین عدم انعطاف‌پذیری، توسعه بعدی آنها را تقریباً غیرممکن ساخته است (Salvadore et al., 2012). یک چارچوب انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی مفهومی هیدرولوژیک با هدف یکپارچه ساختن چارچوب از هم‌گسیخته مدل‌های مفهومی کنونی و ایجاد یک ساختار قوی برای شناخت و مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیک، توسط فنسیا و همکاران[1] (2011) رائه شده است که برخلاف کاربردهای مدل‌های ایستا، به هیدرولوژیست‌ها اجازه فرضیه‌سازی، ساختن و امتحان ساختارهای گوناگون مدل را با استفاده از ترکیب مؤلفه‌های مختلف می‌دهد (Salvadore., 2015). آنها فرآیندهای هیدرولوژیکی فیزیکی شهری را براساس انتخاب ۴۳ رویکرد مدل‌سازی مقایسه کردند. جهت غلبه کردن بر محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های هیدرولوژی شهری، استفاده از رویکرد مدل‌سازی فرآیندمحور مدولار که انعطاف‌پذیر و قابل انطباق با نیازهای تحقیقی است، را پیشنهاد کردند. مدل هیدرولوژیکی توزیعی و فیزیکی WetSpa از سال ۱۹۹۶ به‌صورت یک مدل بیلان آبی توسط وانگ و همکاران [2] (1996) در دانشگاه VUB بلژیک ابداع شد و از سال ۲۰۰۲ به بعد به‌منظور شبیه‌سازی سیل و مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژی استفاده شده است (Bahremand et al.؛ Liu et al., (2003). (۲۰۰۷)؛ Liu et al. (۲۰۰۵)).

مدل در بررسی تأثیر کاربری زمین بر سیل بررسی تأثیر هیدرولوژیکی تغییر اقلیم و بررسی تأثیر توأم تغییر اقلیم و توسعه شهری بر جریان، با موفقیت به‌کارگرفته شده است (VansteenKiste et al., 2013). ماژول‌های کیفیت آب و فرسایش مدل نیز توسعه داده شده است (Zeinivand et al., 2005). اجرای مدل WetSpa در دو محیط نرم‌افزاری ArcView وFortran انجام می‌گیرد. مدل دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد مثلا طبقات کاربری زمین گروه‌بندی شده است، برای همین ممکن است برخی طبقات تا حدودی نامشخص باشند یا مقادیر تعیین شده برای هر سلول شبکه یک مقدار میانگین را برای سطح هر سلول نمایش می‌دهد. در نتیجه هر چه تغییرپذیری سلول بیشتر باشد، خطای بیشتری بواسطه استفاده از یک مقدار میانگین ایجاد خواهد شد.و همچنین نسبت سطوح نفوذ ناپذیر برای مناطق شهری به صورت ذهنی بسته به اندازه سلول تعریف می‌شود، از این جهت که هیچ اندازه‌گیری دقیقی در دسترس نیست. همچنین تجمع برف و ذوب برف با روش ساده ضریب روز-درجه مدل‌سازی شده است، که باز توزیع توده برف، تأثیر جهت، شیب محلی، کاربری زمین و غیره برای ذوب برف لحاظ نشده است (Nurmohamed et al. (2006؛ (Kabir et al. (2011) Bahremand (et al. (2006 ؛). به همین منظور هدف از این مطالعه آزمایش توانایی مدل در حوزه‌های آبریز کوچک برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش ـ رواناب می‌باشد، و بر اساس آن، حوزه آبریز خرم‌آباد برای انجام این پژوهش انتخاب شد (Imani et al., ۲۰۱۴) جهت شبیه‌سازی رواناب روزانه حوزه آبریز بالخلوچای در استان اردبیل از مدل Wetspa استفاده کردند. ضرایب ارزیابی مدل شامل انحراف مدل، ناش-ساتکلیف، برای جریان کم و جریان زیاد، ضریب همبستگی و میانگین خطای نسبی برای دوره آزمون به ترتیب ۰/۰۸۷، ۰/۴۵، ۰/۳۰، ۰/۶۴، ۰/۶۹ و ۰/۹۶ بدست آمد. نتایج، دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی نسبت به جریان‌های پایه را در منطقه نشان داد.

چناری[3] و همکاران (۲۰۱۴) به شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه در حوزه آبریز ارازکوسه در استان گلستان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa پرداختند. نتایج شبیه‌سازی، تطابق نسبتاً خوبی را بین هیدروگراف‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه نشان دادند. مدل براساس معیار ناش-ساتکلیف، هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۶۲ و ۵۲ درصد به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی و دبی حداکثر را با دقت ۸۵ درصد برآورد کرد

وانگ [4]و همکاران (۱۹۹۶) به توسعه یک مدل توزیعی مبتنی بر فیزیک تحت عنوان WetSpa برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر پرداختند. مدل، سیستم هیدرولوژیکی یک حوزه آبریز را بصورت ترکیبی از لایه های اتمسفر، تاج‌پوشش، ناحیه ریشه، ناحیه انتقال و ناحیه اشباع مفهوم‌سازی می‌کند. جابجایی آب در خاک بصورت جریان عمودی یک بعدی شامل نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، بالا آمدگی مویینگی در ناحیه غیر اشباع و تغذیه آب زیرزمینی ساده‌سازی شده است. یک مدل جریان آب زیرزمینی به منظور پیش‌بینی دقیق برهمکنش بین رواناب سطحی و جریان آب زیرزمینی به آن اضافه شد.WetSpa تغییرات زمانی و مکانی تبخیر از خاک و پوشش گیاهی، تعرق از گیاهان، رواناب سطحی، تغذیه آب زیرمینی، جریان آب زیرزمینی و ظرفیت رطوبتی خاک را پیش‌بینی می‌کند.

یاروسلاو[5] و همکاران (۲۰۱۱) از مدل هیدرولوژیکی-توزیعی WetSpa به منظور تحلیل اثرات توپوگرافی، نوع خاک و کاربری اراضی بر خصوصیات رواناب در بالادست حوزه بایبرزا در جنوب شرق کشور لهستان استفاده نمودند. انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای در دوره مرطوب بدست

آمد. اما نتایج در دوره خشک به خوبی دوره مرطوب نبود. پس لازم است مدل جهت شبیه‌سازی مناسب جریان‌های کم، بهبود یابد.

لیو[۶] و همکاران (۲۰۱۱) به ارزیابی اثرات کاربری زمین بر روی فرآیندهای سیل با استفاده از GIS و مدل WetSpa در حوزه استینسل در کشور لوکزامبورگ پرداختند. ارزیابی بر روی توزیع رواناب از کلاس‌های مختلف کاربری زمین و اثر پتانسیل تغییرات کاربری زمین روی تولید رواناب متمرکز شد. نتایج نشان داد که رواناب مستقیم از مناطق شهری برای یک واقع سیل در مقایسه با سایر کلاس‌های کاربری زمین بیشتر است. سه سناریو تغییر کاربری زمین شامل توسعه شهری، جنگل‌زدایی و جنگل‌کاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سناریو توسعه شهری بالاترین جریان اوج را تولید می‌کند. دبی اوج شبیه‌سازی شده برای کاربری زمین موجود ۴۷/۶ مترمکعب بر ثانیه، برای سناریو شهرسازی ۶۵ مترمکعب بر ثانیه، برای سناریو جنگل‌زدایی ۵۳/۳ مترمکعب بر ثانیه و برای سناریو جنگل‌کاری ۴۳/۹ مترمکعب بر ثانیه بدست آمد.

باقری [۷]و همکاران (۲۰۱۶) پژوهشی را در خصوص شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل WetSpa در حوزه آبریز خیاوچای مشکین شهر انجام دادند که نشان داد مدل WetSpa پراکنش مکانی پارامترهای اقلیمی و زمینی را در نظر می‌گیرد و تمام زیر فرایندهای هیدرولوییکی موثر در تولید رواناب را بطور جداگانه و توزیعی شبیه‌سازی و پارامترهای هیدرولوژیکی را محاسبه می‌کند. لذا در تحقیقات انجام شده توصیه کردند در مواردی که شناخت مکانی پارامترهای هیدرولوژیکی، بررسی تغییر در هر یک از پارامترهای هیدرولوژیکی بر تولید رواناب یا مطالعه تاثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و یا کاربری اراضی بر میزان رواناب و به ویژه دبی‌های اوج تولید شده مد نظر است، از مدل هیدرولوژیکی WetSpa استفاده شود.

ایمانی[۸] و قاسمیه[۹] (۲۰۱۹) پژوهشی را با هدف پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی بر اساس عوامل مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی، لیتولوژیکی، خاک‌شناسی و پوشش زمینی با استفاده از تکنیک‌هایRS، GIS وAHP و تأکید بر کاربرد مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبریز بالخلوچای استان اردبیل برای مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی انجام دادند.

یونسی فرد[۱۰]و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه موردی را در منطقه شازند اراک انجام دادند که مشخص شد با توجه به نتایج حاصل از مطالعات گذشته، مدل WETSPA به‌خوبی قادر به اداره فرایندهای هیدرولوژیکی، در شرایط گوناگون توپوگرافی، خاک، کاربری، مساحت و غیره بوده و در این زمینه از توانایی باالایی برخوردار است و هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده ای همخوانی بالایی دارند. دقت شبیه‌سازی بر طبق شاخص ناش-ساتکلیف حدود ۸۹ درصد در دوره واسنجی و ۵۱ درصد در دوره اعتبارسنجی بدست آمد.

اهمیت بروز سیلاب‌های متعدد در آبریزهای کوهستانی غرب کشور و نیز برنامه‌ریزی برای پروژه‌های عمرانی از مواردی است که ضرورت انجام این پژوهش را توجیه می‌نماید. با توجه به مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج از کشور بر می‌آید که مدل WetSpa اغلب در حوزه‌های آبریز بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است.

بهره‌مند[۱۱] و همکاران (۲۰۰۶)، نورمحمد[۱۲] و همکاران (۲۰۰۶)، کبیر[۱۳]و همکاران (۲۰۱۱) به همین منظور هدف از این مطالعه آزمایش توانایی مدل در حوزه‌های آبریز کوچک برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب می‌باشد، و براساس آن، حوزه آبریز خرم‌آباد برای انجام این پژوهش انتخاب شد.

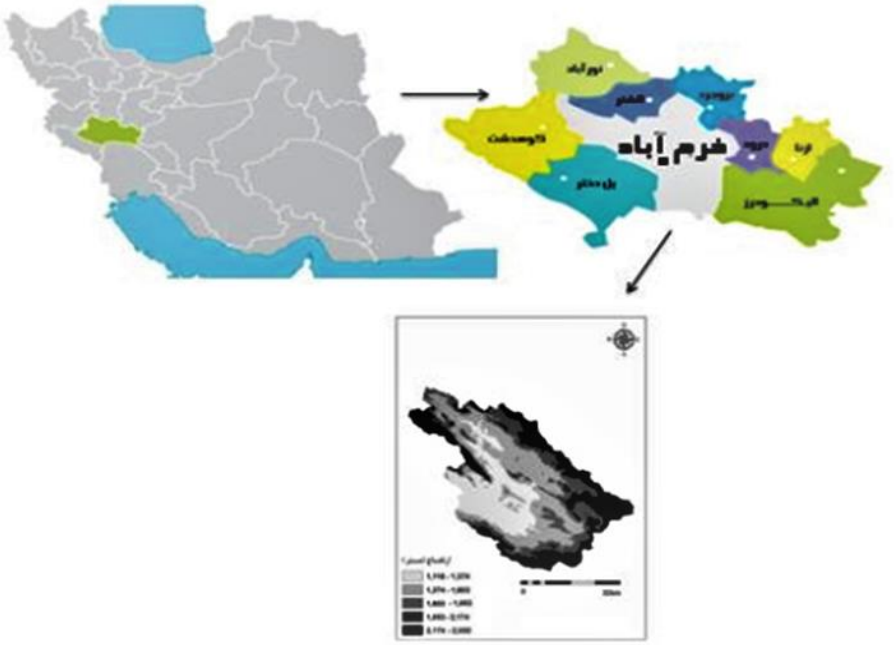
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

بازه مورد مطالعه در این رودخانه به طول ۷ کیلومتر بوده که در شهرستان خرم‌آباد و غرب شهر خرم‌آباد مطابق شکل ۱ واقع شده است. این رودخانه با جهت کلی جنوب شرقی به شمال غربی تا محل تقاطع با رودخانه کشکان ادامه می‌یابد. ابتدای بازه مورد مطالعه در فاصله تقریبی ۹ کیلومتری جنوب غربی شهر خرم آباد واقع شده است. رودخانه مزبور، با عبور از مجاورت روستاهایی چون غلامان، سرکانه، چهارگوش، پاهلت و چم دیوان، در محلی به نام دوآب ویسیان که محل تلاقی رودخانه مزبور با رودخانه کشکان بوده، خاتمه می‌یابد. مساحت حوزه آبریز مورد مطالعه ۲۵۰۲ کیلومتر مربع و محیط آن ۲۷۲ کیلومتر می‌باشد. (شکل ۱)

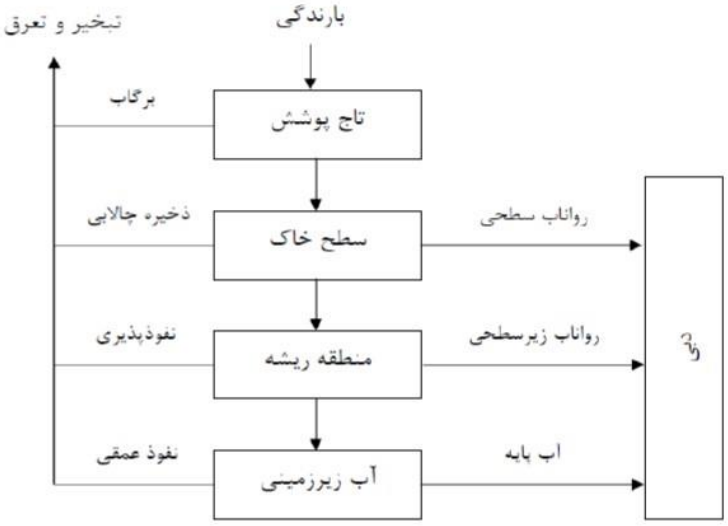
توصیف مدل اصلی WetSpa

WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی و فیزیکی برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در مقیاس حوزه‌ای یا منطقه‌ای و گام زمانی روزانه است که در دانشگاه VUB بروکسل بلژیک ابداع شد (Wang et al). مدل یک سیستم هیدرولوژیکی آبریز را که از اتمسفر، تاج پوشش، ناحیه ریشه، ناحیه انتقال و ناحیه اشباع ساخته شده است را به تصویر می‌کشد. حوزه آبریز به تعدادی سلول شبکه‌ای تقسیم شده است که بصورت نامتجانس توزیع شده‌اند. هر سلول سپس به دو بخش خاک لخت و بخش دارای پوشش گیاهی تقسیم می‌شود، که بیلان آب و انرژی را برقرار می‌کند. (شکل۲) ساختار مدل WETSPA در مقیاس پیکسل را نشان می‌دهد. جابجایی آب در خاک، به‌صورت جریان عمودی یک بعدی



شکل۱. موقعیت حوزه آبریز مورد مطالعه

ساده‌سازی شده است که شامل نفوذ سطحی، تراوش و صعود مویینگی در ناحیه غیر اشباع و تغذیه آب زیرزمینی است. مدل جهت شبیه‌سازی جریان سطحی هورتونی و مفهوم تولید رواناب منطقه‌ای متغیر طراحی شده است. به منظور نمایش واقعی‌تر برهم‌کنش بین رواناب سطحی و ذخیره آب زیرزمینی، یک مدل جریان آب زیرزمینی اضافه شده است بطوریکه بیلان آب زیرزمینی را در ناحیه اشباع بوسیله معادله جریان افقی دو بعدی دوپویت-فورچیمر توصیف می‌کند. تحت شرایط مرزی مناسب، موقعیت سطح ایستابی با یک روش تفاوت محدود برای هر سلول شبکه و هر گام زمانی تعیین می‌شود. ورودی‌های مدل عبارتند از: ۱- سری‌های زمانی بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و دما، که با روش پلیگون‌های تیسن در سراسر آبریز توزیع می‌شوند؛ و ۲- پارامترهای توزیعی مکانی، که از سه نقشه ورودی بافت خاک، کاربری زمین و توپوگرافی به‌دست می‌آیند. خروجی‌های معمول عبارتند از: هیدروگراف‌های جریان درخروجی حوزه آبریز و زیرحوزه‌ها، نقشه‌ها و مؤلفه‌های جریان-های اصلی آب برای هر گام زمانی و مؤلفه‌های بیلان آب (., Salvadore et al2012).



شکل۲. ساختار مدل WETSPA در مقیاس پیکسل

مدل، علاوه بر پارامترهای توزیعی (بصورت نقشه) که توسط مدل از روی نقشه‌های پایه محاسبه می‌شوند و کالیبره نمی‌شوند، دارای ۱۱ پارامتر عمومی یا کلی نیز می‌باشد که این پارامترها عمدتاً فاکتور تصحیح بوده و یا به‌طور منطقی و استدلالی قابل تعیین می‌باشند و سپس می‌توان آن‌ها را با کالیبراسیون تعدیل کرد. (Bahremand., 2016) در بسط ایده تخصیص پارامتر به نحوه تعیین پارامترهای مدل‌های فیزیکی به ذکر نکاتی در خصوص پارامترهای مدل WetSpa پرداخته است که می‌تواند به تعیین پارامترهای این مدل به‌طور استدلالی کمک شایانی کند، که این منجر به محدود شدن فرایند واسنجی می‌شود (در حد تعدیل و تنظیم مقدار اولیه تخصیص یافته).

فرضیات مدل

خصوصیات خاک و زمین برای هر سلول رستر همگن و متجانس (مشابه) هستند.

تاج پوشش گیاهی و پوشش زمین برای هر سلول رستری متجانس است.

بارش درون هر سلول رستر متجانس است.

شکل جریان سطحی هورتونی برای اکثر مناطق معتبر است.

تبخیر و تعرق در طول یک رگبار و هنگامیکه رطوبت خاک پایین‌تر از رطوبت باقیمانده خاک است، قابل چشم پوشی است.

تبخیر و تعرق عمقی هنگامی اتفاق می‌افتد که خاک خشک است و با مقدار ذخیره مؤثر آب زیرزمینی محدود شده است.

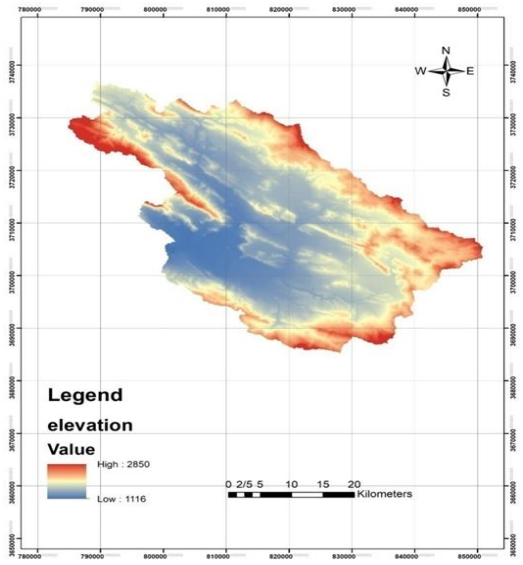
ظرفیت رطوبتی خاک در هر سلول متجانس است

تهیه ورودی‌های مدل

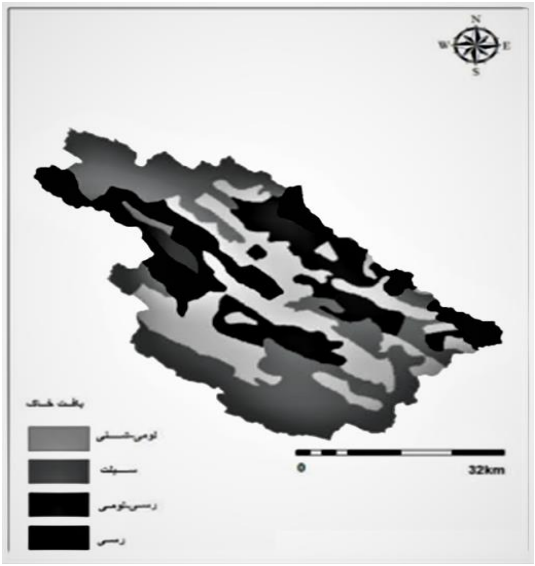
سه نقشه رقومی ارتفاع، تیپ خاک و کاربری اراضی مربوط به حوزه آبریز مورد مطالعه با اندازه سلول ۸۰ متر و گسترش مکانی یکسان در محیط GIS-Arc تهیه و قبل از ورود به مدل، در محیط PCRaster به قالب map تبدیل شدند (شکل های ۳و۴و۵). از داده‌های ۲ ایستگاه هواشناسی برای تهیه سری‌های زمانی دما و تبخیر و تعرق پتانسیل؛ و از داده‌های ۶ ایستگاه برای تهیه سری‌های زمانی بارش در یک دوره آماری ده ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۹۴-۹۳) استفاده گردید جدول (۱).

جدول۱. ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق

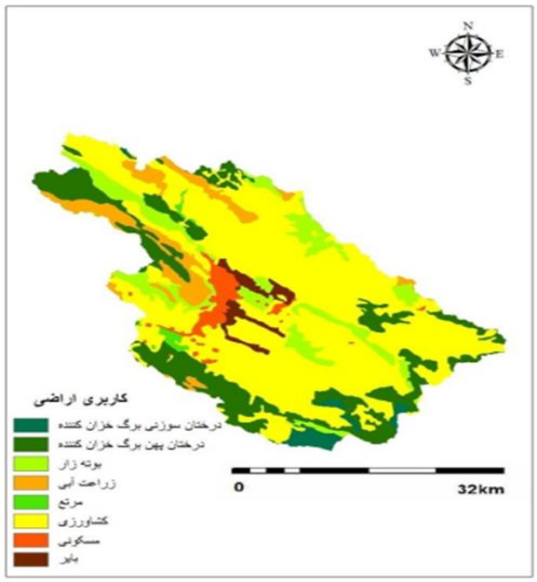
ردیف	نام ایستگاه	UTM		ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع ایستگاه
		X	Y		
۱	چم‌انجیر	۲۴۱۳۵۰	۳۷۰۲۴۱۹	۱۱۶۶	تبخیرسنجی
۲	مرکزی	۷۷۵۹۵۱	۳۶۹۹۵۶۸	۹۵۰	تبخیرسنجی
۳	خرم‌آباد	۲۶۸۷۹۳	۳۶۹۳۴۵۳	۱۴۴۹	باران سنجی
۴	شاهیوند دوره	۷۶۶۱۹۹	۳۷۱۹۲۷۶	۹۶۰	باران سنجی
۵	چم‌انجیر	۲۴۳۷۹۳	۳۷۰۳۸۶۵	۱۱۴۰	هیدرومتری
۶	دوآب ویسیان	۷۷۵۳۹۳	۳۷۱۰۰۶۸	۹۵۰	هیدرومتری



شکل ۳. نقشه رقومی ارتفاع آبریز مورد مطالعه



شکل ۴. نقشه بافت خاک آبریز مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حوزه آبریز مورد مطالعه

اجرای مدل

پس از آماده‌سازی ورودی‌های مدل، در ابتدا نقشه‌های پارامترهای توزیعی به‌وسیله مؤلفه پیش‌پردازش GIS مدل، به‌طور خودکار به قالب map تولید می‌شوند. پس از آن، واسنجی مدل با استفاده از یک دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۸۹-۸۸) از داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل انجام شد. لازم به‌ذکر است مدل جهت استفاده از داده‌های بارش، دما و تبخیر از پلیگون‌های تیسن استفاده می‌کند. بدین منظور از دبی‌های روزانه ایستگاه هیدرومتری چم‌انجیر واقع در خروجی حوزه آبریز مورد مطالعه استفاده گردید. واسنجی مدل با تعیین مقادیر ۱۱ پارامتر کلی مدل به‌صورت دستی صورت گرفت، به نحوی که بهترین انطباق بین هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به‌دست آید. البته سعی شد با استدلال و با شناختی که از مدل و پارامترها و حوزه آبریز مورد مطالعه وجود داشت، مقدار اولیه مناسب برای پارامترها مشخص شود و سپس این مقادیر با یک کالیبراسیون محدود تعدیل شدند. از میان پارامترهای مدل سه پارامتر Kg (ضریب افت آب زیرزمینی)،Kep (فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق)،K0 (ذخیره آب زیرزمینی اولیه) حساس‌ترین هستند (Bahremand and De Smedt., 2008). تعیین پارامتر Kg از روی شیب شاخه خشکیدگی هیدروگراف امکان‌پذیر است (Liu et al. (2003) ; Bahremand. (2003). پارامترهای Kep و G0 با مطابقت دادن آب‌پایه در کل دوره شبیه‌سازی و بررسی مؤلفه‌های مشاهداتی بیلان آب حوزه آبریز (بارش، رواناب و تبخیر) قابل تخصیص هستند (Bahremand., 2016). در گام آخر اعتبارسنجی مدل براساس یک دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۹-۸۸ تا ۹۴-۹۳) و بر مبنای مقادیر پارمترهای عمومی (کلی) به‌دست آمده در مرحله واسنجی انجام شد. از ضعف‌های این نسخه نداشتن ماژول ذوب برف می‌باشد که این موضوع در بعضی از زمان‌های سال بر نتایج شبیه‌سازی مؤثر بوده است. در صورت اضافه شدن ماژول ذوب برف نتایج بهبود می‌یابد.

ارزیابی مدل

جهت ارزیابی میزان تطابق بین دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای از معیار کلینگ-گوپتا (KGE) به‌عنوان تابع ارزیابی استفاده شد.

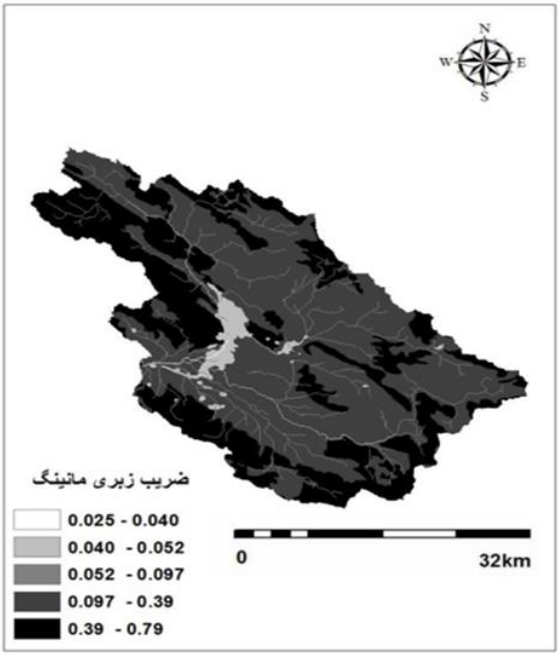
$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۱)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (۲)$$

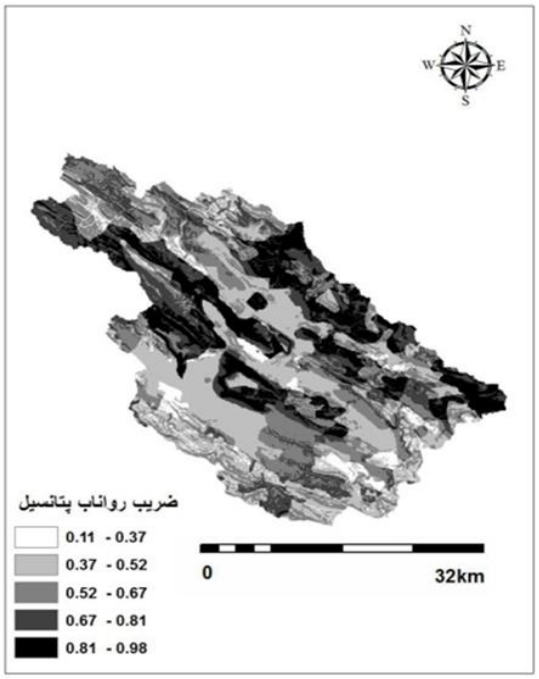
که در آن: r ضریب هم‌بستگی بین دبی‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی می‌باشد. α نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی (σ_s) به انحراف معیار مقادیر مشاهداتی (σ_o) است. β نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی (μ_s) به میانگین مقادیر مشاهداتی (μ_o) است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا عدد یک می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف‌ها می‌باشد. این معیار نسبت به معیار معمول ناش-ساتکلیف دارای مزایایی می‌باشد (Gupta et al., 2009).

نتایج و بحث

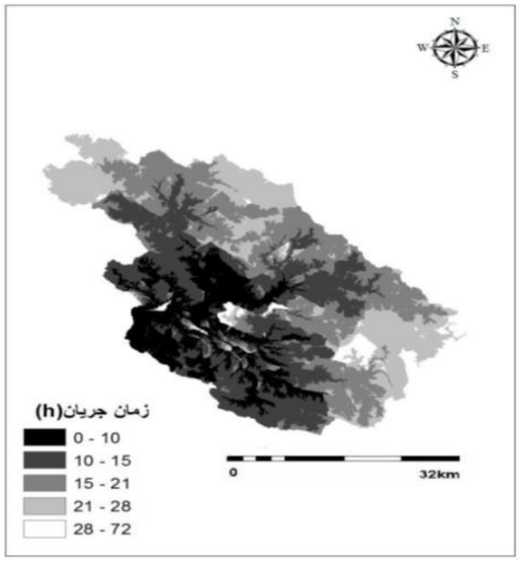
پس از آماده‌سازی ورودی‌های مدل، در گام اول نقشه‌های پارامترهای توزیعی توسط مؤلفه پیش‌پردازش GIS تولید می‌شوند که شامل نقشه جهت جریان، تجمع جریان، شبکه آبراهه‌ها، رتبه آبراهه‌ها، نقشه شیب، توزیع شعاع هیدرولیکی، نقشه زیرحوزه‌ها، هدایت هیدرولیکی، پروزیته، ظرفیت مزرعه، رطوبت باقیمانده خاک، نقطه پژمردگی، عمق ریشه، حداقل و حداکثر ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، ضریب زبری مانینگ، ضریب رواناب پتانسیل، زمان جریان و نقشه پلیگون‌های تیسن می‌باشند. نتایج نشان داد که متوسط ضریب رواناب پتانسیل حوزه ۶۳ درصد و زمان تمرکز حوزه ۱۷ ساعت می‌باشد. (شکل۶) نقشه ضریب زبری مانینگ، (شکل ۷) نقشه ضریب رواناب پتانسیل حوزه و (شکل ۸) نقشه زمان پیمایش جریان را در هر شبکه سلولی نشان می‌دهد.



شکل۶. نقشه ضریب زبری مانینگ حوزه آبریز مورد مطالعه



شکل ۷. نقشه ضریب رواناب پتانسیل حوزه آبریز مورد مطالعه



شکل۸. نقشه زمان پیمایش جریان حوزه آبریز مورد مطالعه

در ادامه طبق۱۱پارامتر که نماد و دامنه تغییرات آنها در جدول (۳) مشخص شده‌اند، مقادیر پارامترهای عمومی (کلی) مدل در مرحله واسنجی به‌دست آمدند که در جدول (۲) آمده است.

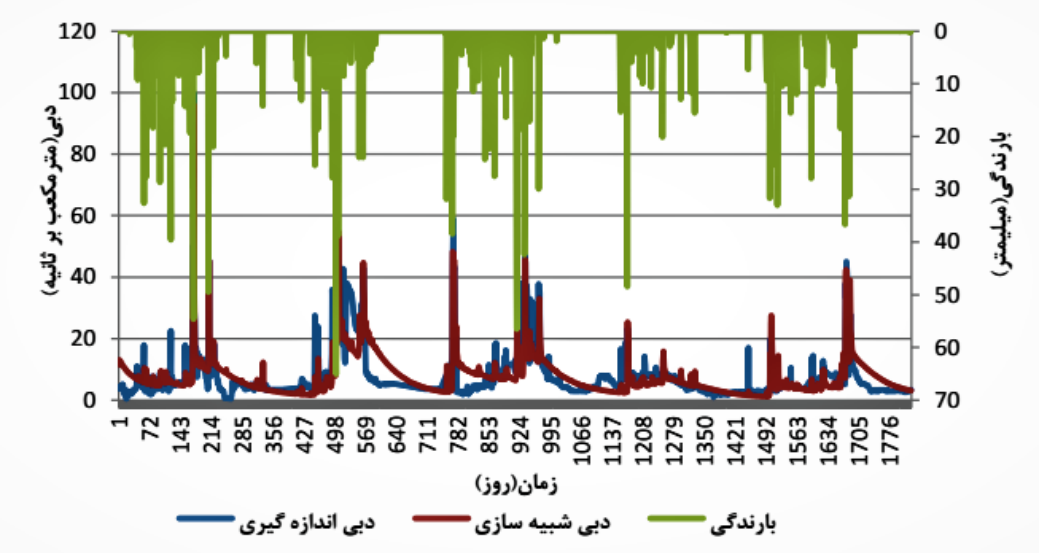
جدول ۲. مقادیر یازده پارامتر سراسری مدل WetSpa تعیین شده در مرحله واسنجی

علامت	مقدار عددی واسنجی شده
k_i	۱
k_g	۰/۰۰۰۰۳
k_{ss}	۰/۴۴
k_{ep}	۰/۲۹
G_o	۱۴۰
G_{max}	۱۰۲۰
T_o	۰/۰۶
k_{snow}	۰/۰۴۲
k_{rain}	۰/۰۰۷
K_{run}	۳/۸
p_{max}	۳۰۰۰

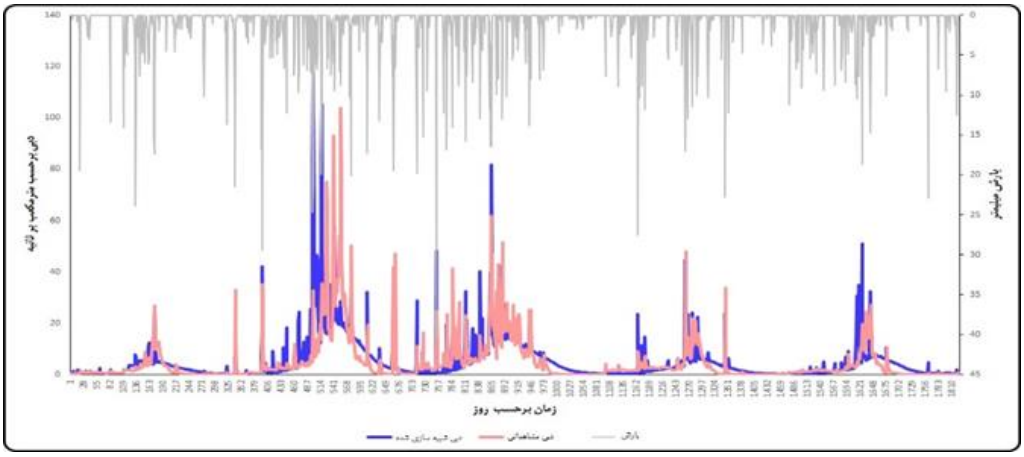
مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای در مرحله واسنجی، به صورت نمودار پراکنش نقطه‌ای و سری زمانی در (شکل۹) نشان داده شده است. در این شکل بهترین انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در نمودار پراکنش نقاط در مقایسه با خط یک به یک، ارائه شده است. این انطباق با ضریب هم‌بستگی ۰/۳۹ ایجاد شده است. اعتبارسنجی مدل نیز براساس دوره آماری ۵ ساله (سال آبی ۸۹-۸۸ تا ۹۴-۹۳) و برمبنای مقادیر پارامترهای عمومی به‌دست آمده در مرحله واسنجی انجام شد که نتایج مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در مرحله اعتبارسنجی در (شکل۱۰) آمده است.

جدول۳. پارامترها، مقادیر اولیه و دامنه تغییرات آنها

علامت	پارامتر	مقدار اولیه	حداقل	حد اکثر
k_i	فاکتور جریان زیر سطحی (-)	۰/۰۰۷	۰/۱	۱۰
k_g	ضریب افت آب زیر زمینی d^{-1}	۰/۰۰۰۱	۷-۱۰×۰/۱	۰/۱
k_{ss}	رطوبت اولیه خام (-)	۱	۰/۱	۲
k_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرف پتانسیل (-)	۰/۱	۰/۳	۲
G_o	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (mm)	۱۰	۰	۱۰۰
G_{max}	حد اکثر ذخیره آب زیرزمینی اولیه (mm)	۵۵۵۰۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰۰
T_o	ضریب درجه حرارت آستانه (c0)	۰	-۳	۲
k_{snow}	ضریب روز درجه حرارت ($mm\ c^0\ d^{-1}$)	۰،۰۴۵	-۳	۳/۲
k_{rain}	ضریب روز درجه بارش ($mm\ mm\ c^0\ d^{-1}$)	۰	۳-۱۰	۰/۳
K_{run}	توان رواناب سطحی (-)	۰،۰۰۱	۴	۷
p_{max}	حد اکثر شدت بارش (mm)	۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰۰



شکل ۹. مقایسه بین دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره واسنجی



شکل ۱۰. مقایسه بین دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط مدل در دوره اعتبارسنجی

فایل‌های خروجی مدل شامل بیلان آبی حوزه، جریان سطحی، جریان زیرقشری، جریان پایه و جریان کل در هر گام زمانی است. بر اساس نتایج حاصل از خروجی مدل، در دوره واسنجی ۲۶/۱۵ درصد از بارش تبدیل به رواناب می‌شود که از این میزان ۲/۳۷ درصد مربوط به رواناب سطحی، ۱/۶۱ درصد جریان زیرقشری و ۲۲/۱۷ درصد مربوط به تخلیه آب زیرزمینی (جریان پایه) می‌باشد. در دوره اعتبارسنجی سهم کل رواناب از بارش برابر ۲۶/۴۲ درصد بدست آمده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل، نسبت تبخیر به بارش را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۵۷/۱۸ و ۶۹/۲۰ درصد نشان می‌دهد. جدول (۴و۵) مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

جدول۴. مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل در دوره واسنجی

	(Sum (mm	بارندگی ٪	میانگین
P	۲۷۷۹/۴	-	۱/۵۲۲
I	۱۳۳/۱	۴/۷۹	۰/۰۷۳
D_S	۴۲/۶	۱/۵۳	۱۷۲/۸۵۱
F	۲۰۶۷/۱	۷۴/۳۷	۱/۱۳۲
E	۱۵۸۹/۲	۵۷/۱۸	۰/۷۸۰
PERS	۷۶۷/۶	۲۷/۶۲	۰/۴۲۰
R_S	۶۵/۹	۲/۳۷	۰/۰۳۶
R_I	۴۴/۸	۱/۶۱	۰/۰۲۵
R_G	۶۱۶/۱	۲۲/۱۷	۰/۰۳۳۷
R	۷۲۶/۹	۲۶/۱۵	۰/۳۹۸
D_G	-۵۵/۲	-۱/۹۸	۱۰۸/۷۹۳

جدول۵. مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل در دوره اعتبارسنجی

	(Sum (mm	بارندگی ۰/۰	میانگین
P	۷۶۵/۳	–	۱/۰۴۸
I	۵۸	۷/۵۷	۰/۰۷۹
D_S	۳۴/۲	۴/۴۷	۱۵۶/۴۹۳
F	۶۰۶۱	۷۹/۲	۰/۸۳
E	۵۲۹/۶	۶۹/۲	۰/۷۲۵
PERS	۱۸۲/۵	۲۳/۸۵	۰/۲۵
R_S	۱۴/۵	۱/۹	۰/۰۲
R_I	۱۰/۲	۱/۳۳	۰/۰۱۴
R_G	۱۷۷/۵	۲۳/۱۹	۰/۲۴۳
R	۲۰۲/۲	۲۶/۴۲	۰/۲۲۷
D_G	-۸۰/۱	-۱۰/۴۷	۸۸/۶۱۳

در این جداول P: بارش مشاهده‌ای (میلیمتر)، I: تلفات برگ‌آبی (میلیمتر)، Ds: تفاوت رطوبت خاک بین نقطه شروع و پایان گام زمانی (میلیمتر)، F: تلفات نفوذ (میلیمتر)، E: تبخیر و تعرق (میلیمتر)، PERS: متوسط نفوذ عمقی به خارج از زون ریشه (میلیمتر)، Ri: رواناب سطحی (میلیمتر)، Ri: رواناب زیرسطحی (میلیمتر)، Rg: جریان آب زیرزمینی، (میلیمتر) R: رواناب کل (میلیمتر)،Dg: تلفات ذخائر آب زیرزمینی بین نقطه شروع و پایان گام زمانی (میلیمتر) است، که همگی در بخش‌های قبلی توضیح داده شده‌اند. نتایج ارزیابی مدل بر اساس شاخص کلینگ-گوپتا (KGE)، ارزیابی مدل براساس شاخص مذکور، مقدار ۰/۶۸ برای دوره واسنجی و ۰/۷۴ را برای دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کارایی مدل مبتنی بر فیزیک و فرآیندمحور WetSpa به‌منظور شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد در محل ایستگاه هیدرومتری چم‌انجیر پرداخته شد. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای نشان می‌دهد که مدل کارایی نسبتاً مناسبی در شبیه‌سازی جریان روزانه را دارد؛ اگر چه در گام‌هایی، شبیه‌سازی جریان کم‌تر یا بیش‌تر از واقعیت بوده است. همچنین در برخی موارد در مقابل وقایع بارش رخ داده در حوزه آبریز، عکس‌العمل سیلاب مشاهده نمی‌شود، اما به‌وسیله مدل شبیه‌سازی شده است که این موضوع ناشی از خطا در ثبت داده‌های مشاهده‌ای است؛ مشابه این وضعیت در تحقیق (et al., Jaroslaw2011) در منطقه مطالعاتی خودشان نیز دیده شده است. بررسی نتایج حاصل از محاسبه مؤلفه‌های بیلان آبی توسط مدل نشان می‌دهد که جریان خروجی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۲۶/۱۵ و ۲۶/۴۲ درصد از کل بارش را به خود اختصاص داده است که با توجه به کاربری عمده کوهستان و مرتع در حوزه آبریز منطقی به نظر می‌رسد. لحاظ نکردن شبیه‌سازی برف از نقاط ضعف مدل می‌باشد، که پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده مدلسازی برف نیز صورت پذیرد.

Reference:

Bahremand, A. Corluy, J. Y.B. Liu, Y.B. De Smedt, F (2005). Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. P415-422, In: J. van Alphen, E. van Beek, M. Taal (eds.) , Floods, from Defence to Management, Taylor and Francis Group, London.

Bahremand, A (2006) Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. Ph.D. Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium,150p.

Bahremand, A. De Smedt, F. Corluy, J. Liu,YB. Poorova,J. Velcicka L , and Kunikova, E (2007) Hornad –for assessing reforestation impacts on floods in Margecany WetSpa model application watershed, Slovakia. Water Resources Management21 (8) :1373-139.

Bahremand,A and De Smedt,F (2008) Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in a. Water Resources ManagementTorysa Watershed, Slovaki 22 (3) :393-408.

Bahremand, A. Ahmadyousefi ,Sarhadi S. Sheikh, V and Komaki ,CB (2017) Comparison of WetSpa and WetSpa-Python hydrological models. 5th International Conference on New Ideas in Agriculture, Environment and Tourism, Tehran. (In Persian)

Bagheri, M. Esmaeli ,A. Abedini ,M. Goli ,E (2016). simulation of river flow using the wetspa model of khiauchai watershed in mexaksan city.11 nasional conference on water shet managemaent sciences and engineering of iran. 2016.

CHenari, S. Bahremand, K . And Salmani, h (2014). Simulation of daily river flow using the WetSpa hydrological-distribution model in the Arazkose watershed (Gorgan-Rood) , Golestan province. International Quarterly Journal of Analytical Research on Water Resources and Development, 3 (2) , 24-34. (In Persian)

Fenicia,F. Kavetski ,D and Savenije HG (2011) Elements of a flexible approach for conceptual Motivation and theoretical development :hydrological modeling.Water Resources Research 47:1-13

Gupta, HV. Kling, H. Yilmaz ,KK. and Martinez GF (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology 377 (1) :80-91

Imani, R. GHasemie ,H (2019).Finding the potential of underground water resources using WETSPA hydrological model, GIS techniques and RS and hierarchical analysis (case study: Balkhlochai watershed, Ardabil). Danesh Ab and Khak Journal ,1-30.

Kabir, A. Mahdavi, M. Bahremand, A and Noora, N. 2011. Application of a geographical information system (GIS) based hydrological model for flow prediction in Gorganrood river basin, Iran, Afr. J Agr. Res., 6: 1, 35-45.

rosławJa,C and Batelaan ,O (2011) Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study. Annals of Warsaw SGGW. Land Reclamation-University of Life Sciences 43 (1) :25-35.

Imani, R. and Ghasemi, H. and Esmali Ouri, a (2014). Application and calibration of Wetspa hydrological model to simulate the daily runoff of Balkhlochai watershed. International Quarterly Journal of Analytical Research on Water Resources and Development,3 (4) , 140-152. (In Persian)

Liu,YB. De Smedt, F. Hoffmann,L and Pfister L (2005) Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. Environmental Modeling and Assessment 9 (4) :227-235

Liu,YB and Smedt FD (2005) Flood modeling for complex terrain using GIS and remote sensed information. Water Resources Management 19 (5) :605-624

Liu, Y.B. Batelaan, O. Huong, N.T. Tam, V.T. and Smedt, F.D (2004). Flood prediction in the karstic Suoimuoi catchment, Vietnam. Proceeding of the international transdisciplinary conference on development and conservation of karst regions, Hanoi, Vietnam, pp.139-144.

Nash ,JE. Sutcliffe, JV (1970) River flow forecasting through conceptual model. Journal of Hydrology 10:282–290

Nurmohamed, R. Naipal, S and De Smedt, F. (2006). Hydrologic modeling of the Upper Suriname, J. Spatial Hydrol., 1: 6, 1-17

Salvadore, E. Bronders, J and Batelaan O (2012) Enhanced model flexibility and opportunities: The WetSpa model case. International Congress on Environment Modeling and Software: Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany, 8p

Salvadore, E. Bronders, J and Batelaan O (2015) Hydrological modelling of urbanized catchments: A directions. Journal of hydrology review and future 529:62-81

Vansteenkiste,T . Tavakoli ,M. Ntegeka,V. Willems ,P. De Smedt ,F and Batelaan O (2013) Climate change impact on river flows and catchment hydrology: a comparison of two spatially distributed models. Hydrological Processes 27 (25) :3649-3662

Wang, Z.M. Batelaan, O. and De Smedt, F (1996). A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Physics and Chemistry of the Earth, 21 (3) , pp.189-193.

Younesifard, M. Paymozd, SH. Rahimi, M (2020). Simulation of the effect of climate change on the runoff of the Shazand BasinUsing the WETSPA distribution model .iran-water resources.2-16

Zeinivand,H (2009) snowmelt, Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for soil erosion, and sediment transport. Ph.D. Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel (VUB). Brussels, Belgium, 238p

Wang, ZM. Batelaan,O andDe Smedt F (1996) ransfer A distributed model for water and energy t WetSpa) between soil, plants and atmosphere). Physics and Chemistry of the Earth 21 (3) :189-193

یادداشت ها

[1] *Fenicia*
[2] Wang
[3] chenari
[4] *Wang*
[5] Jarosław
[6] *Liu*
[7] *Bagheri*
[8] *Imani*
[9] *ghasemieh*
[10] *Younesifard*
[11] *Bahremand*
[12] *Nurmohamed*
[13] *Kabir*