تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰
Volume 17, No. 4, Winter 2022 (IR-WRR)
۲۴۲-۲۵۱

یادداشت فنی

شبیه‌سازی هیدروگراف جریان رودخانه با مدل هیدرولوژیکی-توزیعی انعطاف‌پذیر WetSpa-Python

محمد اوژن[۱]، عبدالرضا بهره‌مند[۲*]، واحدبردی شیخ[۳]، چوقی بایرام کمکی[۴] و مریم محمدرضایی[۵]

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی ابزارهای ارزشمندی برای بررسی موضوعات چالش‌برانگیز مرتبط با مدیریت حوضه آبخیز هم‌چون اثر تغییر اقلیم بر منابع آب، تأثیر شهرسازی بر سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها هستند. در این مقاله از مدل شیءگرا، مدولار و فرآیندمحور WetSpa-Phyton که بر اساس رویکرد مدل‌سازی انعطاف‌پذیر تهیه شده و با زبان برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی شده است، جهت شبیه‌سازی هیدروگراف روزانه در حوضه ارازکوسه استفاده شده است. ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های رقومی ارتفاع، تیپ خاک و کاربری اراضی و سری‌های زمانی بارش، دما و تبخیر است که از آمار ۹ ایستگاه هواشناسی در یک دوره ده ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۹۴-۹۳) استفاده گردید. واسنجی مدل به‌طور محدود با تخصیص مقادیر منطقی به ۸ پارامتر گلوبال (کلی) مدل، بر مبنای بهترین انطباق بین هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای انجام شد. ارزیابی مدل بر اساس شاخص کلینگ-گوپتا، صورت گرفت که به‌ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر ۰/۶ و ۰/۵۲ به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج محاسبات بیلان آبی توسط مدل نشان داد که جریان خروجی از حوضه به ترتیب ۱۳/۲ و ۱۸/۱ درصد از کل بارش را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به خود اختصاص داده است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی انعطاف‌پذیر، مدل WetSpa-Phyton، شبیه‌سازی رواناب، حوضه ارازکوسه.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۸/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان-ایران.
۲- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان-ایران.
۳- دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان-ایران.
۴- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان-ایران.
۵- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان-ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.

Technical Note

Simulation of Stream Flow Hydrographs Using Flexible Distributed Hydrological Modelling (WetSpa-Python)

M. Azhan[1], A. Bahremand [2], V. Sheikh[3], Ch. Bairam Komaki[4], and M. Mohammadrezaei[5]*

Abstract

Hydrological simulation models are valuable tools for examining challenging issues related to watershed management such as the impact of climate change on water resources, the impact of urban planning on floods and droughts. In this study, WetSpa-Python model was developed to simulate daily flow hydrographs at the Arazkouse basin. This is an object-oriented, process-based modular model which has been developed based on the principles of flexible modeling in python. Data inputs included DEM, soil type, land-use, precipitation time series, temperature, and evapotration, which were acquired from nine meteorological stations for a ten-year period (from 2006-07 to 2015-16). Model calibration was performed in a limited manner by assigning rational values to 8 global parameters based on the best fit between the simulated and observed hydrographs. Model performance was tested via the Kling-Gupta index, and obtained 0.6 and 0.52 for the calibration and validation periods, respectively. The results of the water-balance analysis with the model indicated that the outflow of the basin constitutes 13.2 and 18.1% of total precipitation in the calibration and validation periods.

Keywords: Flexible Modelling, WetSpa-Python, Runoff Simulation, Arazkouse Basin.

Received: November 4, 2018
Accepted: February 2, 2022

1- Ph.D. Graduate of Watershed Management Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email: ozhanmohammad@gmail.com
2- Professor of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan University, Iran. Email: Abdolreza.bahremand@gmail.com
3- Associate Professor of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan University, Iran. Email: v.sheikh@yahoo.com
4- Assistant professor of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan University, Iran. Email: bkomaki@gmail.com
5- Ph.D. Candidate of Watershed Management Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email:mrezaei501@yahoo.com
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.4.15.2

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- 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 هم گسیخته مدل‌های مفهومی کنونی و ایجاد یک ساختار قوی برای شناخت و مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیک، توسط Fenicia et al. (2011) ارائه شده است که برخلاف کاربردهای مدل‌های ایستا، به هیدرولوژیست‌ها اجازه فرضیه‌سازی، ساختن و تست ساختارهای گوناگون مدل را با استفاده از ترکیب مؤلفه‌های مختلف می‌دهد. Salvadore et al. (2015) توصیف مفهومی فرآیندهای هیدرولوژیکی فیزیکی شهری را براساس انتخاب ۴۳ رویکرد مدل‌سازی مقایسه کردند. آنها 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 Wang et al. (1996) در دانشگاه VUB بلژیک ابداع شد، و از سال ۲۰۰۲ به بعد به‌منظور شبیه‌سازی سیل و مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژی در حال استفاده بوده است (Liu et al., 2003). مدل در بررسی تأثیر کاربری زمین بر سیل (Bahremand et al., 2007; Liu et al., 2005)، 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 (Liu et al., 2005; Zeinivand, 2009). اجرای مدل WetSpa در دو محیط نرم‌افزاری ArcView و Fortran انجام می‌گیرد. اخیراً به دلایلی که در این مقاله به آن‌ها اشاره خواهد شد، مدل WetSpa در محیط برنامه‌نویسی Python که دارای قابلیت‌های زیادی می‌باشد، توسعه داده شده است. مقایسه دو مدل WetSpa و WetSpa-Python توسط Bahremand et al. (2017) کارآیی بالای مدل جدید کدنویسی شده را نشان داد که کاهش پیچیدگی‌های مدل و منبع باز بودن آن موجب ایجاد فرصت مناسبی برای کاربر شده است، تا بتواند به‌راحتی آن را توسعه دهد. Bahremand et al. (2020) تخصیص پارامترهای مدل Wetspa-Python را برای شبیه‌سازی جریان مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که شناخت فیزیک حوضه آبخیز و همچنین ارتباط بین ویژگی‌های حوضه آبخیز و پارامترهای مدل، نیاز به واسنجی مدل را محدود می‌کند. Zarghi et al. (2021) در پژوهشی تحت عنوان کاربرد تخصیص پارامتر در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از مدل توزیعی فیزیکی MIKE SHE پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از رویکرد تخصیص پارامتر بر مبنای معیارهای کارایی ناش ساتکلیف (Nash-Sutcliffe, 1970) (NSE) و کلینگ گوپتا (KGE)، جهت شناخت بهتر حوضه آبخیز و پارامترهای مدل منجر به ایجاد نتایج قابل قبول براساس منطق و استدلال شده و نیاز به واسنجی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد، زیرا منجر به کاهش زمان واسنجی می‌شود. در مقاله حاضر، ضمن شرح مختصر مدل اصلی WetSpa، نسخه جدید آن به نام WetSpa-Python معرفی می‌گردد. این مدل که بر اساس رویکرد مدل‌سازی انعطاف‌پذیر تهیه شده و با زبان برنامه‌نویسی پایتون مجدداً کدنویسی شده است، جهت شبیه‌سازی هیدروگراف روزانه رودخانه چهل‌چای استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز مورد مطالعه (شکل ۱) با مساحت ۱۵۲۶ کیلومترمربع یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز بزرگ گرگانرود در شمال شرق ایران در استان گلستان می‌باشد؛ و در محدوده شهرستان‌های مینودشت، آزادشهر و گنبد کاووس قرار دارد. حداقل ارتفاع از سطح دریا ۲۷ متر و حداکثر آن ۲۸۸۹ متر است. متوسط بارش سالانه حوضه آبخیز در دوره آماری ۱۰ ساله مورد مطالعه (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۹۴-۹۳) ۴۱۹ میلی‌متر، متوسط تبخیر سالانه ۱۱۰۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۷ درجه سانتی‌گراد است.

۲-۲- توصیف مدل اصلی WetSpa

مدل WetSpa (انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر) یک مدل بارش–رواناب توزیعی و فیزیکی پیوسته مبتنی بر GIS برای شبیه‌سازی در مقیاس حوضه آبخیز است، که به زبان برنامه‌نویسی فورترن نوشته شده است (Salvadore et al., 2015).

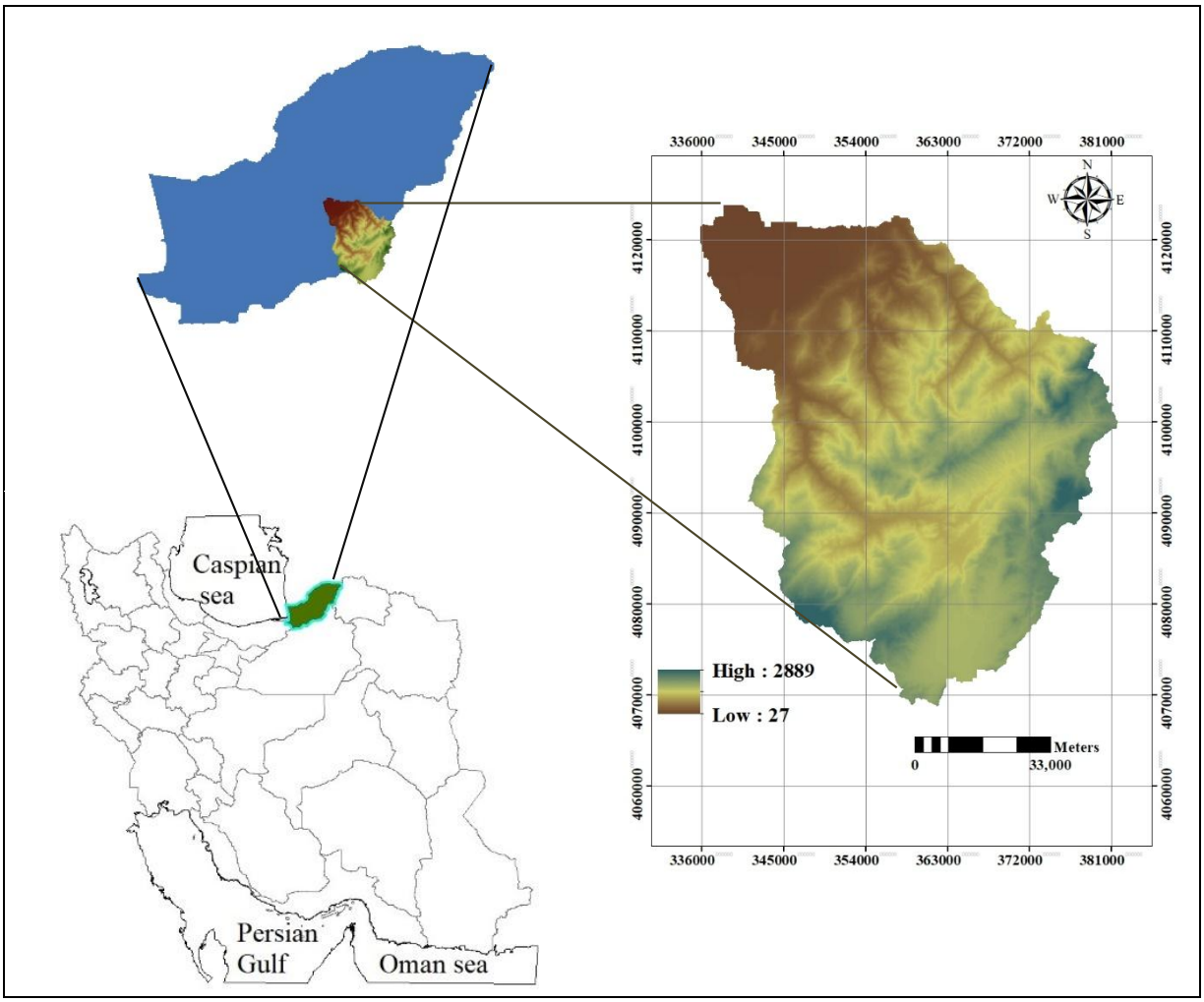


Fig. 1- Location of the study area

شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز مورد مطالعه

مدل می‌تواند فرآیندهای هیدرولوژیکی برگاب، ذخیره گودالی، تبخیر و تعرق، رواناب، جریان زیرسطحی، تغذیه آب زیرزمینی و جریان آب زیرزمینی (در سطح زیرحوضه)، را در سطح سلولی شبیه‌سازی نماید (شکل۲). ورودی‌های مدل عبارتند از: ۱- سری‌های زمانی بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و دما، که با روش پلیگون‌های تیسن در سراسر آبخیز 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 در خروجی حوضه آبخیز و زیرحوضه‌ها، نقشه‌ها و مؤلفه‌های جریان‌های اصلی آب برای هر گام زمانی و مؤلفه‌های بیلان آب (Salvadore et al., 2012).

۲-۳- مدل WetSpa-Python

مدل شیءگرا، مدولار و فرآیندمحور WetSpa-Python بر مبنای معادلات مدل اصلی WetSpa توسعه یافته است. در این نسخه، هر فرآیند هیدرولوژیکی در یک ماژول مجزا کدنویسی شده و کد آن در یک پوشه مجزا ذخیره شده است که ورودی‌ها و خروجی‌های آن گروه‌بندی شده‌اند. در ساختار جدید سه بخش اصلی مشخص شده است (شکل۲): ۱) یک بخش پیش‌پردازش برای تهیه نقشه‌های SGI؛ ۲) یک کلاس واحد برای نمایش حوضه آبخیز، که به شکل سلولی یا بر مبنای اجزای فیزیکی توصیف می‌شود؛ و ۳) یک کلاس کنترل مدل، که ورودی‌ها و خروجی‌ها را سازماندهی می‌کند (Salvadore et al., 2012). این مدل به‌وسیله دو مؤلفه پیش‌پردازش و یک سری مؤلفه‌های فرآیندمحور ساخته شده است. مؤلفه‌های پیش‌پردازش

به‌عنوان مؤلفه‌های استاتیک چارچوب تجمیع شده‌اند و در ابتدای شبیه‌سازی به‌طور اتوماتیک اجرا می‌شوند، که شامل برآوردکننده نقشه‌های پارامتر (پارامترهای توزیعی مدل) مبتنی بر GIS و IUH معمول می‌باشند. مؤلفه‌های فرآیندمحور مدل، شامل ۱۳ مؤلفه دینامیک استاندارد است که ۱۱ مورد از آنها فرآیندهای هیدرولوژیکی را نمایش می‌دهند و دو مورد باقی‌مانده، بیلان آب در مقیاس آبخیز را محاسبه و سری‌های زمانی خروجی‌ها را تهیه می‌کنند (Salvadore et al., 2012). نقشه‌های ورودی مدل به فرمت PCRaster شامل توپوگرافی، تیپ خاک و کاربری اراضی؛ و داده‌های هواشناسی به فرمت .tss برای شبیه‌سازی دینامیک شامل سری‌های زمانی بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل است. مهم‌ترین خروجی‌های توزیعی مکانی مدل شامل نقشه‌های جهت و طول جریان، حداقل و حداکثر گنجایش برگابی، ذخیره چالابی، پلیگون‌های تیسن (برای بارش و تبخیر)، ضریب مانینگ، ضریب رواناب پتانسیل، شعاع هیدرولیکی، سرعت متوسط جریان و زمان پیمایش از هر سلول تا خروجی حوضه آبخیز (t_0) است.

هر دو نسخه مدل، علاوه بر پارامترهای توزیعی (به‌صورت نقشه) که توسط مدل از روی نقشه‌های پایه محاسبه می‌شوند و کالیبره نمی‌شوند، دارای هشت پارامتر گلوبال یا کلی نیز می‌باشد که این پارامترها عمدتاً فاکتور تصحیح بوده و یا به‌طور منطقی و استدلالی قابل تعیین می‌باشند (Bahremand, 2016; Bahremand et al., 2020; Zarghi et al., 2021) 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).

۲-۴- مزایای مدل WetSpa-Python نسبت به مدل اصلی WetSpa

مزایای مدل WetSpa-Python در مقایسه با مدل WetSpa در جدول ۱ بیان شده است (Salvadore et al., 2012)، که این مدل جدید را جایگزین مناسبی برای استفاده در مدل‌سازی‌های هیدرلوژیکی نموده است.

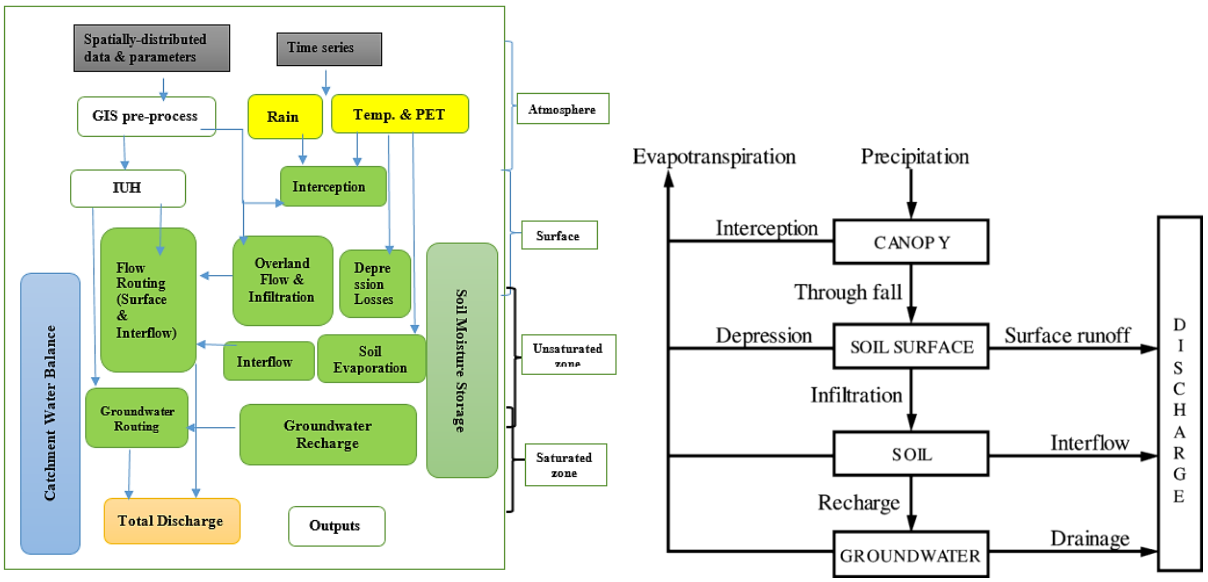
۲-۵- تهیه ورودی‌های مدل

سه نقشه رقومی ارتفاع، تیپ خاک و کاربری اراضی مربوط به حوضه آبخیز 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 فرمت map تبدیل شدند (شکل۳). از داده‌های ۵ ایستگاه هواشناسی برای تهیه سری‌های زمانی دما و تبخیر و تعرق پتانسیل؛ و از داده‌های ۹ ایستگاه برای تهیه سری‌های زمانی بارش در یک دوره آماری ده ساله (سال آبی ۸۵-۸۴ تا ۹۴-۹۳) استفاده گردید (جدول۲). این سری‌های زمانی برای ورود به مدل به فرمت .tss تبدیل شدند.

Table 1- Comparison of WetSpa and WetSpa-Python models

جدول ۱- مقایسه دو مدل WetSpa و WetSpa-Python

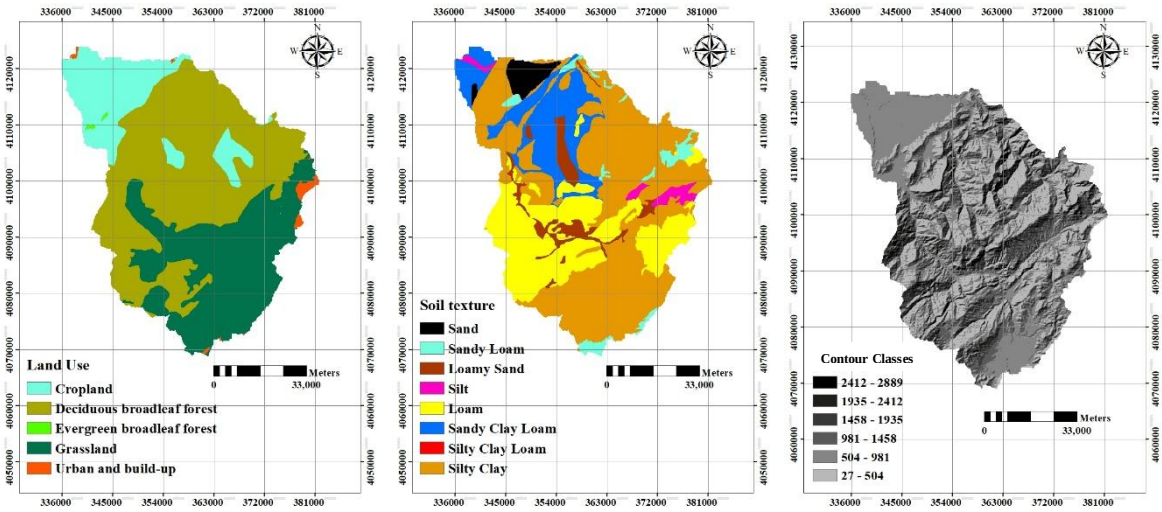
ردیف	مدل WetSpa-Python	مدل WetSpa
۱	فرآیندهای هیدرولوژیکی کد مجزایی دارند و به‌راحتی از فرآیند مدل‌سازی قابل حذف یا اضافه شدن هستند (ساختار انعطاف‌پذیر).	فرآیندها در یک اسکریپت (کدنوشته) منفرد فورترن کدبندی شده‌اند و دستورات محاسباتی آن‌ها به‌راحتی قابل تغییر نیست (فقدان انعطاف‌پذیری).
۲	اجرای مؤلفه‌های مدل با گام‌های زمانی ویژه خودشان و بر طبق داده‌های در دسترس و مقیاس فیزیکی فرآیند.	گام زمانی شبیه‌سازی نمی‌تواند کم‌تر از یک ساعت باشد.
۳	امکان محاسبه دقیق‌تر مؤلفه جریان آب زیرزمینی با تلفیق روش مخزنی و Modflow فراهم شده است.	جریان آب زیرزمینی در سطح یک زیر حوضه با استفاده از روش مخزن (خطی/غیرخطی) محاسبه می‌شود که توزیع مکانی سفره آب زیرزمینی نمی‌تواند پیش‌بینی شود.
۴	افزایش انعطاف‌پذیری مدل، اجازه فرموله کردن فرضیه‌ها با توجه به اثر هیدرولوژیکی فرآیندهای مختلف بر کل سیستم را می‌دهد.	بر مبنای فرض مدل، سفره آب زیرزمینی همیشه زیر لایه غیراشباع قرار دارد؛ این امر استفاده از مدل را در مناطق تالابی کم‌تر مناسب می‌سازد.
۵	طراحی ماژول مشخصی برای شبیه‌سازی سیلاب شهری و تعریف سیستم فاضلاب شهری و کانال‌های مصنوعی؛ این مدل یک مدل تغییر دینامیک کاربری زمین تلفیق شده است که برای بررسی توسعه شهری، مدل را بسیار توانمند کرده است.	بخش نفوذناپذیر به‌عنوان درصدی از کلاس کاربری زمین شهری توسط کاربر تعریف می‌شود، که ممکن است وضعیت واقعی را منعکس نکند.



(b) ب (a) الف

Fig. 2- Structure of WetSpa model (a) and structure of WetSpa-Python model at a pixel cell level

شکل ۲- ساختار مدل WetSpa (الف) و ساختار مدل WetSpa-Python (ب) در سطح یک سلول



(c) ج (b) ب (a) الف

Fig. 3- Maps of Digital Elevation Model (a), soil texture (b) and use land (c) of the case study

شکل ۳- نقشه‌های رقومی ارتفاع (الف)، بافت خاک (ب) و کاربری اراضی (ج) حوضه آبخیز مورد مطالعه

Table 2- Meteorological stations used in this study

جدول۲- ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق

No.	Station	UTM		Sea Level(m)	Data used		
		X	Y		Rainfall	Temp.	ETP
1	Gonbad	340877	4126851	37	❋	❋	❋
2	Arazkouse	336111	4121413	35	❋	❋	❋
3	Minodasht	356051	4121328	155	❋	❋	❋
4	Narab	374176	4097435	1500	❋	❋	❋
5	Gheshlagh	350657	4085837	1040	❋	❋	❋
6	Azadshahr	337905	4107122	183	❋	–	–
7	Dozin	374306	4110440	1007	❋	–	–
8	Gharecheshme	345982	4113299	80	❋	–	–
9	Vamenan	371455	4096634	1373	❋	–	–

۲-۶- اجرای مدل

پس از آماده‌سازی ورودی‌های مدل، در ابتدا نقشه‌های پارامترهای توزیعی به‌وسیله مؤلفه پیش‌پردازش GIS مدل، به‌طور خودکار به فرمت 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 ارازکوسه واقع در خروجی حوضه آبخیز مورد مطالعه استفاده گردید. واسنجی مدل با تعیین مقادیر ۸ پارامتر گلوبال (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 حوضه آبخیز مورد مطالعه وجود داشت، مقدار اولیه مناسب برای پارامترها مشخص شود و سپس این مقادیر با یک کالیبراسیون محدود تعدیل شدند. از میان هشت پارامتر مدل سه پارامتر Kg، Kep و G. 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 G. با مطابقت دادن آب پایه در کل دوره شبیه‌سازی و بررسی مؤلفه‌های مشاهداتی بیلان آب حوضه آبخیز (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 گلوبال (کلی) به‌دست آمده در مرحله واسنجی انجام شد. لازم به ذکر است این نسخه از مدل در حال توسعه است و نسخه مقدماتی آن در اختیار ما بود. 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.

۲-۷- ارزیابی مدل

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

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

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

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 نش -ساتکلیف دارای مزایایی می باشد که توسط (Gupta et al., 2009) شرح مفصل آن ارائه شده است.

۳- نتایج

پس از آماده‌سازی ورودی‌های مدل، نقشه‌های پارامترهای توزیعی که در گام اول توسط مؤلفه پیش‌پردازش GIS تولید می‌شوند شامل نقشه جهت جریان، تجمع جریان، شبکه آبراهه‌ها، رتبه آبراهه‌ها، نقشه شیب، توزیع شعاع هیدرولیکی، نقشه زیرحوضه‌ها، هدایت هیدرولیکی، پروزیته، ظرفیت مزرعه، رطوبت باقیمانده خاک، نقطه پژمردگی، عمق

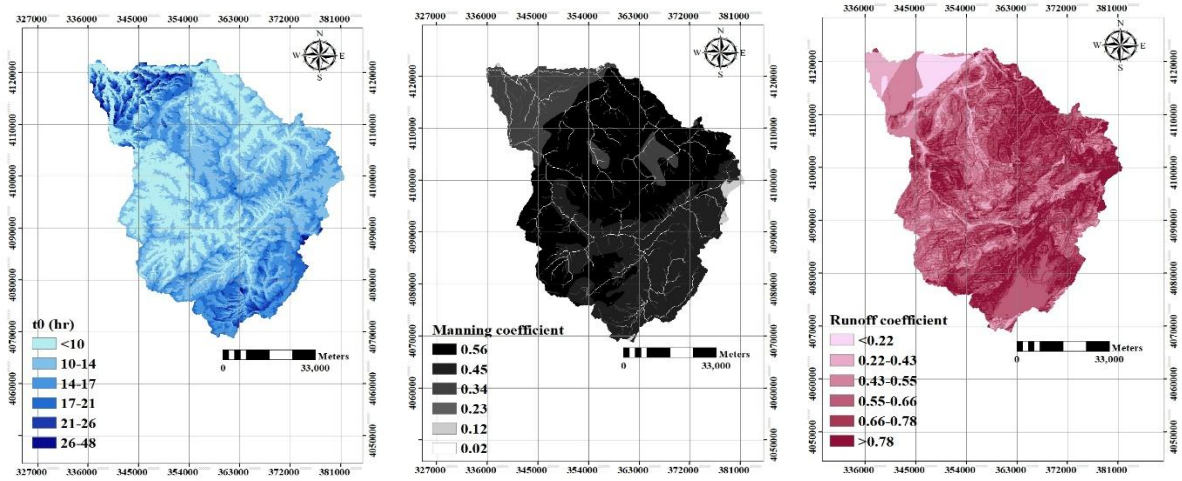
ریشه، حداقل و حداکثر ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، ضریب زبری مانینگ، ضریب رواناب پتانسیل، زمان جریان و نقشه پلیگون‌های تیسن می‌باشد. نتایج نشان داد که متوسط ضریب رواناب پتانسیل حوضه ۵۵ درصد و زمان تمرکز حوضه ۴۸ ساعت می‌باشد. شکل ۴ نقشه‌های ضریب زبری مانینگ، ضریب رواناب پتانسیل حوضه و زمان پیمایش جریان را در هر شبکه سلولی نشان می‌دهد.

واسنجی مدل با تعیین مقادیر ۸ پارامتر گلوبال (کلی) مدل به‌صورت دستی صورت گرفت به نحوی که بهترین انطباق بین هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به‌دست آید. در این مورد سعی شد، مطابق شیوه شرح داده شده در قسمت‌های قبل این مقاله، پارامترها به‌صورت منطقی و استدلالی ابتدا تخصیص داده شدند (Bahremand, 2016) و سپس برای انطباق بیش‌تر با هیدروگراف مشاهداتی تعدیل شدند (کالیبراسیون محدود). نتایج تعیین مقادیر ۸ پارامتر گلوبال (کلی) مدل که در مرحله واسنجی به‌دست آمدند در جدول ۳ آمده است.

مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای در مرحله واسنجی، به صورت نمودار پراکنش نقطه‌ای و سری زمانی در شکل ۵ 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 گلوبال به‌دست آمده در مرحله واسنجی انجام شد که نتایج مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در مرحله اعتبارسنجی در شکل ۶ آمده است.

فایل‌های خروجی مدل شامل بیلان آبی حوضه آبخیز، جریان سطحی، جریان زیرقشری، جریان پایه و جریان کل در هر گام زمانی است. بر اساس نتایج حاصل از خروجی مدل، در دوره واسنجی ۱۳/۲ درصد از بارش تبدیل به رواناب می‌شود که از این میزان ۲/۷ درصد مربوط به رواناب سطحی، ۳/۷ درصد جریان زیرقشری و ۶/۸ درصد مربوط به تخلیه آب زیرزمینی (جریان پایه) می‌باشد. در دوره اعتبارسنجی سهم کل رواناب از بارش برابر ۱۸/۱ درصد به‌دست آمده است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی مدل، نسبت تبخیر به بارش را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۸۵/۳ و ۷۹/۳ درصد نشان می‌دهد. شکل ۷ مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی را نسبت به بارندگی نشان می‌دهد.

نتایج ارزیابی مدل بر اساس شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) در جدول ۴ آمده است. ارزیابی مدل بر اساس شاخص مذکور، مقدار ۰/۶ برای دوره واسنجی و ۰/۵۲ را برای دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد.



ج (c) ب (b) الف (a)

Fig. 4- Maps of potential runoff coefficient (a), Manning coefficient (b) and travel time (c) of the case study

شکل ۴- نقشه‌های ضریب رواناب پتانسیل (الف)، ضریب زبری مانینگ (ب) و زمان پیمایش جریان (ج) حوضه آبخیز مورد مطالعه

Table 3- Assigning values of 8 global parameters in the calibration period

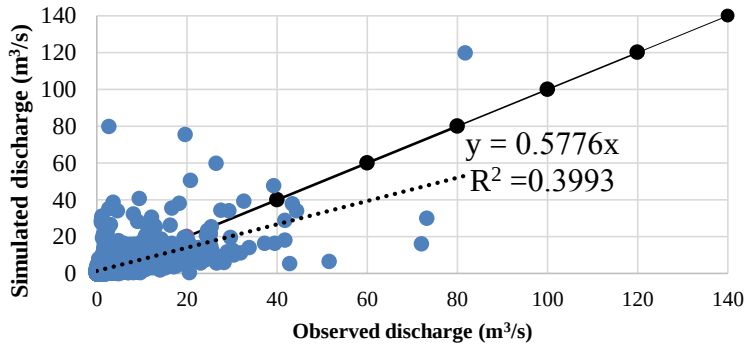
جدول ۳- تعیین مقادیر ۸ پارامتر گلوبال (کلی) مدل در مرحله واسنجی

Parameter	Symbol	Unit	Value
Correction factor for PET	K_{ep}	-	0.9
Actual runoff coefficient correction factor	K_{run}	-	7
Rainfall intensity scaling factor	P_{max}	$mm.h^{-1}$	75
Initial soil moisture correction factor	K_{ss}	-	0.1
Interflow scaling factor	K_i	-	6
Initial groundwater storage parameter	G_0	mm	130
Baseflow recession coefficient	K_g	d^{-1}	0.0000122
Groundwater storage scaling factor	G_{max}	mm	380

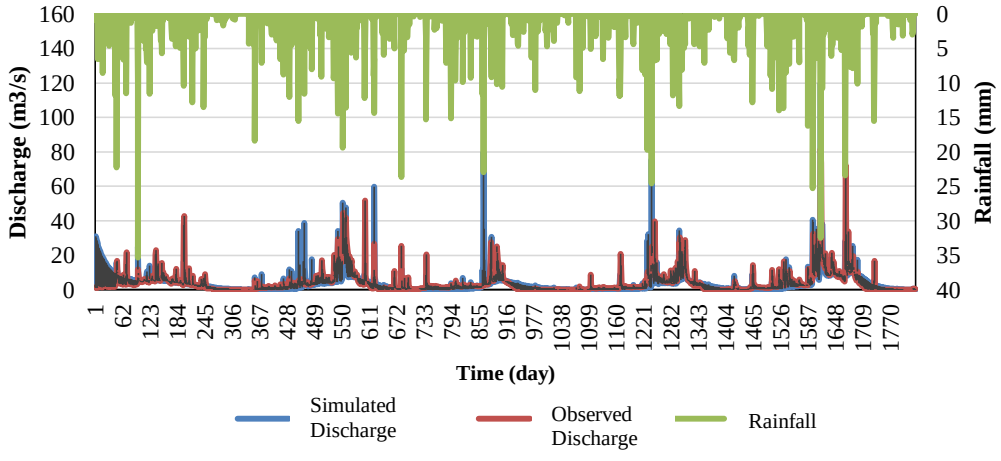
Table 4- Results of model evaluation in calibration and validation periods

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

period	r	α	β	KGE
Calibration period	0.6	1	0.97	0.6
Validation peroid	0.57	1.03	1.21	0.52



(a) الف



(b) ب

Fig. 5- Comparison between observed and simulated daily discharges (a) scatter plot with 1:1 line and (b) time series

شکل ۵- مقایسه بین دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی (الف) نمودار پراکنش نقاط نسبت به خط ۱:۱ و (ب) سری زمانی

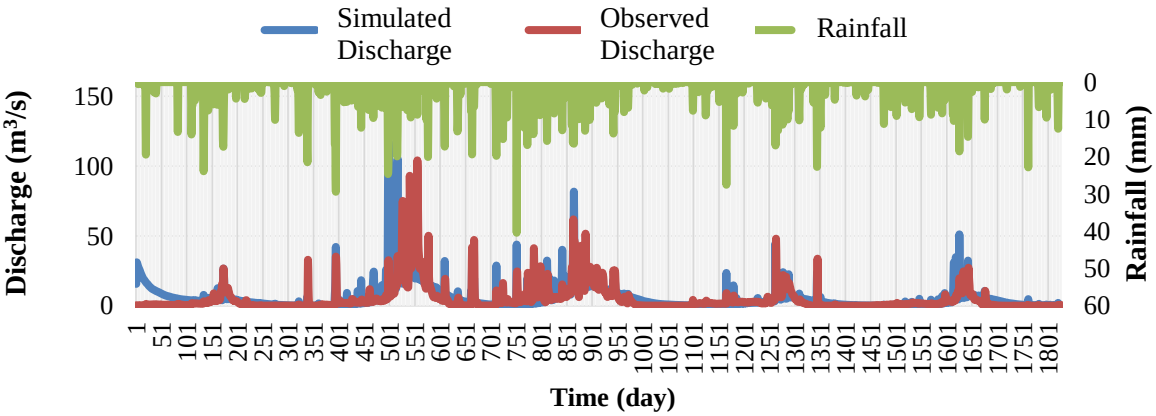


Fig. 6- Comparison between observed daily discharge and simulated in validation

شکل ۶- مقایسه بین دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط مدل در دوره اعتبارسنجی

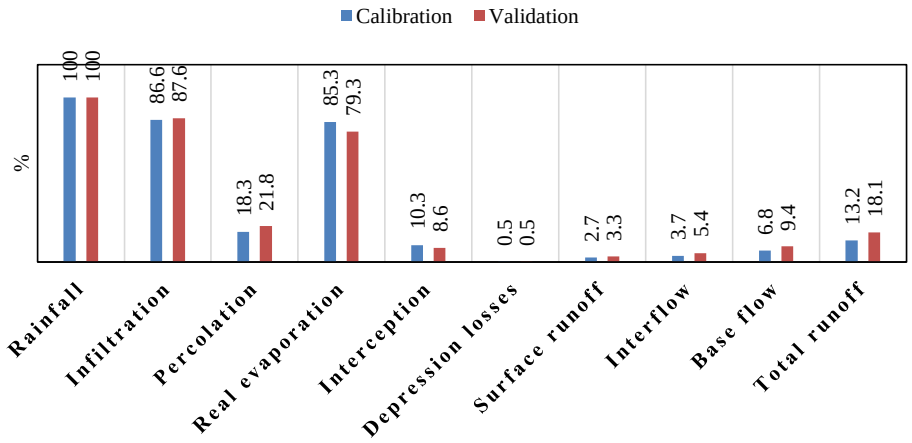


Fig. 7- Water balance components calculated by model in relation to rainfall

شکل ۷- مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه شده توسط مدل نسبت به بارندگی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کارآیی مدل مبتنی بر فیزیک و فرآیندمحور WetSpa-Phyton به‌منظور شبیه‌سازی جـریان روزانه رودخانه چهل‌چای در محل ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه پرداخته شد. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای نشان می‌دهد که مدل کارایی نسبتاً مناسبی در شبیه‌سازی جریان روزانه 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 حوضه آبخیز، 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 (Jaroslaw et al., 2011) 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 ۱۳/۲ و ۱۸/۱ درصد از کل بارش را به خود اختصاص داده است که با توجه به کاربری عمده جنگل و مرتع در حوضه آبخیز منطقی به نظر می‌رسد. لحاظ نکردن شبیه‌سازی برف از نقاط ضعف نسخه پایتون مدل می‌باشد، که پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده مدلسازی برف نیز صورت پذیرد.

۵- سپاسگزاری

از الگا سالوادوره محقق دانشگاه VUB بروکسل که نسخه مقدماتی مدل WetSpa-Phyton را در اختیار ما قرار داده تا بتوانیم این تحقیق را انجام دهیم، تشکر می‌کنیم.

۶- مراجع

Bahremand A, Ahmadyousefi S, Sheikh V, Komaki CB (2020) A parameter allocation approach for flow simulation utilizing the WetSpa-Python model. Hydrological Processes 35(1):1-18

Bahremand A (2016) HESS opinions: Advocating process modeling and de-emphasizing parameter estimation. Hydrology and Earth System Sciences 20(4):1433-1445

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) WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany–Hornad watershed, Slovakia. Water Resources Management 21(8):1373-1391

Bahremand A and De Smedt F (2008) ,Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa Watershed Slovakia. Water Resources Management 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)

Fenicia F, Kavetski D, and Savenije HG (2011): Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling Motivation and theoretical development.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

Jarosław 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 University of Life Sciences-SGGW. LandReclamation 43(1):25-35

Liu YB, Gebremeskel S, De Smedt F, Hoffmann L, and Pfister L (2003) A diffusive transport approach for flow routing inGIS-based flood modeling. Journal of Hydrology 283(1):91-106

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

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

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 review and futuredirections. Journal of hydrology 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

Zarghi A, Bahremand A, and Sheikh V (2021) Application of parameter allocation approach in hydrological modeling with MIKE SHE distributed-physical model (Case study: Ziarat watershed, Golestan province). Iranian Water Resources Research 16(4):174-189 (In Persian)

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

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