Simulation of water balance components using TOPKAPI-X distributed hydrological model (Case study: Kashkan basin)

ABSTRACT

Considering the importance of knowing and awareness of the watersheds water balance status, and analyzing the hydrological behavior of watersheds for planning and implementing water-related projects, the need to use new technologies in predicting water balance components is more evident than ever. Based on this, in the Kashkan watershed by utilizing the TOPKAPI-X hydrological model, the water balance components of the basin were simulated according to the cellular network design. Digital maps of the basin, land use, outlet point, soil texture, elevation, and continuous time series of temperature, precipitation, and discharge in the daily time step are the main inputs of the model. The model in each cell network balances the water balance of the entire period . Model calibration was done for the 15 years of the statistical period (1999 to 2014) and model validation for the 6-year period (2014 to 2020). The results showed that 27.٠2 and 28.43 percent of the total precipitation of the Kashkan basin was discharged from the basin as total runoff (respectively for calibration and validation periods), which is consistent with the observation data at the outlet hydrometry station. Next, to evaluate the efficiency of the model, the simulated values in both statistical periods were compared to the observational discharge. Statistical methods such as the Nash-Sutcliffe evaluation criteria showed that the TOPKAPI-X model predicted the water balance components such as actual and potential evapotranspiration, infiltration, and the amount of runoff, especially the total runoff, in this basin with relatively good accuracy (coefficient above 60%).

Keywords: *Spatially distributed model, flow simulation, Karkheh basin, TOPKAPI-X.*

بارگذاری نشده

شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آبی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی TOPKAPI-X (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کشکان)

چکیده

با توجه به اهمیت شناخت و آگاهی از وضعیت بیلان آبی حوزه‌های‌آبخیز و تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها، برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مرتبط با آب، لزوم استفاده از فناوری‌های نوین در پیش‌بینی مولفه‌های بیلان آبی بیش از پیش مشهود است. بر این اساس در حوزه‌آبخیز کشکان با بکارگیری مدل هیدرولوژیکی TOPKAPI-X مولفه‌های بیلان آب حوضه بر اساس طراحی شبکه سلولی شبیه‌سازی گردید. نقشه‌های، کاربری اراضی، نقطه خروجی، بافت خاک، مدل ارتفاعی رقومی و سری‌های زمانی پیوسته دما، بارش و دبی در گام زمانی روزانه ورودی‌های اصلی مدل می‌باشند. مدل در هر شبکه سلولی با توجه به پارامترهای موثر در بیلان آبی، موازنه بیلان آبی کل دوره را برقرار می‌نماید. واسنجی مدل برای ۱۵ سال ابتدایی دوره آماری (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴ میلادی) و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۶ ساله انتهایی (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰میلادی) لحاظ شده است. بر طبق نتایج شبیه‌سازی ۲۷/۰۲ و ۲۸/۴۳ درصد کل بارش حوضه کشکان بصورت رواناب کل از حوضه خارج شده (به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی) که با داده مشاهداتی در ایستگاه آبسنجی خروجی حوضه مطابقت دارد. در ادامه برای ارزیابی کارایی مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده در هر دو دوره آماری با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش و دبی مورد مقایسه قرار گرفت. روش‌های آماری همانند معیار ارزیابی ناش– ساتکلیف نشان داد مدل TOPKAPI-X با دقت نسبتا خوبی (ضریب بالای ۶۰ درصد) مولفه‌های بیلان آبی نظیر تبخیر واقعی و پنانسیل، نفوذ و مقدار رواناب خصوصا رواناب کل را در این حوضه پیش‌بینی نمود.

کلیدواژه‌ها: *مدل توزیعی مکانی، شبیه سازی جریان، حوزه آبخیز کرخه، TOPKAPI-X.*

ویرایشاری نشده

Extended Abstract

Introduction

Hydrological models are a simplified representation of the real hydrological system, which help to study the functioning of the basin in response to various inputs and to better understand the hydrological processes. The use of models to estimate the annual runoff of watersheds in arid and semi-arid areas without hydrometry stations has been of interest to hydrology researchers for a long time. For this purpose, in this research, after introducing the capabilities of TOPKAPI-X as a hydraulic-hydrological model (which has not been applied by the researchers in Iran so far), the precipitation-runoff processes of Kashkan basin in the environment TOPKAPI-X has been modeled to simulate the flood flow process. According to the review of scientific sources, it was found that the TOPKAPI-X is a model with a high capability for simulating the flow rate and water balance, and the efficiency of this model has not been evaluated in the Kashkan basin.

Material and methods

The studied area of this research is the Kashkan subbasin of the Karkhe river basin. The TOPKAPI-X model is a type of continuous and distributed runoff precipitation model that has been successfully implemented as a research and operational hydrological model in many basins in the world (Liu and Todini, 2002). This model consists of five main modules that simulate hydrological processes including subsurface flow, underground flow, channel flow, evaporation and transpiration, and snow. This model can simulate in minute, hourly, or daily time steps.

In this model, continuous time series data were considered in daily time step. The time series of daily precipitation during the statistical period, including the daily rainfall of 19 stations, during the statistical period of 1999 to 2020 was used to simulate the flow. After running the model several times, the general parameters of the model were manually changed each time, until their optimal values were obtained by considering the appropriate values of the evaluation criteria (NS and Bias). Finally, after the calibration of the model, a six-year period (2014-2020) has been considered as the model validation.

Results

In this research, to simulate the daily flow and determine the water balance of the basin, all the components of the water balance such as precipitation, snowmelt, surface runoff, infiltration, evapotranspiration, deep infiltration, and subsurface flow were simulated.

The results of the comparison of hydrographs during the peak flows show the good efficiency of the model. Also, visual comparison of the observed and simulated hydrographs show that the time to peak in two hydrographs is the same, and have occurred in one day. According to the Nash-Sutcliffe criterion, the efficiency of the model in estimating the flow rate in the two periods of calibration and validation is 61.9% and 61.7%, respectively, in the Kashkan basin. The results of calibration and validation showed that the validation results of the model were somewhat weaker than the calibration results, which are consistent with the findings of Crook et al. (2005) and Ravasuka et al. (2014). In general, in some parts of the statistical period, the results of the model were satisfactory, and in some periods, the simulation process was weak. This issue can be related to the sensitivity of the model to the length of the calibration period

(Zarei et al. 2012; Crook et al. 2005) and the error related to the mathematical structure of the model (Molehi et al. 2006). The effectiveness of this model in simulating the flow is consistent with the results of Liu et al. (2009), Vischel et al. (2008), Kasia et al. (2009), Sinclari et al. (2013), and Janabi et al. (2015).

Conclusion

Today, it is possible to estimate the various components of the water balance using distributed hydrological models. In this research, the surface runoff and water balance components of the basin were obtained based on model effective parameters in the daily time step with appropriate accuracy, and the initial hydrograph of the runoff was extracted. In the calibration stage, to improve the simulation and better match between the observed and simulated discharges, the model's effective parameters were calibrated. The studied area had different land use and soil types. In general, the TOPKAPI-X model showed relatively good performance for the studied basin. Also, the results of this research can be used for studies, especially hydrology studies, natural resources management and planning, environment and water resources.

نسخه اولیه

مقدمه

مدیریت منابع آب خصوصا در حوضه‌های بدون آمار، نیازمند شناخت فرآیندهای هیدرولوژیکی بویژه رواناب بعنوان یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین بخش‌های چرخه هیدرولوژیکی است. در این خصوص مدل‌های هیدرولوژی نمایش ساده شده‌ای از سامانهٔ هیدرولوژی واقعی هستند که به بررسی کارکرد حوضه در پاسخ به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند. استفاده از مدل‌ها در برآورد رواناب سالانه حوزه‌های‌آبخیز بدون ایستگاه آبسنجی، از قدیم مورد توجه محققین هیدرولوژی بوده است. مدل‌های توسعه داده شده حاصل تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به یک منطقه با شرایط خاص جغرافیایی بوده و برای تعمیم به سایر مناطق نیاز به واسنجی دارند. باتوجه به وجود تنوع در مدل‌های بارش – رواناب، انتخاب یک مدل مناسب بارش – رواناب برای حوضه به منظور بهره‌وری؛ برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب لازم است. تاکنون مدل‌های شناخته شده‌ای نظیر WetSpa, TOPKAPI-X و SWAT توسط دانشمندان هیدرولوژی ارائه شده‌اند (Zeinivand & De Smedt, 2009). مطالعات بیلان آب، یکی از ارکان مدیریت و سیاستگذاری در مدیریت منابع آب و ابزاری برای ارزیابی کمی ذخایر منابع آب در حوضه و تغییرات این منابع در اثر فعالیتهای انسانی است. در حال حاضر برای محاسبه ی بیلان در ایران مشکلاتی وجود دارد. پرهزینه و زمان بر بودن تأمین داده های موثق برای برآورد بسیاری از مؤلفه های بیلان (در سطح حوضه) و اتکا به روش های تجربی (تخمینی) برای برآورد این مؤلفه ها، و از طرفی نبود روشهای تجربی واسنجی شده و بومی برای برآورد دقیقتر عوامل بیلان برخی از این مشکلات است (رضوی کهنموئی و همکاران، ۱۳۹۸). در شبیه‌سازی وضع هیدرولوژی، مؤلفه‌های بیلان آبی مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار می‌گیرند (Hughes et al., 2013). در حوزه‌های‌آبخیز کشور ایستگاه‌هایی که تغییرات تمام مؤلفه‌های بیلان آبی روزانه، ماهانه و حتی سالانه را اندازه گیری کنند، وجود ندارد و از طرفی به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در این حوزه‌ها نیاز است که آمار و اطلاعاتی از مقادیر این مؤلفه‌ها در دسترس باشد. بنابراین ضرورت آگاهی از وضعیت بیلان آبی حوزه‌های آبخیز مختلف برای اجرای طرح‌های آبی از یک‌طرف و عدم وجود تشکیلات منسجمی به منظور ثبت تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز کشور، اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی حوزه‌های آبخیز به ویژه در مقیاس زمانی کوتاه را بیش از پیش آشکار می‌سازد (بیات و همکاران، ۱۳۹۸). قابل ذکر است، اولین مرحله در بهره‌برداری و مدیریت مناسب منابع آب، آگاهی از میزان ورودی و خروجی حوزه آبخیز یا همان منبع، مصرف و ذخیره آب است. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های

هیدرولوژیکی – توزیعی شبیه‌سازی دینامیکی مسائل هیدرولوژیکی از جمله بیلان آبی، در تصمیم‌گیری و ارائه راهکارهای مدیریتی، کاربرد فراوان دارند. مقدار و شدت رواناب در مقیاس حوزه با توزیع مکانی سطوح نفوذناپذیر– پوشش غالب سطح زمین در آبخیزهای شهری– در ارتباط نزدیک است و می‌تواند با مدل های هیدرولوژیکی– توزیعی مکانی برآورد شود (Batelaan et al., 2007).

مدل‌های بیلان آب متنوعی با تفاوت در پیچیدگی، دقت، نوع کاربرد و محاسبه اجزاء مؤلفه‌های بیلان آب در ادبیات فنی موجود وجود دارد. با استفاده از مدل توزیعی TOPKAPI-X می‌توان روشی با دقت و کارایی بالا به منظور برآورد دبی، نفوذ و تبخیر در حوزه‌های آبخیز دارای کمبود آمار و ایستگاه‌های آب سنجی ارائه داد. مدل TOPKAPI-X، توسط محققین در مناطق مختلف مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است (Peng et al., 2008).

استفاده از مدل TOPKAPI-X در مدل‌سازی حوزه‌آبخیز از جنبه‌های مختلف مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Liu et al., 2005؛ Vischel et al., 2008؛ Coccia et al., 2009؛ Sinclair et al., 2010). Janabi et al (2021)، از مدل‌سازی TOPKAPI-X برای شبیه‌سازی رخدادهای سیل تاریخی در آبخیزهای مقیاس کوچک استفاده کردند. همچنین شبیه‌سازی مولفه-های بیلان آبی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی – توزیعی مورد استفاده بسیاری از متخصصان در داخل و خارج از کشور قرار گرفته است (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۰؛ آرتیمانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Safari et al., 2009؛ Nguyen et al., 2019). Mimko et al (1992)، ابتدا مدل بیلان آبی حوزه مورد مطالعه را مشخص کرده و سپس با تغییر فرضی عوامل مختلف بیلان از قبیل بارش، تبخیر و تعرق و غیره به بررسی اثر تغییرات اقلیمی، روی مدیریت آب پرداختند. Wegehenkel et al (2004)، در یک حوزه‌آبخیز واقع در شمال شرقی کشور آلمان با استفاده از نقشه خاک، شبکه هیدروگرافی، مدل ارتفاعی رقومی، داده‌های سری زمانی هواشناسی و ۳ سال نقشه برداری از توزیع مکانی کاربری‌های مختلف در حوضه، اقدام به مدل‌سازی بیلان هیدرولوژیکی نمودند. مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۰)، به شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه‌آبخیز طالقان در استان تهران با استفاده از مدل WetSpa پرداخت. مدل براساس معیار کارایی نش– ساتکلیف با دقت ۸۴/۸۵ درصد مؤلفه‌های هیدرولوژیکی سیستم آبخیز را برآورد می‌کند. با مقایسه رواناب محاسبه شده توسط مدل ۷۷/۸۱ درصد و رواناب مشاهداتی ۷۵/۳۵ درصد می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز دارد.

حوزه آبخیز کشکان یکی از زیرحوضه‌های مهم و بحرانی از نظر تغییر کاربری، فرسایش و سیل‌خیزی در حوضه رودخانه کرخه در غرب کشور ایران است. عواملی طبیعی (شیب زیاد و سیل خیزی) و فعالیت انسانی (تغییر کاربری اراضی، استفاده نادرست از زمین و کشاورزی روی اراضی با شیب زیاد، چرای بی‌رویه دام و جاده‌سازی نادرست) موجب بروز انواع فرسایش، سیل و حرکات توده‌ایی در سطح این حوضه شده است. این حوضه در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات شدید شده که این استفاده نادرست از آبخیز سبب کاهش پوشش گیاهی و افزایش سرعت جریان و ضریب رواناب شده است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۹).

بدین منظور در این تحقیق پس از معرفی قابلیت‌های نرم افزار TOPKAPI-X به عنوان یک مدل هیدرولیکی–هیدرولوژیکی (که تاکنون در ایران مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته است)، به مدل‌سازی فرآیند بارش– رواناب حوزه آبخیز کشکان در محیط نرم افزار TOPKAPI-X به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند جریان سیلاب پرداخته شده است. با توجه به بررسی منابع علمی مشخص شد نرم‌افزار TOPKAPI-X یک مدل با توانایی بالا برای شبیه‌سازی دبی جریان و فرآیند بارش–رواناب است، و با توجه به اینکه کارایی این مدل در حوزه‌آبخیز کشکان مورد ارزیابی قرار نگرفته است، بدین منظور در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آبی حوزه آبخیز کشکان (در استان لرستان) بر اساس طراحی شبکه سلولی از مدل کاملاً توزیعی هیدرولوژیکی TOPKAPI-X استفاده شده است.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی مدل و روش کار

مدل TOPKAPI-X[1] که مخفف تقریب و ترکیب جنبشی و توپوگرافیکی توسعه یافته می‌باشد. از انواع مدل‌های بارش رواناب

[1] - TOPographic and Kinematic APproximation and Integration EXtended

توزیعی و پیوسته است که به‌عنوان یک مدل تحقیقاتی و هیدرولوژیکی عملیاتی در چندین حوزه‌آبخیز در جهان (ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، اوکراین، چین) با موفقیت اجراشده است (Liu and Todini, 2005). دراین مدل به لطف کارایی محاسباتی، می‌توان شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی را با گام زمان دقیقه‌ای تا روزانه و تفکیک مکانی مختلف انجام داد. در واقع هسته اصلی این مدل مبتنی بر ترکیب روش موج جنبشی[1] و خصوصیات توپوگرافی زیرحوزه می‌باشد. توزیع مکانی پارامترهای سطح زیرحوزه، ورودی‌های بارش و پاسخ‌گویی هیدرولوژیکی به‌صورت سطحی و از طریق شبکه‌بندی مثلثی برآورد می‌شود و محاسبات عمقی این مدل مربوط به لایه‌های خاک در هر پیکسل (پیکسل‌های مدل رقومی ارتفاعی) از منطقه موردمطالعه است. در طول شبیه‌سازی مدل، به هر پیکسل DEM یک مقدار برحسب خصوصیات فیزیکی داده می‌شود. در این پیکسل‌ها مقدار شیب و مسیر جریان برحسب پیکسل‌های مجاور یا همان الگوریتم D8 برآورد می‌شود (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶). حجم آب ذخیره‌شده خاک سطحی در لایه فوقانی خاک غیراشباع در این مدل از رابطه زیر (رابطه ۱) محاسبه می شود:

رابطه (۱)
$$\frac{dv_1}{dt} = (f_a x - q_{uo} + q_{us} - f_b x) - \frac{c_1}{x^{as}} v_1^{as}$$

که در آن: v_1 حجم آب ذخیره‌شده خاک سطحی؛ t زمان، f_a مقدار نفوذ به داخل پیکسل موردنظر، x اندازه پیکسل موردنظر، q_{uo} مقدار جریان سطحی ورودی از بالادست پیکسل موردنظر، q_{us} مقدار جریان زیر قشری ورودی به پیکسل مور نظر از سمت بالادست، f_b مقدار تراوش از خاک سطحی، c_1 بیانگر هدایت هیدرولیکی سلول موردنظر و در آخر پارامتر as یک ضریب توانی است که به خصوصیات خاک بستگی دارد.

روند یابی جریان داخل کانال‌ها همانند اجزای خاک بر اساس روش موج جنبشی است که در آن رابطه گشتاور با استفاده از رابطه مانینگ برآورد می‌شود. با انتگرال‌گیری رابطه موج جنبشی در بعد طولی به مدل مخزن غیرخطی برای جریان کانال و جریان روی زمینی می رسد (روابط ۲ و ۳):

رابطهٔ (۲)
$$\frac{dvo}{dt} = r_o x^2 - \frac{c_o x}{x^{10/3}} v_c^{5/3}$$

رابطهٔ (۳)
$$\frac{dv_c}{dt} = (r_c - xw + Q_{uc}) - \frac{c_c w}{(xw)5/3} v_c^{5/3}$$

در روابط فوق v_0 و v_c به ترتیب بیانگر حجم آب ذخیره‌شده در جریان سطحی و کانال است. همچنین شکل کلی رابطه مخزن غیرخطی در مدل مذکور به‌صورت رابطه (۴) است:

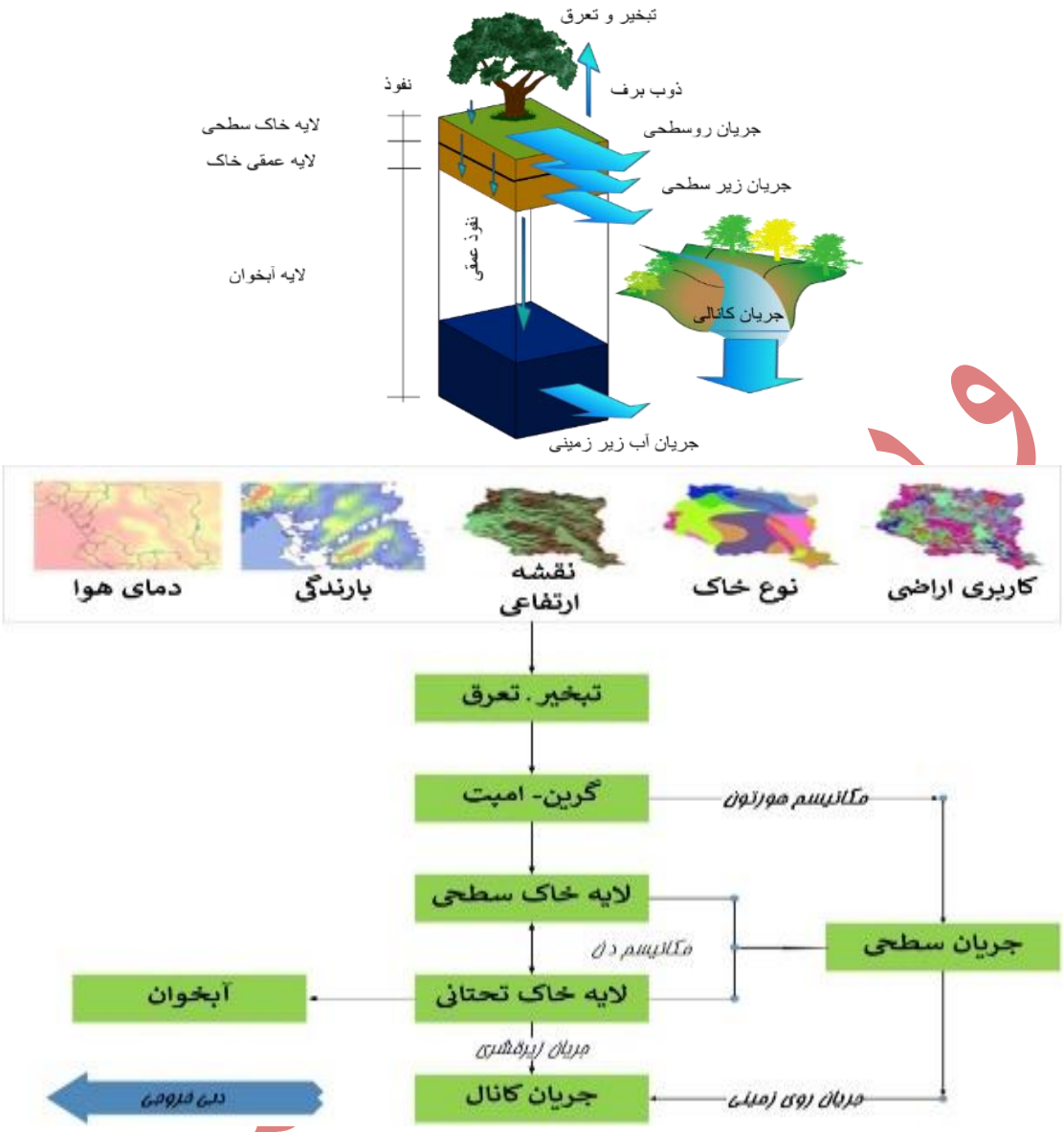
رابطهٔ (۴)
$$\frac{dv}{dt} = (a - bv^c)$$

v بیانگر متوسط محتوای رطوبتی خاک، حجم آب خاک در مخزن و عمق آب در طول شیب یا کانال و a و b و c ضرایب ثابت می‌باشند. بدیهی است که معادلات مربوط به مخزن غیرخطی می‌تواند به‌صورت عددی و با تخمین‌هایی حل شود. در این مدل، تقریب به‌صورت $v^c = v(a + bv)$ است که در این رابطه a و b را می‌توان با استفاده از روش‌های حداقل مربعات برآورد نمود.

مدل TOPKAPI-X از پنج ماژول اصلی تشکیل‌شده است که فرآیندهای هیدرولوژیکی جریان زیرسطحی، جریان زیرزمینی، جریان کانال، تبخیر و تعرق و برف را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در گام‌های زمانی دقیقه، ساعتی یا روزانه را دارد. در شکل (۱) نمودار جریانی مراحل اجرایی مدل TOPKAPI-X نمایش داده شده است.

[1] - Kinematic wave

ویراستاری نشده



شکل ۱– نمودار جریانی مراحل اجرایی مدل TOPKAPI-X (Andres et al., 2013)

شایان ذکر است که در این پژوهش برای اجرای مدل TOPKAPI-X ابتدا اطلاعات فیزیکی حوزه‌آبخیز از قبیل نقشه DEM، نقشه مرز زیرحوزه، موقعیت نقطه خروجی، نقشه تیپ خاک و نقشه کاربری اراضی وارد نرم افزار مدل به نام VISUAL TOPKAPI-X 2.0 می شود. مراحل تکمیل ورود اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی در مدل TOPKAPI-X بصورت زیر انجام می‌شود.

در ابتدا اطلاعات دما، جنس خاک، کاربری اراضی، مخزن یا دریاچه در منطقه مورد مطالعه، شبکه زهکشی حوزه (کانال‌ها)، جریان‌های ورودی به زیرحوزه، پارامترها و اطلاعات مربوط به آب زیرزمینی، پارامترهای مربوط به تبخیر و تعرق و ماژول‌های ذوب برف در صورت انتخاب، نقاط کنترلی در زیر حوزه (ایستگاه اندازه‌گیری انتخابی)، داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی (داده‌های بارندگی، دما و رواناب مشاهداتی یا نقشه‌های مرتبط) در اختیار مدل قرار خواهد گرفت.

سپس نسبت به شبیه‌سازی جریان در هر زیرحوزه و نقطه کنترلی مورد نظر در گام‌های زمانی روزانه اقدام شده و پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل ضرایب مربوط به پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل بهینه می‌شود.

منطقهٔ مورد مطالعه

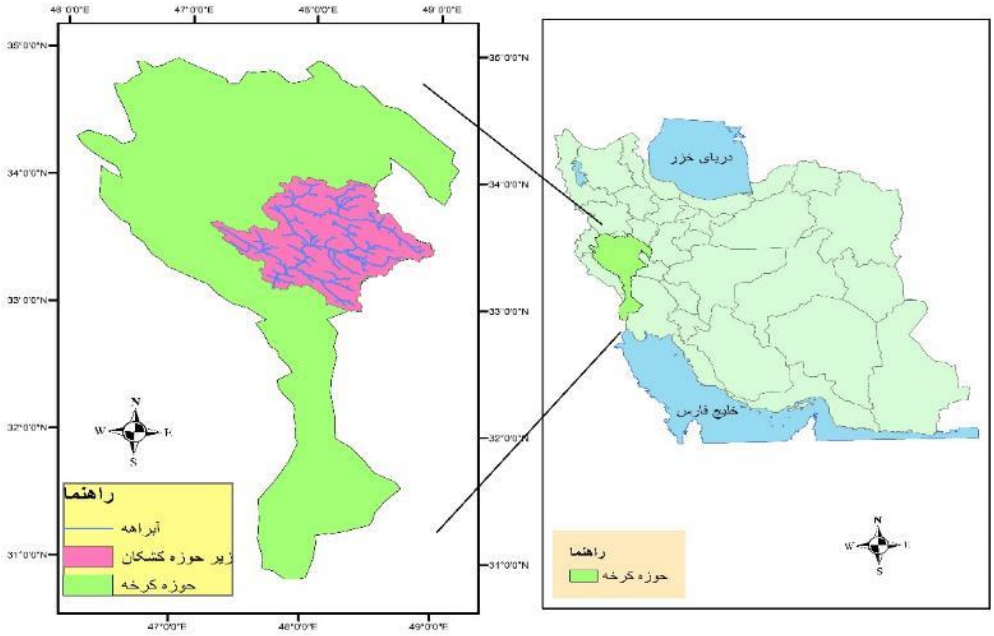
منطقه موردمطالعه این تحقیق زیرحوزه کشکان از حوضه رودخانه کرخه است. در شکل(۲) موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه ارائه‌شده است. آبخیز کشکان از نظر موقعیت جغرافیایی در محـدوده ۰۸′ ۳۳° تا ۰۲′ ۳۴° عرض شمالی و ۱۲′ ۴۷° تا ۵۹′ ۴۸° طول شرقی، در بخش میانی سلسله جبال زاگرس قرار دارد. این حوزه آبخیز به لحاظ تقسیمات سیاسی بطور کامل در استان لرستان (قسمت اعظم شهرستان‌های الشتر، خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر) قرار گرفته و حدود ۳۳ درصد از کل این استان را تشکیل می‌دهد (مهدی‌نسب، ۱۳۹۱). بر روی این رودخانه و شاخه های فرعی آن مجموعاً ۱۱ ایستگاه هیدرومتری وجود دارد که پنج ایستگاه روی رودخانه اصلی و مابقی روی خروجی شاخه های فرعی آن احداث شده‌اند. پایین‌ترین ایستگاه هیدرومتری کشکان به نام پلدختر با موقعیت جغرافیایی ۰۹′ ۳۳°۰۹ عرض شمالی و ۴۳′ ۴۷° طول شرقی در سال ۱۳۳۴ تأسیس شده است.

روش تحقیق

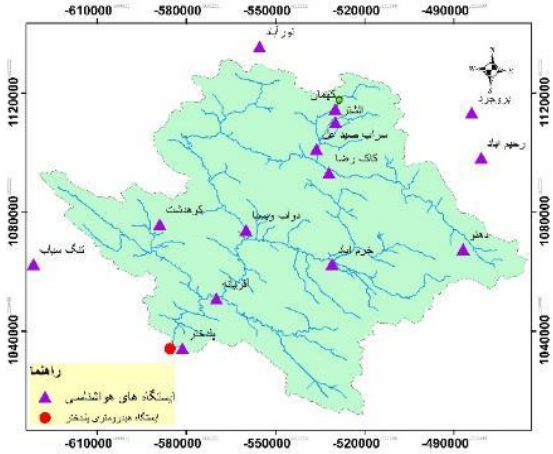
در این تحقیق برای شبیه‌سازی رویدادهای سیل در حوزه آبخیز کشکان از مدل TOPKAPI-X استفاده شد. برای این منظور، موقعیت جغرافیایی حوزه‌های‌آبخیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر (شکل۳)، موقعیت خروجی آبخیز، واحدهای عملیاتی بر اساس نقشه کاربری اراضی و بافت خاک (شکل‌های۵ و ۶) و شبکه آبراهه آبخیز (شکل۴) و محل‌های تلاقی جریان بعنوان ورودی‌های مدل TOPKAPI-X آماده‌سازی شدند.

مدل‌سازی بارش– رواناب در مدل TOPKAPI-X

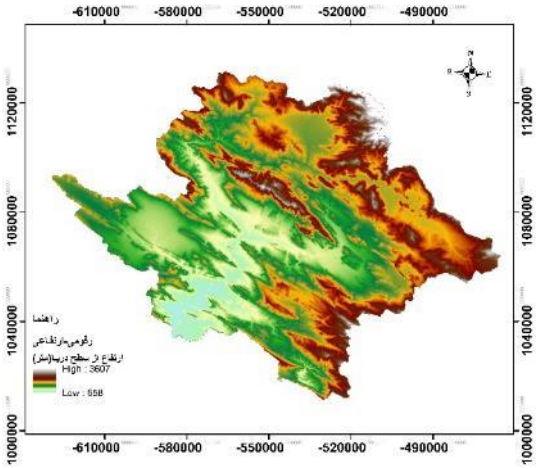
به‌منظور شبیه‌سازی جریان با مدل هیدرولوژیکی توزیعی TOPKAPI-X ابتدا مرز حوزه آبخیز و موقعیت خروجی آبخیز (ایستگاه هیدرومتری) تعیین گردید. در این مدل بارش – رواناب داده‌های سری زمانی پیوسته در گام زمانی روزانه در نظر گرفته شد. بدین منظور برای اجرای مدل در حوزه‌آبخیز کشکان از سری زمانی بارش روزانه، ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی داخل و خارج حوضه، طی دوره آماری (۱۹۹۹ تا ۲۰۲۰) برای شبیه‌سازی جریان استفاده شد. در نهایت مدل مورد نظر در محیط نرم‌افزار TOPKAPI-X اجرا شد. بعد از اجرای مدل در دفعات مختلف به‌صورت دستی در هر بار پارامترهای عمومی مدل تغییر داده شد (سعی و خطا)، تا نهایتاً مقادیر بهینه پارامترهای مدل با در نظر گرفتن مقادیر مناسب معیارهای ارزیابی ناش–ساتکلیف و اریب (NS و Bias) برای حوضه به دست آمد.



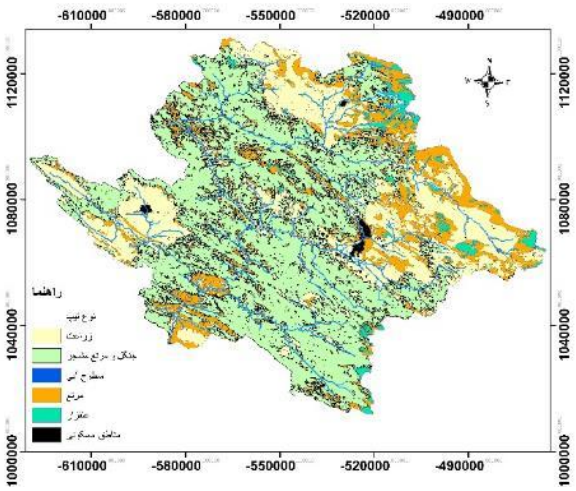
شکل ۲- حوزه آبخیز کرخه و زیرحوضه کشکان



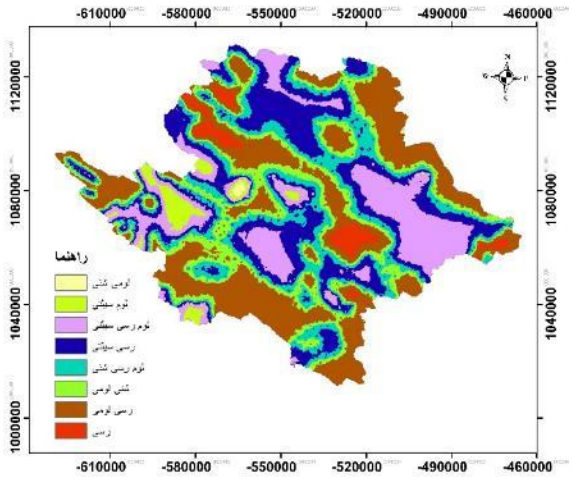
شکل ۳- مدل رقومی ارتفاعی



شکل ۴- موقعیت ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری



شکل ۵- نقشه بافت خاک



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی

واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی TOPKAPI-X

پس از شبیه‌سازی جریان در مدل TOPKAPI-X نسبت به واسنجی مدل اقدام شد. ابتدا ایستگاه هیدرومتری خروجی به عنوان مکان واسنجی انتخاب شده و سپس تابع هدف انتخاب گردید. در مدل TOPKAPI-X چهار تابع ناش–ساتکلیف، معیار تجمعی، ضریب همبستگی اصلاح شده و اریب مدل در نظر گرفته شده است. در ادامه بارگذاری داده‌های مشاهداتی روزانه طی سال های آماری (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴) انجام شد. شایان ذکر است در این تحقیق یک دوره دو ماهه قبل از سال آبی ۱۹۹۹ به عنوان دوره Warm-up انتخاب شد.

در نهایت پس از واسنجی مدل، دوره آماری شش ساله ۲۰۲۰-۲۰۱۴ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد تا تعیین شود با توجه به پارامترهای بهینه بدست آمده در مرحله واسنجی (جدول۱)، مدل در دوره اعتبارسنجی هم دارای نتایج قابل قبولی است یا خیر.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل TOPKAPI-X

Symbol	Parameter	Ranges in Kashkan watershed
L(m)	Thickness of the upper soil layer	0.3-0.4
Ksh(m/s)	Horizontal hydraulic conductivity of soil	1.81E-03-3.5E-4
Ksv(m/s)	Vertical hydraulic conductivity of soil	1.81E-06-3.51E-08

Theta S	Saturated soil moisture content	0.3885-0.4326
Theta R	Residual soil moisture conten	0.0413-0.0762
Exp H	The power of the horizontal flow equation	2.5
Exp V	Power law of vertical penetration	12_20
Psi (m)	Soil suction height	0.062-0.32
n(s/m^1/3)	The Manning coefficient of landuse	0.01-0.35
Beta	Threshold coefficients for calculating potential evaporation and transpiration	0.2-0.85
Kc	Plant coefficient of landuse	0.۱۸۳-۱. ۰5
Channel Level(m)	Channel depth	0.065-1.2
Moisture.	Initial soil moisture	055-0.8
T(°c)	Average monthly temperature of the stations	1.8-28.51
-	Channel section	Triangular-rectangular
Q(m^3/s)	Maximum channel capacity	20000
-	Channel connection angle	2_8
n(s/m^1/3)	Channel coverage Manning factor	0.03-0.06
T(oc)	Threshold temperature of snow formation or melting	1_3
W(m)	Minimum and maximum channel width	5-150
H(m)	The height of the meteorological station	710-1629
X-Y	Weather station coordinates	-484000 - 1113000

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی دبی جریان

برای ارزیابی کیفی و کمی نتایج شبیه‌سازی و پیش بینی‌های جریان رودخانه هم از روش آماری استفاده می‌شود. در روش آماری با استفاده از معیارهای آماری از جمله اریب مدل، معیار ناش– ساتکلیف و غیره، مقادیر دبی شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری مربوطه، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند. در این پژوهش برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل از معیارهای آماری زیر استفاده می شود:

شاخص آماری ناش– ساتکلیف (NS) که توسط NASH et al., (1970) معرفی شد، یک ضریب بی‌بعد برای تعیین کارایی مدل است. این شاخص بیانگر دقت شبیه سازی مدل بوده که مبتنی بر استاندارد واریانس باقی مانده بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل است. این شاخص در دامنه منفی بینهایت تا ۱ تعریف شده و هر چه مقدار این شاخص به ۱ نزدیکتر شود نشان دهنده تناسب بهتر بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه سازی شده است.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی، بکارگیری شاخص تشابه چند عامله KGE است معیار ارزیابی کلینگ–گوپتا جدیدترین معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگراف های شبیه سازی و مشاهده ای می باشد(Gupta et al., 2012). این معیار توسط Kling et al., 2012) مورد بازبینی قرار گرفت. در معیار بازبینی شده کلینگ–گوپتا بجای استفاده از انحراف معیار از ضریب تغییرات استفاده می شود.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1) + (B-1) + (V-1)}$$ رابطهٔ ۱)

در رابطه شماره (۱) مقدار عامل r ضریب همبستگی بین داده های شبیه سازی و مشاهده ای، عامل V نسبت ضریب تغییرات مقادیر شبیه سازی شده به ضریب تغییرات مقادیر مشاهده ای و عامل B نسبت میانگین مقادیر شبیه سازی شده به میانگین مقادیر مشاهده ای است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ–گوپتا عدد یک می باشد که نشان دهنده تطابق کامل هیدروگراف ها می باشد.

معیار تجمعی: یکی دیگر از روش‌های ارزیابی، بکارگیری روش AM است که حاصل جمع سه پارامتر مقدار اریبی (MB)، ناش (NS) و ضریب همبستگی اصلاح شده (Rmod) است (Safari et al., 2009). طبق رابطه شماره (۲) و جدول (۲) این معیار محاسبه و شبیه‌سازی مدل از طریق این معیار مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$AM = (Rmod + NS + (1 - MB))/3$$ رابطهٔ ۲)

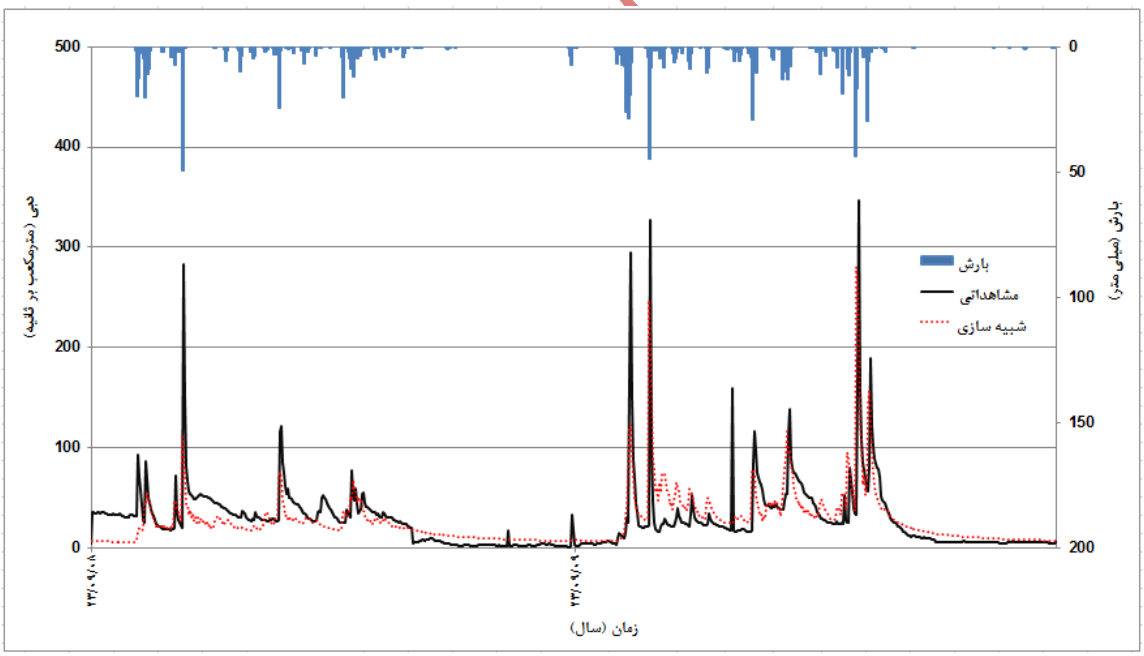
ویرایش نشده

جدول ۲- طبقه بندی مقدار ضریب تجمعی

معیار AM	رده
> ۰/۸۵	عالی
۰/۸۵_ ۰/۷۵	خیلی خوب
۰/۷۵_ ۰/۵۵	خوب
۰/۵۵_ ۰/٤۰	ضعیف
< ۰/٤۰	خیلی ضعیف

نتایج و بحث

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه و تعیین بیلان آبی حوضه، مدل TOPKAPI-Xبا استفاده از نقشه‌های توزیعی- مکانی، پارامترهای هیدرولوژیک و سری‌های زمانی در دوره آماری منتخب، اجرا شد. تمامی مولفه‌های بیلان آبی نظیر بارش، ذوب برف، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر- تعرق، جریان زیرسطحی و نفوذ عمقی شبیه سازی شد. بعد از روندیابی جریان، دبی روزانه رودخانه در خروجی حوضه در گام زمانی روزانه بدست آمد. در ادامه با پارامترهای حاصله از مرحله واسنجی (جدول ۱)، مدل در دوره آماری مد نظر اعتبارسنجی شد. یکی از خروجی‌های مدل تولید پارامترهای توزیعی پس از واسنجی و اعتبارسنجی به طور مجزا و انجام شبیه‌سازی در چندین نقطه دلخواه بوده که از مزیت‌های این مدل است. هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان برای حوزه‌آبخیز کشکان در شکل (۷) ارائه شده است. همچنین مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی شده اجزائ بیلان آبی برای خروجی حوضه کشکان در جداول (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است.



شکل۷ – نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده روزانه دوره واسنجی حوزه آبخیز کشکان با استفاده از مدل TOPKAPI-X

جدول ۳. سری زمانی بیلان آبی شبیه سازی شده مدل TOPKAPI-Xدر کل حوضه کشکان

سال	ماه	روز	بارش		بالانس مدل	رطوبت خاک	نفوذ عمقی	تبخیر پتانسیل	تبخیر واقعی	آب سطحی
۲۰۱۱	۱	۲۸	۰/۰۰	۱/۱۸۹	-۰/۱۸۸	۸۳/۴۹۸	۰/۸۹۲	۰/۱۱۲	۰/۰۱۲	۰/۱۸
۲۰۱۱	۱	۲۶	۱۹/۱۴۵	۲/۲۱۸	۸/۳۰۸	۵۶/۸۱	۴/۹۰۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۱	۱۰/۶۷۶
۲۰۱۱	۱	۲۷	۱/۸۸	۳/۶۲۲	-۲/۲۶۸	۵۸/۳۳	۱/۴۲۶	۰/۲۴۷	۰/۱۷۳	۳/۹۸۴
۲۰۱۱	۱	۲۸	۰/۰۰۱	۴/۶۹۳	-۲/۶۷۱	۵۹/۰۳	۱/۱۹۱	۰/۳۱۵	۰/۱۳۴	۲/۵۵۹
۲۰۱۱	۱	۲۹	۰/۶۶۶	۲/۴۱۵	-۰/۵۴۴	۵۸/۹۳	۰/۸۲۴	۰/۱۷۸	۰/۰۶۷	۱/۱۵۲
۲۰۱۱	۱	۳۰	۶/۸۹۹	۵/۰۲۱	-۰/۷۸۱	۶۱/۳۳۲	۳/۲۵۸	۰/۳۳۷	۰/۳۳۶	۷/۳۴۵
۲۰۱۱	۱	۳۱	۱۶/۱۸	۵/۰۶	۱/۹۱۲	۶۳/۱۰	۹/۵	۰/۳۴۱	۰/۳۴	۱۳/۹۲۸
۲۰۱۱	۲	۰۱	۱/۹۴۳	۴/۸۹۴	-۰/۹۹۹	۶۳/۷۸۸	۱/۱۳۲	۰/۳۴۵	۰/۱۹۹	۲/۷۶۳
۲۰۱۱	۲	۰۲	۱۰/۲۳۵	-۰/۴۰۴	۸/۳۶۵	۶۳/۶۵۵۷۳	۱/۲۶۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۱	۱/۸۴
۲۰۱۱	۲	۰۳	۵/۵۹۲	-۲/۲۶۴	۵/۵	۶۱/۵۵۲۳	۰/۹۷۶	۰	۰	۰/۰۹۲
۲۰۱۱	۲	۰۴	۰	-۵/۴۷۶	۰/۰۳۱	۶۱/۴۴	۰/۹۲۳	۰	۰	۰

جدول ۴- مقادیر متغییر ورودی و شبیه سازی شده در بیلان آبی در دوره مورد تحقیق

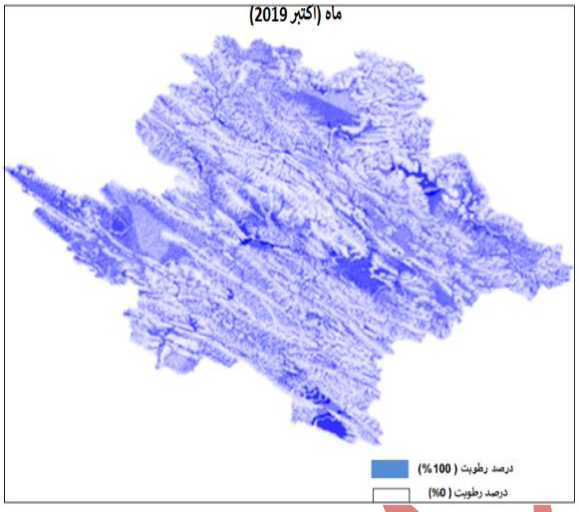
اجزاء (میلیمتر)	بارش	تبخیر و تعرق	نفوذ	رواناب کل	ضریب رواناب
کشکان	۱۰۶۸۵/۱	۹۰۷/۲	۶۸۳۷/۱	۲۹۴۰/۸	۲۷/۵۲

جدول ۵- مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده برخی اجزای بیلان آب

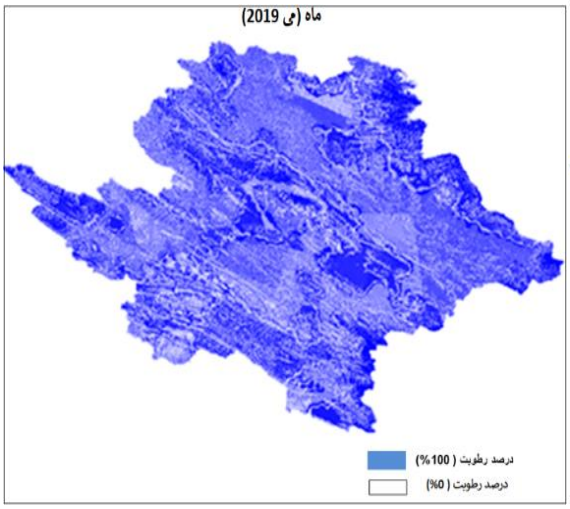
نام حوزه	مولفه بیلان	مشاهده شده (mm)	درصد نسبت به بارش (٪)	شبیه سازی شده (mm)	درصد نسبت به بارش (٪)
کشکان	بارش	۱۰۶۸۵/۱	۱۰۰	۱۰۶۸۵/۱	۱۰۰
	رواناب کل	۲۸۰۵	۲۶/۲	۲۹۴۰/۸	۲۷/۵۲

این مدل توانایی تولید چندین نوع نقشه از خصوصیات مختلف فیزیکی حوضه از قبیل نقشه رطوبت خاک سطحی، عمق رطوبت در خاک، دبی و عمق آب کانال اصلی، آب معادل برف، تبخیر واقعی و آب زیر زمینی را داراست که این نقشه‌ها امکان بررسی تغییرات مکانی- زمانی مولفه های بیلان آبی حوضه را فراهم می‌نماید. در شکل های ۸ و ۹ یک نمونه از نقشه‌های تولیدی (درصد رطوبت خاک سطحی) برای حوضه کشکان در محیط نرم افزار مدل TOPKAPI-X آورده شده است. طبق پراکنش میزان رطوبت در نقشه رطوبت سطحی مشخص شد عمده شدت رطوبت (رنگ آبی تیره در اشکال) در مناطق با بارش بیشتر و در محدوده کاربری اراضی زراعی حوضه بوده که نشان دهنده وجود شیب کمتر و حفظ رطوبت خاک عمدتاً با بافت سنگین در این مناطق است. نتایج مقایسه هیدروگراف‌ها در دوره پرآبی در حوضه کشکان نشان دهنده کارایی خوب مدل برای شبیه سازی جریان است. همچنین مقایسه بصری هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، یکسان بودن زمان تا اوج در هر دو هیدروگراف را نشان می‌دهد به صورتی که زمان رسیدن به دبی اوج در هر دو هیدروگراف در یک روز اتفاق است. بر اساس معیار ناش – ساتکلیف، کارایی مدل در برآورد دبی جریان در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۶۱/۹ و ۶۱/۷ درصد در حوضه مورد مطالعه است. همچنین برمبنای، معیار تجمعی (AM) سطح عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی جریان این حوضه در کلاس خوب قرار می‌گیرد. در جدول (۶) نتایج ارزیابی مدل در شبیه سازی جریان در دوره مطالعاتی درحوزه آبخیز کشکان آمده است.

ویرایشگری نشده



شکل۸ –نقشه درصد رطوبت خاک سطحی در فصل مرطوب



شکل۹ – نقشه درصد رطوبت خاک سطحی در فصل خشک

جدول ۶- نتایج ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان

معیار ارزیابی	کشکان	
	اعتبارسنجی	واسنجی
معیار ناش–ساتکلیف	۰/۶۱۷	۰/۶۱۹
معیار تجمعی	۰/۶۵	۰/۶۹
ضریب همبستگی اصلاح شده	۰/۴۷	۰/۶۶
معیار KGE	۰/۷۰۶	۰/۵۹۵
اریب مدل	۹/۱۱	۵/۸

نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی (جدول۶)، نشان داد که نتایج در دوره اعتبارسنجی مدل تا حدی ضعیف‌تر از نتایج در دوره واسنجی بوده که این نتایج با یافته‌های Croke et al., (2005) و Rwasoka et al., (2014) مطابقت نسبی دارد. بطور کلی، در بخش‌هایی از طول دوره آماری نتایج مدل رضایت بخش بوده و در دوره‌هایی نیز روند شبیه‌سازی ضعیف بوده است. دلیل آن می‌تواند مربوط به حساسیت مدل به طول دوره واسنجی (زارعی و همکاران، ۱۳۹۵: Croke et al., (2005) و خطای مربوط به ساختار ریاضی مدل مورد استفاده (Mouelhi et al., 2006) باشد.

در مدل‌های توزیعی مکانی، رسیدن به دقت‌های بالای ۶۱ درصد (مطابق معیارهای ارزیابی کارآیی مدل) می‌تواند بسیار رضایت بخش باشد (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶)، چونکه دقت مکانی و زمانی که در این شبیه‌سازی‌ها لحاظ می‌شود سخت گیرانه‌تر از مدل های یکپارچه سنتی است. در مورد خصوصیات مهم هیدروگراف مانند دبی پیک لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف در این حوضه تطابق مناسبی وجود دارد اما شبیه‌سازی دبی‌های خیلی بالا بخوبی صورت نمی‌گیرد. پیش‌بینی ۲۷/۵۲ درصدی رواناب برآوردی در مقابل ۲۶/۲ درصدی رواناب مشاهداتی در حوزه کشکان قابلیت بالای مدل در شبیه‌سازی مولفه رواناب در بیلان آبی را نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان بیان کرد که این مدل کارایی قابل‌قبولی در شبیه‌سازی جریان دارد، که با نتایج محققانی همانند Liu et al., (2009)؛ Vischel et al., (2008)؛ Coccia et al., (2009)؛ Sinclair et al., (2013) و Janabi et al., (2021) و آرتیمانی و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بارندگی به عنوان اصلی ترین منشا تامین آب در ارتباط با برنامه‌ریزی‌های بهره‌برداری اصولی از منابع آب،

استفاده از این نعمت خدادادی در آبخیزهای کشور به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، ارزش فراوانی دارد. یکی از راه‌های این بهره‌وری، اطلاع از تغییرات کوتاه مدت مؤلفه‌های مختلف بیلان آبی است. امروزه برآورد این مهم، با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی- توزیعی امکان‌پذیر می‌باشد. محاسبه اجزای بیلان آبی نقش مهمی در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی برای استفاده یا صرفه جویی و در مجموع مدیریت منابع آبی در یک منطقه دارد. همچنین در بسیاری از مناطق ایران به دلیل کمبود تجهیزات یا خرابی آنها و یا هزینه‌های زیاد ساخت ایستگاه‌ها در بعضی مناطق، امکان دسترسی آسان به داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی میسر نیست که این امر باعث ناتوانی یا کاهش دقت در محاسبه بیلان آبی برای این مناطق می‌شود. ضمن اینکه تعیین پارامترها و ضرایب مدل‌های بیلان آبی نیز با عدم قطعیت‌هایی مواجه است. دراین تحقیق شبیه‌سازی بیلان آبی و رواناب روزانه حوضه کشکان توسط مدل TOPKAPI-X بعنوان یک مدل بارش – رواناب با بکارگیری داده‌های اقلیمی و تلفیق نقشه‌های بافت خاک، پوشش گیاهی و رقومی- ارتفاعی صورت گرفت. رواناب سطحی و اجزای بیلان آبی حوضه بر اساس پارامترهای موثر در مدل درگام زمانی روزانه با دقت مناسبی بدست آمد و هیدروگراف اولیه رواناب استخراج گردید. در مرحله واسنجی به‌منظور بهبود شبیه‌سازی و تطابق بهتر بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به واسنجی پارامترهای موثر در مدل اقدام گردید. مناطق مورد مطالعه دارای کاربری اراضی متنوع و انواع خاک متفاوت بودند. همچنین مقادیر مثبت و منفی اریب مدل به ترتیب نشان دهنده کمتر و بیشتر بودن مقدار متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به مقدار جریان مشاهداتی است (Croke et al., 2005). همچنین نتایج ضرایب KGE و NS برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان دهنده این است که مدل به صورت رضایت بخشی رواناب ماهانه منطقه را شبیه سازی کرده است. همان طور که مشاهده می شود میانگین بارش حوزه آبخیز تحت پژوهش ۵۰۹ میلیمتر است؛ که قسمتی از بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می شود، حدود ۲۷/۵ درصد آن به صورت رواناب سطحی و جریان جانبی و بازگشتی مستقیماً به آبراهه ها وارد میشود و مابقی بارش در لایه های خاک، و یا به سفره های عمیق آب زیرزمینی می پیوندد که نهایتاً جریان پایه رودخانه را تأمین میکند. به طور کلی مدل TOPKAPI-X عملکرد نسبتا خوبی را برای منطقه مورد مطالعه از خود نشان داد که با نتایج تحقیقات محققانی مانند Eini et al., (2020); Ghodousi et al., (2014) ; Näschen et al., (2019) ; Wei et al., (2018); Farokhnia et al., (2018); Jolejolea et al., (2018); Anand et al., (2018) Mo et al., (2020); Patil and Nataraja (2020);Amini et al., (2019) مطابقت دارد که نشان می دهند ، مدل های بارش- رواناب علاوه بر این که یک ابزار مناسب برای شبیه سازی خوب رواناب هستند، قادراند به خوبی تاثیر تغییرات زمانی و مکانی کاربری اراضی بر جریانات سطحی و سایر مولفه های بیلان هیدرولوژیکی حوزه ها را بررسی کنند (Raja et al., 2023). می‌توان از نتایج این مدل به‌منظور تعمیم به سایر نقاط مشابه استفاده کرد. همچنین از نتایج این مطالعات می توان برای پیش بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه در قالب سناریوهای مختلف اقلیمی و کاربری اراضی و یا ترکیبی از هر دو استفاده کرد. در مجموع نتایج تحقیق حاکی از آن است که مدل TOPKAPI-X قابلیت شبیه سازی بیلان آبی حوزه های آبخیز نسبتاً بزرگ با شرایط پیچیده و ناهمگن با دقت مناسب را دارد. البته به شرط اینکه داده های ورودی با دقت مناسب در مدل سازی استفاده شوند و نیز دقت و توجه کافی در واسنجی مدل صورت گیرد تا مدل هرچه بیشتر معرف شرایط واقعی حوزه آبخیز باشد. شایان ذکر است، با توجه به اینکه در بسیاری از کشورها از جمله ایران، تشکیلات خاصی برای ثبت تغییرات بیلان آبی در حوزه‌های آبخیز وجود ندارد، نتایج این تحقیق می‌تواند برای مطالعات مختلف در این مناطق و همچنین برای مدیریت، برنامه‌ریزی و تصمیم گیری در زمینه منابع طبیعی، محیط زیست و منابع آب به کار گرفته شود. به منظور تعمیم، تثبیت و اطمینان بیشتر ازکارآیی مدل بکارگرفته شده در این تحقیق، شایسته است این مدل در تعدادی از حوزه‌های آبخیز پر اهمیت کشور که دارای خصوصیات متفاوت از نظر توپوگرافی، فیزیوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی، خاک و هیدرولوژیکی می‌باشند مورد آزمایش و مطالعه قرار گیرد تا بتوان بر مبنای نتایج آنها، دستور العمل کلی برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی در حوزه‌های آبخیز کشور تدوین و ارائه نمود.

منابع

آرتیمانی، محمد مهدی؛ زینی وند، حسین و طهماسبی‌پور، ناصر (۱۳۹۶). ارزیابی مدل SWAT در تعیین مولفه های بیلان آب حوزه آبخیز گاماسیاب. *مجله سامانه های سطوح آبگیر باران*، ۲ (۱۵)، ۵۱-۶۴.

آرتیمانی، محمد مهدی؛ زینی وند، حسین؛ طهماسبی‌پور، ناصر و حقی زاده، علی (۱۳۹۵). ارزیابی مولفه های بیلان آب مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیز گاماسیاب. *مجله سامانه های سطوح آبگیر باران*، ۴(۱۳).

آزادی، فهیمه؛ صدوق، حسن؛ قهرودی، منیژه و شهابی، هیمن. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی حساسیت خطر سیل در حوضه آبخیز رودخانه کشکان با استفاده از دو مدل WOE وEBF. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۱)، ۴۵-۶۰.

بیات، باقر. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی جریان رودخانه و تحلیل اثرات تغییر کاربری بر روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبریز مرک، استان کرمانشاه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین. ۱۴۲ صفحه.

رجا، امید؛ پارسی نژاد، مسعود؛ و تجریشی، مسعود (۱۴۰۲). برآورد و ارزیابی مولفه های بیلان آب با واسنجی مدلSWAT ، مطالعه موردی: دشت مهاباد *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۵(۱)، ۱۲۹-۱۰۹.

رضوی کهنموئی، سید سجاد؛ داوری، کامران؛ شاهدی، مهری؛ طالبی، فاطمه و جودوی، عطاءاله (۱۳۹۸). مروری بر مدل های بیلان آب: بررسی مدل های ریاضی مفهومی برای حوضه. *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۳ (۳۵)، ۱۲۵-۱۳۶.

زارعی، مهدی؛ حبیب نژاد روشن، محمود؛ شاهدی، کاکا و قنبرپور، محمد رضا (۱۳۹۰). کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه سازی جریان روزانه ، *نشریه آب وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. ۲۵ (۱)، ۱۰۴-۱۱۴

قاسمی امین، نرگس؛ آرمان، نسیم و زینی وند، حسین(۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر جریان روزانه رودخانه نوژیان با استفاده از مدل‌های Clue-s و WetSpa . *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰(۱)، ۱۴-۲۷.

شفیعی، مجتبی، و قراری، شروان (۱۳۹۶). مروری بر مفاهیم مدل سازی هیدرولوژی: بخش اول، معرفی فرایند مدلسازی. *آب و توسعه پایدار*، ۴(۲)، ۹۵-۱۰۲.

مرادی پور، شهین؛ زینی وند، حسین؛ بهره مند، عبدالرضا و نجفی نژاد، علی(۱۳۹۰). شبیه سازی بیلان آبی در مقیاس حوزه آبخیز با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی و *GIS*. *هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری*، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مهدی‌نسب، مهدی (۱۳۹۱). مدلسازی تولید رواناب حوزه آبریز رودخانه کشکان بر اساس مدل‌های آماری. *دو فصلنامه پژوهش های بوم شناسی شهری*، ۳(۶)، ۸۱.

نوری، زهرا؛ طالبی، علی و اسدی، محمدامین (۱۳۹۸). بررسی کارایی مدل SWAT در تعیین مؤلفه های بیلان آب حوضه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۳)، ۱۳۳-۱۴۳.

یعقوبی، فاطمه، و بهره مند، عبدالرضا (۱۳۹۰). شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی WetSpa درحوزه آبخیز چهل چای استان گلستان. *مجله پژوهش های حفاظت آب وخاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان*، ۱۵(۳).

REFERENCES

Amini, MA., Torkan, GH., Eslamian, SS., Zareian, MJ., & Besalatpour, AA. (2019) Assessment of SWAT hydrological model in catchments' water balance simulation located in semi-arid regions (Case study: Zayandeh-Rud River Basin). *Journal of Water and Soil*, 32(5), 849-863. (In persian).

Anand, J., Gosain, AK., & Khosa, R. (2018) Prediction of land use changes based on land change modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 644, 503- 519.

Andres, E.O., & Coccia, G. (2013). Towards a better representation of the hydrological processes The model TOPKAPI - X. *International Symposium on Distributed Hydrological Modelling, University of Bologna*, 5-7 June 2013, Napoli – Italia.

Artimani M, Zeinivand H, Tahmasebi N, & Haghizadeh, A. (2017). SWAT model Assessment to determine determination of water balance components of Gamasiab basin. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 5(2), 51-64. (In Persian).

Artimani M, Zeinivand H, & Tahmasebi, N. (2016). Assessment and determination of water balance components

ویرایش شده

of the Gamasiab Basin. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 4 (4), 57-66. (In Persian).
Azadi, F., Sadough, S. H., Ghahroudi, M., & Shahabi, H. (2020). Zoning of Flood Risk in Kashkan River basin using Two Models WOE and EBF. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 45-60. (In Persian).
Batelaan, O., Chormanski, J., Van de Voorde, T., & Canters, F. (2007). Improved distributed runoff modelling of urbanised catchments by integration of multi-resolution remote sensing. *Geoscience and remote sensing symposium*, 5021-5024.
Ciarapica, L., & Todini, E. (2002). TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrol. Process*, 16, 207–229.
Coccia, G., Mazzetti, C., Ortiz, E., & Todini, E. (2009). Application of the Topkapi Model within the Dmip 2 Project. *In Proceedings of the 23rd Conference on Hydrology, San Antonio, TX, USA*, 10–12.
Croke, BM., Andrews, W., Spate, F., & Cuddy, J. (2005). IHACRES user guide. Technical Report 2005/19. Second ed. ICAM, School of Resources. *Environment and Society*. The Australian National University. Canberra.
Eini, M.R., Javadi, S., Delavar, M., Gassman, P.W., & Jarihani, B. (2020). Development of alternative SWAT-based models for simulating water budget components and streamflow for a karstic-influenced watershed. *Catena*, 195, 104801.
Ghasemiamin, N., Arman, N., & Zeinivand, H. (2018). Investigation of land use changes effects on daily stream flow in Nojian Watershed by Clue-s and WetSpa models. *Watershed Engineering and Management*, 10(1), 14-27. (In Persian).
Ghodousi, M., Delavar, M. & Morid, S. (2014). Impact of land use changes on hydrology of Ajichai Basin and its input to Urmia Lake. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2), 123-133. (in Persian).
Farokhnia, A., Morid, S., Delavar, M., & Abbaspour, K., (2018) Development of SWAT-LU model for simulation of urmia lake water level decrease and assessment of the proposed actions for its restoration (Role of anthropogenic and climatic factors on hydrological change of the basin and lake). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(5), 1041- 1058. (In persian).
Hughes, JD., Silberstein, RP., & Grigg, A. (2013). Extending rainfall–runoff models for use in environments with long–term catchment storage and forest cover changes. *In MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation*, 231-243.
Janabi, F., Ongdas, N., Bernhofer, C., Benisch, J., & Krebs, P. (2021). Assessment of TOPKAPI-X Applicability for Flood Events Simulation in Two Small Catchments in Saxony. *Hydrology*, 8, 109. https://doi.org/10.3390/hydrology8030109.
Jolejolea, ME., Kimb, BJ., Jeonb, DJ., Cayetanoa, M., & Kimb, JH., (2018) Scenario study of the effect of different land use to a sub-basin in Yeongsan River basin using SWAT model. *Desalination and Water Treatment*, 120, 198-204.
Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424, 264-277.
Liu, J., Chen, X., Zhang, J., & Flury, M. (2009). Coupling the Xinanjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting. *Hydrol. Process*, 23, 1337–1348.
Liu, Z., & Todini, E. (2005). Assessing the TOPKAPI non-linear reservoir cascade approximation by means of a characteristic lines solution. *Hydrol. Process*, 19, 1983–2006.
Liu, Z., Martina, MLV., & Todini, E. (2005). Flood forecasting using a fully distributed model: Application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9, 347–364.
Mehdi nasab, M., tavousi, T., tavousi, T., & Negaresh, H. (2015). Modeling of Rainfall - Runoff Kashkan River Catchment Based on Statistical Models. *Geography and Environmental Planning*, 26(2), 67-84. (In Persian).
Mimiko, MA., Hadjisiavva, PS., Kouvopoulos, YS., & Afrataos, H. (1992). Regional climate change impacts. *hydrological sciences journal*, 95-108.
Mo, G., Zhang, Y., Huang, Y., Mo, C., & Yang, Q., (2020) Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan basin. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1-11.
Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, 328 (1), 283-296.
Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
Näschen, K., Diekkrüger, B., Leemhuis, C., Seregina, L.S., & van der Linden, R. (2019). Impact of climate change on water resources in the Kilombero Catchment in Tanzania. *Journal of Water 2019*, 11(859),1-28.
Nguyen, H., Recknagel, F., Meyer, W., Frizenschaf, J., Ying, H., & Gibbsd, M. (2019). Comparison of the alternative models SOURCE and SWAT for predicting catchment streamflow, sediment and nutrient loads under the effect of land use changes. *Science of The Total Environment*, 662 (3): 254-265.
Nouri, Z., Talebi, A., & Asadi, M. A. (2019). Investigation of the SWAT Model Efficiency to Determine Water Balance Components (Case Study: Semirom Mehrgerd Watershed), *Iran-Water Resources Research*, 15(3), 133-143. (In Persian).

Oliveira Serrão, E.A., Tavares Silva, M., Rocha Ferreira, T., Paulo Rodrigues, V., Salviano Sousa, F., Meiguins Lima,A.M., Paiva Ataide, L.C., & Sobrinho Wanzeler, RT., (2020). Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon, *Journal Of Science of The Total Environment*, 744, 140981.
Patil, NS., & Nataraja, M., (2020) Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: A case study in Hiranyakeshi watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2345-2357.
Peng D, Zhijia L, & Zhiyu L. (2008). Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application. *Water Sci Eng*, 1, 14–21.
Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2023). Estimation and evaluation of water balance components by calibrated SWAT Model, case study: Mahabad Plain. *Watershed Engineering and Management*, 15(1), 109-129. (In Persian).
Razavi, S., davary, K., Shahedi, M., talebi, F., & Joodavi, A. (2019). An overview on water balance models: mathematical-conceptual water balance models for watershed. *Iranian Water Researches Journal*, 13(4), 125-136. (In Persian).
Rwasoka, DT., Madamombe, CE., Gumindoga, W., & Kabobah, A. (2013). Calibration, validation, parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2–2-parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67 (3): 36-46.
Safari, A., De Smedt, F. & Moreda, F. (2009). WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project(DMIP2). *Journal Of Hydrology*.
Shafiei, M., & Gharari, S. (2018). A Review on Hydrological Modelling Concepts: Part 1 - Introduction of Modelling Process. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 95-102. (In Persian).
Sinclair, S., & Pegram, G.G.S. (2010). A comparison of ASCAT and modelled soil moisture over South Africa, using TOPKAPI in land surface mode. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 14, 613–626.
Sinclair, S., & Pegram, G.G.S. (2013). A sensitivity assessment of the TOPKAPI model with an added infiltration module. *J. Hydrol*. 479, 100–112.
Vischel, T., Pegram, G., Sinclair, S., & Parak M. (2008). Implementation of the TOPKAPI model in South Africa: Initial results from the Liebenbergsvlei catchment. *Water Sa*, 34, 331–342.
Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., & Weingartner R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environ. Model*. Softw. 24, 1209–1222.
Wegehenkel, M., & Kersebaum, K.C. (2004). The validation of a modeling system to calculating water balance and catchment discharge using simple techniques based field data and remote sensing data, *physics, and chemistry of earth*, 30, 171-179.
Wei, X., Bailey, R.T., & Tasdigh, A. (2018). Using the SWAT Model in Intensively Managed Irrigated Watersheds: Model Modification and Application. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(10), 04018044, 1-17.
Yaghobi, F., & Bahremand, A. (2012). Streamflow Simulation using Spatially Distributed Hydrologic Model, WetSpa in Chehel-Chai Watershed in Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(3), 185-207. (In Persian).
Zeinivand, H., & De Smedt, F. (2009). Hydrological Modeling of Snow Accumulation and Melting on River Basin Scale, *Water Resource Manage*. 32, 252-267.

ویرایش شده