Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 19-31
https://doi.org/ 10.22034/IJWER.2022.150107

Sensitivity Analysis of Muskingum flood routing respect to the DEM Using HEC-HMS (Case study: Dez dam catchment)

Khatereh Akbari[1], Seyed Hossein Mohajeri[2*], Mojtaba Mehraein[2], Reza Barati[3], Amir Samadi[4]

[1] Graduate student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
[3] Ph.D. of Civil Engineering, Groundwater Expert of Basic Studies Office, Khorasan Razavi Regional Water Authority, Mashhad, Iran
[4] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

[*]**Corresponding Author:** hossein.mohajeri@gmail.com

Received: **25 Jan. 2022**
Accepted: **20 Feb. 2022**

Homepage: **ijwer.uoz.ac.ir**

Abstract: In this study, to measure the output sensitivity of hydrological models to the morphometric parameters of the catchment area upstream of Dez Dam, a rainfall-runoff model has been developed through ArcHydro and HEC-GeoHMS extensions in the GIS environment. Rainfall-runoff model using three-digit models Elevation with an accuracy of 12, 30, and 70 meters and with the same initial conditions were implemented in HEC-HMS software. The statistical value of the least error in the initial step showed that the use of a 30-meter digital model gives the model coefficients with higher accuracy than the 70-meter model. Also, the error value of the Nash-Sutcliffe coefficient in the case of using digital height model layers with dimensions of 12 meters and 70 meters, in the initial output, is equal to -3.66 and -3.79, respectively, which is much higher than the response of the model made with The layer is 30 meters (-0.079).

Keywords: HEC-HMS, DEM, Sensitivity analysis, Precipitation-runoff model, Dez dam catchment

Introduction: HEC-HMS hydrological modeling system is designed for runoff development simulations in watershed system. Large basins, runoff and flood of natural or small urban watersheds are designed. Hydrographs calculated by this model directly or in combination with other software for various purposes of studies such as water supply, urban drainage, flood forecasting and flow rate, the effect of land use change It is used in dam overflow design, flood control studies and reservoir system exploitation. Currently, sensitivity analysis plays a key role in flood analyzes and its use is wise for short-term and long-term analyzes. Sensitivity analysis provides powerful insight in studying model results, which is important in drawing conclusions from hydrological modeling, including hazard risk or hazard reduction.

In this research, based on the three basic principles in the automatic generation of the model structure in the software environment, the morphometric parameters of the ballast watershed of the Dez Extraction Dam, and the rainfall-runoff model through ArcHydro and HEC-GeoHMS add-ons in the GIS environment based on three cell sizes 12. 30 and 70 meters are available. The models produced with the initial conditions are implemented in HEC-HMS software during one year. Using the minimum error statistic in the initial step, the models produced with different demarcations of the watershed sub-basins are compared.

Considering the importance of topographic mesh size and dimensions, in this research, firstly, the effect of other mesh sizes in the same conditions is presented for the best response in modeling and extracting the parameters required for modeling.

Material and Methods: In the present study, the catchment area upstream of Dez Dam up to the independent hydrological boundaries determined by the level 2 catchment sub-basins of the Ministry of Energy, in order to

determine the amount of flows occurring in the area of the dam and long-term investigation of floods in a statistically available period. considered. Dez Dam, the first of the series of multi-purpose dams, was put into operation on March 23, 1341. With the construction of Dez Dam, a 65 km long lake has been created behind the wall of this dam, which holds 3.3 billion cubic meters of water. The main purpose of building dams such as Dez Dam is to provide the necessary power to generate electricity, control floods and regulate water for irrigation purposes. Fig. 1 shows the location of Dez Dam downstream of the closed boundary of its catchment area. ArcHydro and HEC-GeoHMS extensions have been selected in the GIS environment along with the HEC-HMS model to simulate the rainfall-runoff model.

Results and Discussion: In order to analyze the structural uncertainty in a software simulation example of hydrological systems, in this research, using the morphometric parameters of the catchment area upstream of the Dez dam, a rainfall-runoff model was developed through ArcHydro and HEC-GeoHMS extensions in the GIS environment based on Three cell sizes are about 12, 30 and 70 meters. The generated models with the same initial conditions were implemented in HEC-HMS software. The basis of superiority of each model produced with different boundaries was the least error in the initial step. Finally, the 30-meter model was chosen to carry out calibration and validation in a continuous period of hydrometric statistics. The superiority of the 30-meter model compared to the model with a 70-meter base was concluded from the height figure, the higher accuracy of the model coefficients, and also, compared to the 12-meter layer, the reduction of the statistical deviation.

Due to the fact that in the modeling process, the actual number of water flow was available, therefore, performing a validation based on the flow estimation numbers in a period can guarantee the confirmation of the simulation. However, models faced with a large amount of data as input parameters will show inefficiency as well as models developed with a dense and heterogeneous structure.

Here, the method of preparation of precipitation-runoff models of Dez dam independent catchment area was completely software. Therefore, the reason for the huge difference in the error in the models based on DEM of 12 and 70 meters cannot be attributed to an error other than the calculation method. D8 algorithm in environmental modeling as a well-known routing method will find the flow to the exit point based on the cell density. This method makes extracted watercourses the criteria for demarcating watersheds.

Conclusion: Heterogeneous distribution of watersheds and as a result the inclusion of heterogeneous parameter values such as trending coefficients as the most important of these discussed in this article, leads to statistical deviation and as a result error in the calculation output. In the sensitivity analysis of the parameters (CN-LagTime-K-X), it can be concluded that among the necessary parameters in the Muskingum K coefficient model, the most important parameter and the LagTime coefficient (delay time) have the least effect on the analysis of rainfall-runoff process and modeling accuracy.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۳۱-۱۹
https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.150107

تحلیل حساسیت روندیابی ماسکینگام نسبت به مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد دز)

خاطره اکبری[۱]، سید حسین مهاجری[۲]*، مجتبی مهرآیین[۲]، رضا براتی[۳]، امیر صمدی[۴]

[۱] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
[۲] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
[۳] دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران
[۴] استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نگارندهٔ مسئول: hossein.mohajeri@khu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱
وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: در این پژوهش به منظور سنجش حساسیت خروجی مدل‌های هیدرولوژیکی، نسبت به پارامترهای مورفومتری حوضه آبریز بالادست سد دز، یک مدل بارش-رواناب از طریق الحاقیه‌های ArcHydro و HEC-GeoHMS در محیط GIS توسعه یافته است مدل بارش-رواناب با استفاده از سه مدل رقوم ارتفاعی دارای دقت ۱۲، ۳۰ و ۷۰ متر و با شرایط اولیهٔ یکسان در نرم‌افزار HEC-HMS اجرا گردید. مقدار آماره کمترین خطا در گام اولیه نشان داد که استفاده از مدل رقومی ۳۰ متری نسبت به مدل ۷۰ متری ضرایب مدل را با دقت بالاتری به‌دست می‌دهد. همچنین، مقدار خطای ضریب نش-ساتکلیف درصورت استفاده از لایه‌های مدل رقومی ارتفاع با ابعاد ۱۲ متری و ۷۰ متری، در خروجی اولیه، به‌ترتیب برابر با ۳/۶۶- و ۳/۷۹-است که بسیار بیشتر از پاسخ مدل ساخته‌شده با لایه ۳۰ متری (۰/۰۷۹-) می‌باشد. با این‌حال مدل ۱۲ متری به علت وسعت بالای ناحیه و افزایش تصاعدی حجم محاسبات، مقدار مرزبندی انجام داده جهت استخراج زیر حوضه‌ها را با انحراف آماری صورت داده است. به‌این‌ترتیب مدل ۳۰ متری به‌منظور اجرای واسنجی و صحت سنجی در یک دورهٔ تداومی از آمار هیدرومتری انتخاب و اجرا شد. درنهایت مدل توسعه داده‌شده به‌منظور تعیین مقدار آورد رخدادهای حدی در محدوده سد دز استفاده شد. نتایج این بخش نشان می‌دهد که خطای نش در مرحله‌ی اول اجرای مدل مقدار ۰/۰۷۹- را داشت و بعد از اجرای مرحلهٔ واسنجی در بازه بلندمدت به مقدار ۰/۵ کاهش‌یافته است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل حساسیت، مدل بارش-رواناب، مدل رقومی بستر، حوضهٔ آبریز سد دز

۱- مقدمه

سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب در سیستم حوضه‌های آبخیز طراحی شده است (Jain et al., 2000). این مدل برای کاربرد در محدوده وسیعی از نواحی جغرافیایی جهت حل

دامنه وسیعی از مسائل، شامل منابع آب، هیدرولوژی حوضه‌های بزرگ، رواناب و سیلاب حوضه‌های آبخیز طبیعی یا شهری کوچک، طراحی شده است(Sampath et al., 2015). هیدروگراف‌های محاسبه شده توسط این مدل به‌طور مستقیم یا در تلفیق با نرم‌افزارهای دیگر برای اهداف مختلف مطالعات نظیر آب‌رسانی، زهکشی شهری، پیش‌بینی سیل و دبی جریان، تأثیر تغییر کاربری اراضی، طراحی سرریز سدها، مطالعات کنترل سیلاب و بهره‌برداری از سیستم مخازن به کار می‌رود (Rajkumar et al., 2021; Singh et al., 2014).

کارایی هر مدل شبیه‌سازی بستگی به روش‌های مورد استفاده در آن دارد ولی به‌طورکلی، اثبات برتری یک روش بر دیگری با انجام مراحل واسنجی و اعتباریابی در حوضه مورد مطالعه میسر می‌شود. یکی از معیارهای مهم، سازگاری و انطباق مدل با اقلیم سیلابی حوضه از یک طرف و قابلیت واسنجی پارامترهای مدل از طرف دیگر می‌باشد. تمایل کاربران مدل‌های بارش-رواناب این است که با حداقل داده‌های موجود به بهترین جواب‌ها و تخمین‌ها نائل شوند. بنابراین در گزینش مدل مناسب تعداد و پیچیدگی بخش‌های مختلف لزوما گویای مناسب بودن آن نیست. کاربرد چنین مدل‌هایی با تخمین پارامترهای بیشتری همراه می‌گردد که در صورت کم بودن تعداد وقایع مناسب برای واسنجی و ناقص بودن اندازه‌گیری مستقیم پارامترها می تواند موجب ایجاد خطا در برآوردها شود (Tassew et al., 2019). پارامترهای مجهول به همراه محاسبات ساده‌تر دقت قابل قبولی را در مراحل واسنجی و اعتباریابی تأمین می‌نماید.

در چین، HEC-HMS برای حوضه آبریز Misai وWan'an به‌صورت جامع استفاده شد (Olshe et al., 2010). قابلیت مدل برای پیش‌بینی سیل در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه، با کاربرد مدل‌های ارتفاع دیجیتال (DEMs) و الحاقی ArcGIS به نامHEC-GeoHMS مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب تعیین و ضرایب توافق برای تمام وقایع سیل بالای ۰.۹ به‌دست آمد و خطاهای نسبی در تخلیه اوج همگی در محدوده قابل‌قبول بود. همچنین، نتیجه گرفتند که پیچیدگی ساختار مدل، مناسب بودن و کارایی آن را تعیین نمی‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه‌ی رودخانه‌ی کلانی در سریلانکا نشان می‌دهد که مدل HEC-HMS از دقت بالایی در حل مسائل برخوردار است (De sliv et al. 2014). در ایران، استفاده از مدل HEC-HMS برای تعیین حساسیت اثر عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز در خروجی حوضه دماوند نشان داد که رفتار هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها نسبت به خروجی غیرخطی و عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها با تأثیر بر سیل خروجی حوضه با روش مورد استفاده قابل شناسایی است (Khosroshahi et al. 2005). مطالعه حوضه آبخیز باغ‌ملک استان خوزستان نشان داد که نتایج حاصله از اجرای مدل با روش شماره منحنی (CN) سازگاری دارد (Neshat et al. 2006).

در حال حاضر آنالیز حساسیت نقش کلیدی در تحلیل‌های مربوط به سیلاب دارد و استفاده از آن برای تحلیل‌های کوتاه مدت و بلند مدت خردمندانه است (Perrin et al., 2007) . آنالیز حساسیت بینش توانمندی در مطالعه نتایج مدل ایجاد می‌کند که در جریان نتیجه‌گیری ناشی از مدل‌سازی هیدرولوژیکی از جمله ریسک خطر یا کاهش خطر مهم است (Beven et al.,2008).

Olayinka و همکاران (2017) با استفاده ازHECGeoHMS و ArcGIS 10.2 و به‌کارگیری مدل ارتفاع دیجیتال LIDAR (DEM)، داده‌های زهکشی، و نقشه کاربری اراضی را برای ترسیم حوضه آبریز و مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده کردند و نشان دادند که تخمین خروجی‌های هیدرولوژیکی با استفاده ازHEC-HMS وGIS امکان‌پذیر است و می‌توان چنین فن‌آوری‌هایی را در پیش‌بینی و توسعه سیستم‌های اساسی هشدار سیل برای منطقه به‌کار گرفت.

Natarajan و همکاران (2019) با ایجاد یک مدل شبیه‌سازی باران-رواناب دبی اوج جریان و حجم رویداد شدید بارشی را در ۲۲ نوامبر ۱۹۹۹ در حوضهKoraiyar ungauged واقع در جنوب شهر Tiruchirappalli در جنوب هند تخمین زدند. برای تجزیه و تحلیل از مدل ارتفاعی دیجیتال پردازش شده با سیستم اطلاعات جغرافیایی(GIS) وHEC-GeoHMS که الحاقی GIS است، استفاده شد. در این مطالعه از تعداد

منحنی SCS و هیدروگراف واحد SCS برای تعیین تلفات و تبدیل بارش به رواناب استفاده گردید. مقدار نش-ساتکلیف برای دبی اوج و حجم جریان برابر ۰/۷ است که بالاتر از مقدار به دست آمده از فرآیند هایتوگرافی است، ازاین‌رو، مدل ارائه شده به‌عنوان مدل بهتری برای تولید دبی اوج و حجم سیلاب برای دوره‌های مختلف بازگشت در حوضه انتخاب و برای سایر مطالعات در شرایط مشابه پشنهاد شد. Tassew و همکاران (2019) نشان دادند که مدل هیدرولوژیکیHEC-HMS با شرایط گرمسیری سازگار است. در نتیجه‌ی کالیبراسیون مدل برای بهینه‌سازی پارامترها نشان دادند که عدد منحنی پارامتری حساس است. هیدروگراف واحد Snyder و روش تخمین جریان پایه به‌عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت سیلاب یافت شد. مطابق با معیارهای مشابه، ترکیب مدل شامل کمبود و اتلاف ثابت، هیدروگراف واحدSnyder به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی سیلاب، نتایج رضایت‌بخشی را برای شبیه‌سازی‌های بلند مدت در منطقه مورد مطالعه ارائه کرده است.

مطالعه و تحلیل عوامل مؤثر بر برآورد دبی اوج سد سردشت از طریق مسیریابی هیدروگراف از حوضه و مخزن نشان داد که سیلاب طراحی بیشترین حساسیت را نسبت به میزان بارندگی دارد (Heydari et al., 2020). آن‌ها بیان کردند که تمام عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی لزوماً وابسته به مراحل اجرای شبیه‌سازی نیست، بلکه بخش زیادی از عدم قطعیت‌ها ساختاری و ناشی از نحوه تهیه مدل‌ها است.

در این پژوهش با استناد به سه پایه اساسی در تولید خودکار ساختار مدل در محیط نرم‌افزاری، پارامترهای مورفومتری حوضه آبریز بالاست سد دز استخراج، و مدل بارش-رواناب از طریق الحاقیه‌های ArcHydro و HEC-GeoHMS در محیط GIS بر پایه سه اندازه سلولی ۱۲، ۳۰ و ۷۰ متری تهیه می‌شود. مدل‌های تولید شده با شرایط اولیه در طول یک سال در نرم‌افزار HEC-HMS اجرا می‌گردد.با استفاده از آماره کمترین خطا در گام اولیه مدل‌های تولید شده با مرزبندی متفاوت زیرحوضه‌های آبریز، با هم مقایسه می‌شود.

با توجه به اهمیت اندازه و سایز ابعاد مش توپوگرافی، در این پژوهش ابتدا اثر سایر اندازه مش در شرایط یکسان برای بهترین پاسخ‌دهی در مدل‌سازی و استخراج پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی ارایه می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، حوضه آبریز بالادست سد دز تا مرزهای مستقل هیدرولوژیکی که توسط حدود زیرحوضه‌های آبریز درجه ۲ وزارت نیرو تعیین شده است، به‌منظور تعیین مقدار آورد جریان‌های رخدادی در محدوده سد و بررسی بلند مدت سیلاب در یک دوره آماری در دسترس مد نظر قرار گرفته شده است. سد دز نخستین سد از رشته سدهای چند منظوره در ۲۳ اسفند ۱۳۴۱ مورد بهره‌برداری قرار گرفت. با احداث سد دز در پشت دیواره این سد دریاچه‌ای به طول ۶۵ کیلومتر به وجود آمده که با ظرفیت نهائی ۳/۳ میلیارد مترمکعب آب را در خود جای می‌دهد. هدف اصلی از احداث سدهایی نظیر سد دز تأمین نیروی لازم جهت تولید برق کنترل سیلاب‌ها و تنظیم آب جهت مصارف آبیاری است. شکل ۱ موقعیت سد دز را در پایین‌دست مرز بسته شده حوضه آبریز خود نمایش می‌دهد. برای شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب الحاق‌های ArcHydro و HEC-GeoHMS در محیطGIS به همراه مدل HEC-HMS انتخاب شده است.

۲-۱- توسعه مدل بارش رواناب

برای شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب الحاقیه‌های ArcHydro و HEC-GeoHMS در محیط GIS به همراه مدل HEC-HMS انتخاب‌شده است. برای شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب در نرم‌افزار HMS-HEC ابتدا مدل حوضه را با استفاده از نقشه‌های DEM حوضه موردمطالعه، در محیط GIS با استفاده از الحاقیه GeoHMS-HEC ساخته شد. در این راستا، ابتدا مراحل پیش‌پردازش مدل، شامل تهیه نقشه جهت جریان، جهت تجمعی جریان، تعیین مسیر جریان، و در نهایت استخراج زیرحوضه‌ها و استخراج الیه خطی آبراهه انجام گردید. در ادامه موقعیت ایستگاه‌های حوضه، به محدوده پروژه معرفی شد.

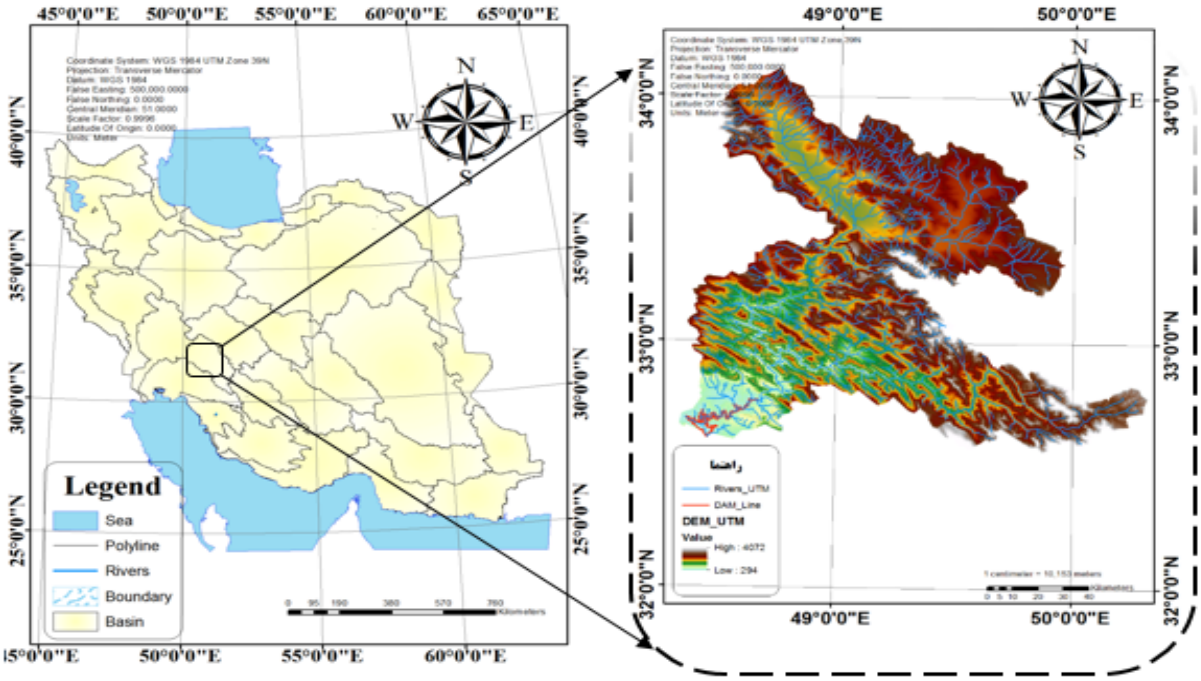

Fig. 1 Location of the study area - Dez Dam.
شکل ۱ موقعیت ناحیه مورد مطالعه – سد دز.

تفاوت مدل‌های ساخته شده در سناریوهای مختلف، در نتیجه‌ی اختلاف آن‌ها در شیب‌ها و جهت‌های هشت گانه متفاوت در نقاط دارای حساسیت (شیب اندک) توسط مدل‌ساز تعیین می‌گردد. افزایش دقت سلولی اگرچه منجر به مرزبندی صحیح‌تر در ساخت یک مدل خواهد شد، همواره تأکید کارشناسان هیدرولوژی برای توسعه، هماهنگی بین پردازنده، مقداردهی پارامترها و تعیین درست ساختار متناسب با موارد مذکور است.

۲-۲- روندیابی سیل

مفهوم اصلی روندیابی سیل آن است که اگر مشخصات یک هیدروگراف در یک نقطه از رودخانه در دسترس باشد، می‌توان به مشخصات هیدروگراف در نقطه‌ای دیگر از همان رودخانه دست یافت. در واقع روندیابی سیلاب یکی از فرآیندهای محاسباتی برای حوضه‌هایی است که برنامه ایجاد سازه‌های مدیریتی و حفاظتی نظیر بندها و سدها و... در آن‌ها مد نظر قرار گرفته باشد.

در مطالعه حاضر، از میان روش‌های گوناگون، روش پرکاربرد ماسکینگام جهت حل عددی روندیابی انتخاب گردید. با استفاده از روندیابی ماسکینگام می‌توان براساس یک واقعه بارش (و به دنبال آن ایجاد رواناب سیل در رودخانه هدف) و با اندازه‌گیری دبی حاصله در یک بازه مشخص از رودخانه (بالادست و بعلاوه پایین‌دست)، به ضرایب ویژه‌ای تحت عناوین x و k دست یافتو سپس در گام‌های محاسباتی آتی براساس این ضرایب و با استفاده از معادلاتی معین که در ادامه آمده است، به پیش‌بینی مقدار هیدروگراف یک سیل بر طبق اندازه‌گیری‌های پیشین اقدام نمود. مفهوم کلی این محاسبات براساس معادله اساسی روندیابی قابل درک می‌باشد (Barrati, 2011):

$$\frac{ds}{dt} = I - O \qquad (1)$$

که در آن I مقدار جریان ورودی به بازه مطالعاتی در رودخانه و O مقدار جریان خروجی از همین بازه می‌باشد. سمت راست معادله بیانگر میزان تغییرات ذخیره در یک بازه زمانیاز رودخانه و شامل ذخیره منشوری و ذخیره تیغه‌ای به شکل هم‌زمان است. همچنین همین مفهوم را می‌توان به شکلی دیگر در رابطه اساسی مشاهده نمود.

$$(\mathbf{S_2}-\mathbf{S_1})=\left(\frac{\mathbf{I_1}+\mathbf{I_2}}{\mathbf{2}}\right)\mathbf{\Delta T}-\left(\frac{\mathbf{O_1}+\mathbf{O_2}}{\mathbf{2}}\right)\mathbf{\Delta T} \qquad (2)$$

که در آن ΔT عموما و نه لزوماً معادل با یک ششم دبی اوج هیدروگراف سیل مورد نظر است. I1، I2 و O1، O2 به ترتیب برابر با جریان ورودی و جریان خروجی از حوضه در ابتدا و انتهای گام زمانی محاسبات می‌باشد. S1 و S2 نیز مقدار ذخیره جریان را در ابتدا و انتهام گام محاسباتی مشخص می‌کند.

آنچه در روش ماسکینگام اهمیت دارد، مشخص و معین بودن پارامترهای موجود در سمت راست معادله اساسی می‌باشد؛ در این صورت است که با طی نمودن ادامه محاسبات می‌توان به جواب نهایی دست یافت. در عین حال خطای محاسباتی که در روش‌های تجربی برای مناطق فاقد آمار نظیر حوضه سد دز وجود دارد، در هنگام اطلاق به آبراهه‌های ناهمگن در ساختار ناهمگن حوضه خروجی را

۳-۱- ساختار بهینه مدل و روندیابی سیلاب در حوضه آبریز

ساختار مدل‌سازی در هر مورد بدون انجام عملیات Merge باقی گذاشته شده است. به این معنی که در توسعه مدل‌سازی، ترکیب زیرحوضه‌ها مد نظر نبوده است. این امر خود پایه اساسی کاهش دقت در خروجی به دست داده شده است. با این مفهوم که اگرچه سطح لایه‌ها متفاوت می‌باشد اما لایه‌های ۳۰ متری بهترین مرزبندی داخلی را برای مدل‌های بارش-رواناب و یا شاید مدل‌های هیدرولوژیکی به دست می‌دهد. علت تهیه کامل مدل ۳۰ متری برای محدوده وسیعی از کره زمین نیز می‌تواند تأیید همین موضوع در امر مطالعات نرم‌افزاری و مدل‌های مکانی تلقی شود.

جدول ۱ خروجی سه اجرای شبیه‌سازی بلند مدت را بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ توسط سه مدل ساخته شده با اندازه سلولی مدل رقومی ارتفاع ۱۲ و ۷۰ و ۳۰ متری نمایش می‌دهد. در هر دو مورد اولیه مقدار خطای اولیه بسیار بالاتر از مدل ایجاد شده با لایه DEM با اندازه سلولی ۳۰ متری بود. علت اصلی این موضوع به نحوه گزینش حوضه‌ها و در نتیجه انحراف آماری در مرحله اختصاص دچار خطای مشهود کند.

ضریب نش-ساتکلیف ENS یکی از رایج‌ترین شاخص‌هایی است که برای ارزیابی و کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست که نسبت واریانس باقی مانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد.

$$ENS=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i}-Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i}-\bar{Q}_{obs,i})^2} \qquad (3)$$

در این رابطه $Q_{sim,i}$ نشان‌دهنده دبی شبیه‌سازی‌شده، $Q_{obs,i}$ دبی مشاهداتی و $\bar{Q}_{obs,i}$ میانگین دبی مشاهداتی هستند. در این رابطه دامنه تغییرات ENS از $-\infty$ تا ۱+ بوده که مقدار بهینه‌ی آن‌یک می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

داده، باز می‌گردد. شکل ۲ ساختار مرزبندی حوضه‌ها در مدل ۳۰ متری را نشان می‌دهد. به‌عنوان اصلی‌ترین عامل انحراف آماری (بیشترین و کمترین انحراف پارامترهای مدل نسبت مقدار اولیه خود)، می‌توان به نقش روند یابی در زیرحوضه‌ها اشاره کرد.

در این تحقیق نرم‌افزار به عنوان خروجی، محاسبات را به‌صورت خودکار در درون خود انجام و نتایج را در خروجی‌های هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که اجرای مدل با استفاده از لایه‌های مدل رقومی ارتفاع با ابعاد ۱۲ متری و ۷۰ متری، در خروجی اولیه، مقدار خطای نش را بسیار بیشتر از مدل ساخته شده با لایه ۳۰ متری نشان می‌دهد (جدول ۱). علت این امر در مدل ۷۰ متری به دقت سلولی DEM برمی‌گردد. با این حال مدل ۱۲ متری به علت وسعت بالای ناحیه و افزایش تصاعدی حجم محاسبات، مقدار مرزبندی انجام داده جهت استخراج زیرحوضه‌ها را با انحراف آماری صورت داده است.

۳-۲- واسنجی مدل

در این پژوهش از ۲۵ درصد دوره برای صحت سنجی (از

جدول ۱ خلاصه آماری خطا در اجرای اولیه مدل در ساختارهای ۱۲، ۳۰ و ۷۰ متری.

Table 1 Statistical summary of the error in the initial implementation of the model in 12, 30 and 70 meter strucures

Model title	Title	simulation	Observations	Difference	Percent
DEM 12 meter layer	Volume (MM)	7828.63	6089.40	1739.23	0.286
	Peak Flow (M3/S)	6619.10	5689.10	930.00	0.163
	Time of Peak	12Mar2005, 00:00	12Mar2005, 00:00		
	Time of Center of Mass	18Jan2007, 08:15	23May2006, 21:18		
DEM 30 meter layer	Volume (MM)	7828.63	6089.40	939.23	0.154
	Peak Flow (M3/S)	6619.10	5689.10	470.00	0.083
	Time of Peak	12Mar2005, 00:00	12Mar2005, 00:00		
	Time of Center of Mass	25Jan2007, 08:15	23May2006, 17:48		
DEM 70 meter layer	Volume (MM)	8228.63	6089.40	2139.23	0.351
	Peak Flow (M3/S)	7359.40	5689.10	1670.30	0.294
	Time of Peak	12Mar2005, 00:00	12Mar2005, 00:00		
	Time of Center of Mass	28Jan2007, 08:15	23May2006, 11:28		

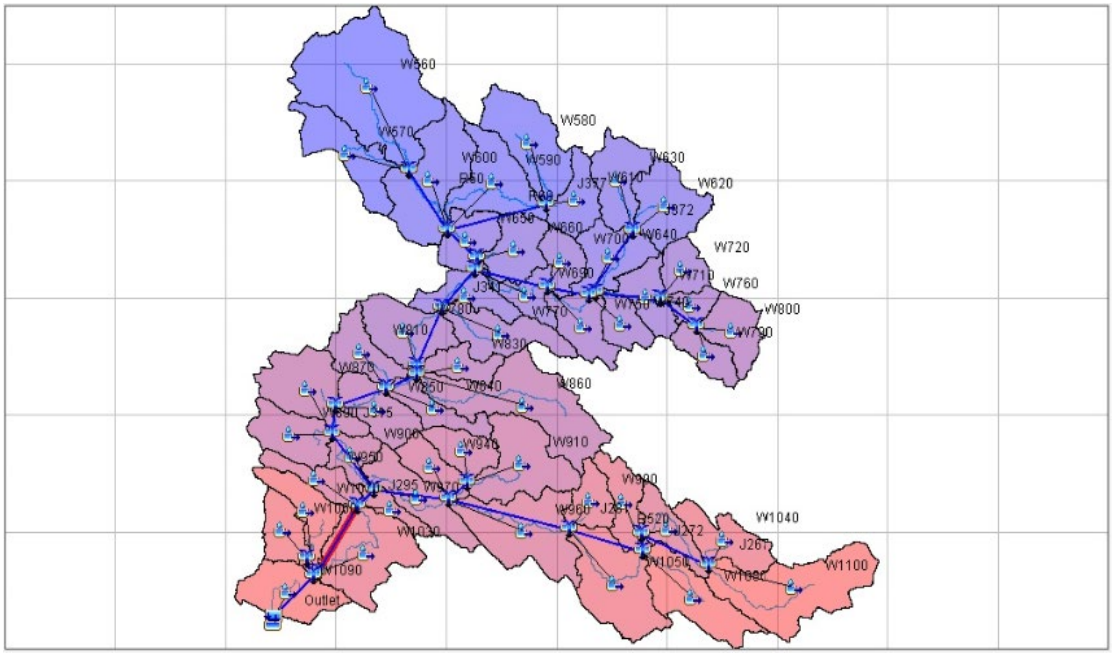

Fig. 2 Model made with 30 meter DEM layer.

شکل ۲ مدل ساخته شده با لایه ۳۰ متری DEM.

سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷) و از مابقی دوره (از سال ۲۰۰۰ تا ژانویه ۲۰۱۳) برای انجام واسنجی استفاده شده است. واسنجی در این مرحله بر روی المان‌های بالادست نقطه منتخب صورت گرفته است. هر عنصری تا نقطه واسنجی مجاز به شرکت در این مرحله از واسنجی است. شرط اساسی، استفاده از ضرایب اولیه اجرا شده در مرحله پیش شبیه‌سازی در مدل صفر واسنجی حاضر است. با انتخاب مدل ۳۰ متری، به‌منظور انجام واسنجی مدل بارش-رواناب منطقه، در هر مورد از داده‌های تخمین سیلاب واقعه به‌وسیله هیدروگراف‌های مشاهداتی، المان‌های بالادستی

نقطه واسنجی به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی به مدل معرفی می‌شود. خروجی بهینه‌سازی با بازه تخمین معقول که توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود، به نزدیکی بالای دبی مشاهداتی و محاسباتی انجامید. در این پژوهش از حداکثر داده‌های موجود برای اجرای واسنجی بهره‌گیری شد.

در مجموع در یک گام واسنجی صورت پذیرفت که در ادامه خروجی به‌صورت نمودار مقایسه رقوم جریان بعد از واسنجی، نمودار کاهش خطا تابع هدف (خطای نش-ساتکلیف)، نمودار مقایسه داده‌های بارش و دبی محاسباتی و جدول نهایی خلاصه آماری معرف اوج جریان می‌باشد. در ادامه نمودار مقایسه‌ای QQ جریان که نوع اسکتر هست، مقدار تفاوت زوج مرتب داده‌هایی که براساس تنش زمانی معرفی شده‌اند را نشان می‌دهد. هر چقدر داده‌های محاسباتی و مشاهداتی به خط تقارن برازش پیدا کنند همخوانی داده‌ها را نشان می‌دهد. (شکل ۳)

نمودار مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی، در عنصر واسنجی، شرایط قیاس بصری را برای کاهش مقدار خطا مشخص می‌کند. (شکل ۴)

۳-۳- صحت سنجی مدل

با توجه به آنکه در فرآیند مدل‌سازی، رقوم واقعی از جریان آب در اختیار بوده است، انجام صحت سنجی براساس اعداد

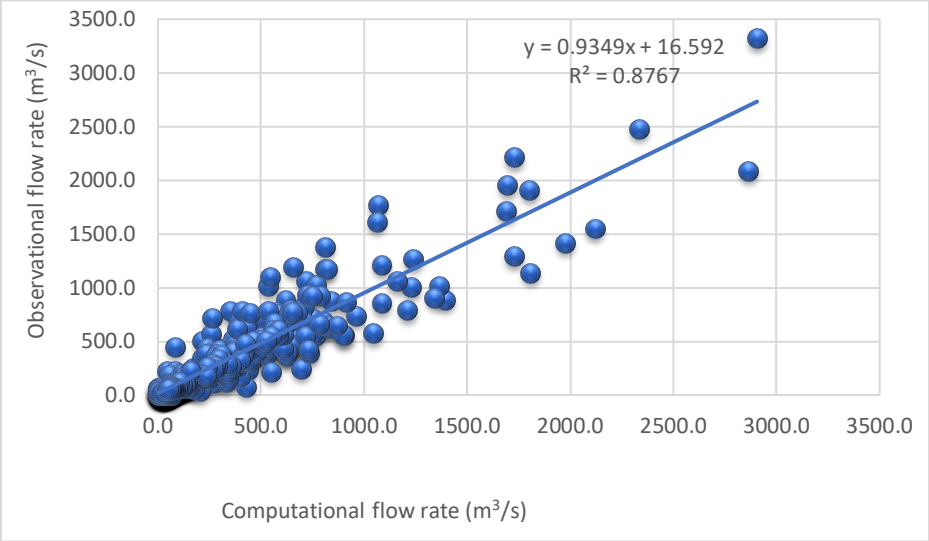

Fig. 3 Comparison of flow figures after calibration.
شکل ۳ مقایسه رقوم جریان بعد از واسنجی.

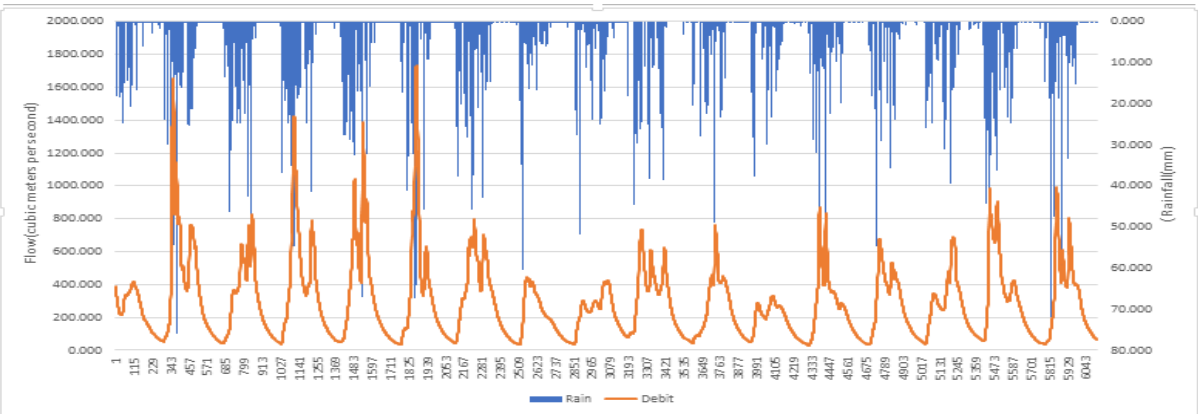

Fig. 4 Comparison of precipitation-discharge data
شکل ۴ مقایسه داده‌های بارش-دبی

جدول ۲ خلاصه آماری خطا در انتهای مرحله واسنجی.

Table 2 Statistical summary of the error at the end of the calibration step.

Model title	Title	simulation	Observations	Difference	Percent
DEM 30 meter layer	Volume (MM)	7101.71	6089.4	1012.3	16.620
	Peak Flow (M3/S)	2105	5689.1	-3584.1	-63
	Time of Peak	12Mar2005, 00:00	12Mar2005, 00:00		
	Time of Center of Mass	25Jan2007, 08:15	23May2006, 17:48		

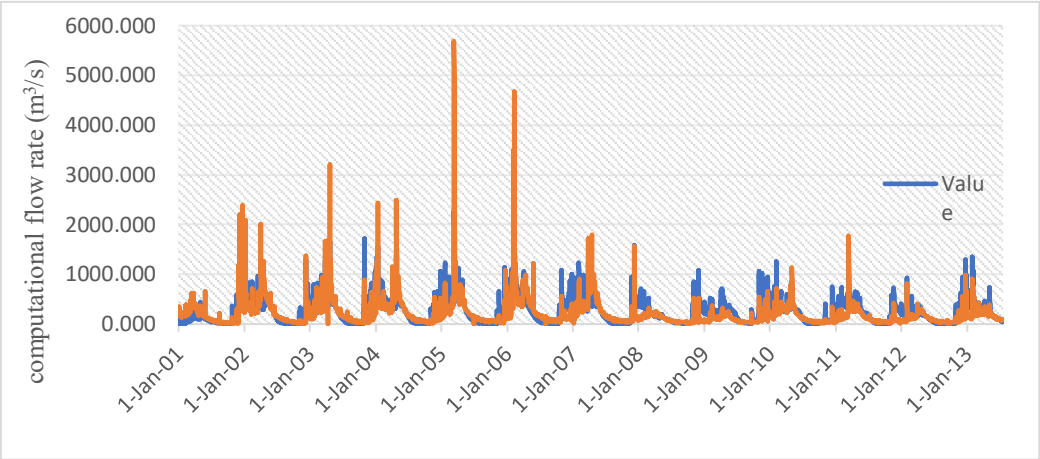

Fig. 5 Observational and computational hydrographs in the validation stage of the 30-meter model.

شکل ۵ هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در مرحله صحت سنجی مدل ۳۰ متری.

تخمین جریان در یک دوره بلند مدت میسر بود. در صورت برابری مقدار بارش که از روش مجزایی محاسبه گردیده است، با مقدار جریان خروجی محاسباتی مدل با ارقام تخمین هیدورگراف در همان دوره تناوب رخداد، می‌شود صحت مدل را حداقل در تخمین سیل‌های تداومی تائید کرد. مقدار خطا در دوره صحت‌یابی شاهد هیچ گونه افزایشی نبوده است. کوتاه‌تر بودن دوره صحت یابی می‌تواند علت برتری نتایج در این بررسی باشد. نمودار مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی، در عنصر واسنجی، شرایط قیاس بصری را برای کاهش مقدار خطا مشخص می‌کند که این موضوع در شکل ۵ نمایش داده شده است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که اختلاف قابل توجهی در برخی از نقاط وجود دارد. با وجود این اختلاف در برخی از ماه‌ها، تطابق مناسبی بین نمودارهای محاسباتی و دریافتی وجود دارد.

به‌عنوان یک خروجی مهم در محاسبات مدل‌سازی، می‌توان برای عنصر سد دز، مقدار تغییرات جریان و حجم را به دست آورد. مقایسه مستقل به‌منظور تائید فرآیند مدل‌سازی با سامانه WOBS انجام شد. در این پژوهش با توجه به آنکه مقدار جریان‌های مشاهداتی توسط ضرایب متعدد تبدیل جریان نسبت به وقایع روی زمین تهیه شده است، فواصل عناصر تا حد بالایی از کمبود خطا مقدار درستی از جریان‌ها را نشان می‌دهند. شکل ۶ و ۷، در خروجی حوضه، مقدار جریانی که یک مجموعه رخداد بارش به تغییرات سطح و حجم آب در سد بدل می‌شود را با یکدیگر مقایسه کرده است.

در واقع شکل بالا که مربوط به ساختار جریان سد دز است هیدروگراف‌های سد دز را که شامل بخش‌های زیر است نشان می‌دهد:

- A-مجموع جریان‌های ورودی به سد دز را در طول دوره آماری موردنظر نشان می‌دهد.

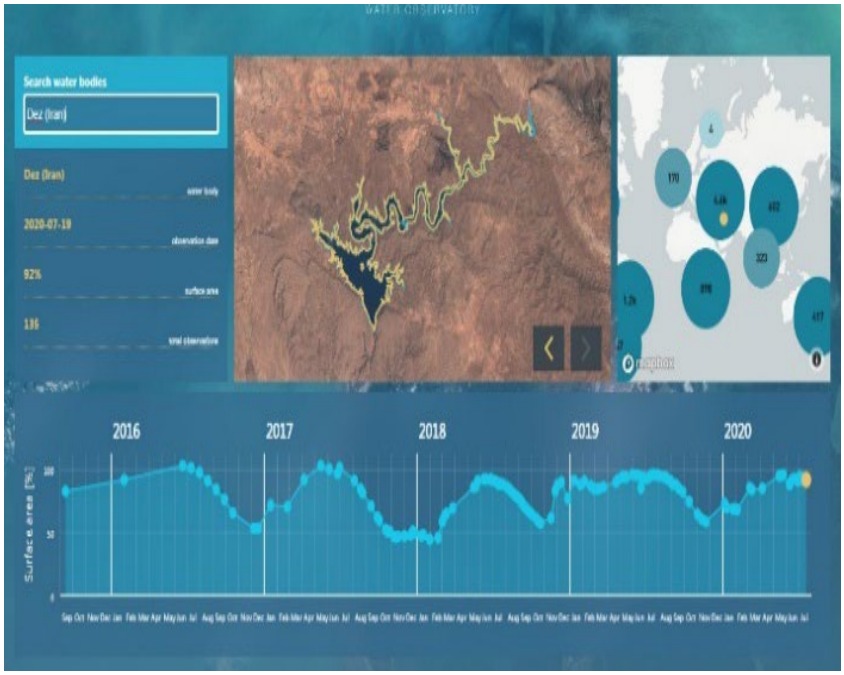

Fig. 6 Dez dam height changes in WOBS ground monitoring system.

شکل ۶ تغییرات ارتفاعی سد دز در سامانه پایش زمین WOBS.

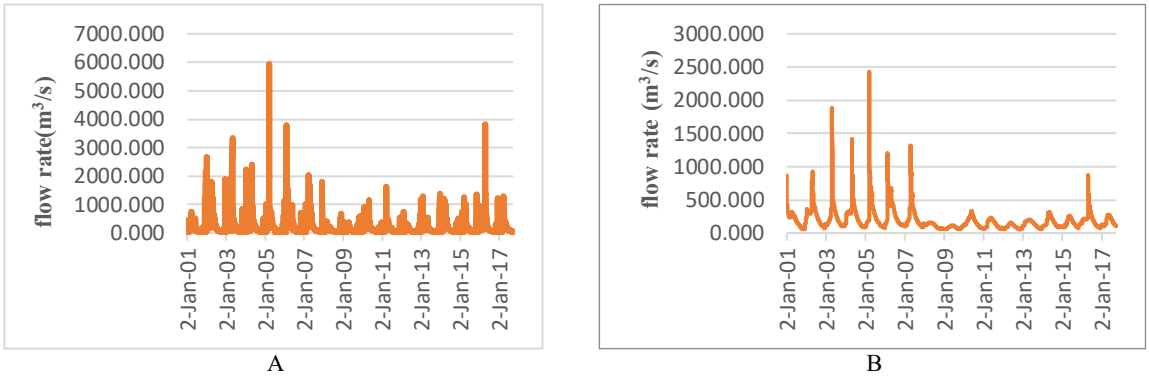

Fig. 7 Flow hydrographs and structure of Dez dam.

شکل ۷ هیدروگراف‌های جریان و ساختار سد دز.

- B-جریان‌های خروجی از سد دز را برحسب مترمکعب نشان می‌دهد.
- C-حجم دبی ذخیره در سد را که در طی این سال‌ها چگونه بوده را نشان می‌دهد.
- D-ارتفاع آب در مخزن را برحسب متر در این نمودار نشان می‌دهد.

در ارتباط با نتایج مشاهده شده در مطالعه حاضر، ذکر این نکته ضروری است که این نتایج تنها بر روی حوضه آبریز کارون به دست آمده است. این موضوع که نتایج مشاهداتی در این مطالعه محدود به این حوضه آبریز است، جز محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌باشد. به بیان دقیق‌تر، مشاهدات به دست آمده در این مطالعه محدود به این حوضه یا حوضه‌هایی می‌باشد که خصوصیات فیزیکی مشابهی با حوضه مطالعاتی حاضر داشته باشند. این موضوع که تغییر حوضه آبریز چه اثری بر نتایج خواهد داشت، بحث مهمی است که باید در مطالعه‌ای جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

٤- نتیجه‌گیری

به‌منظور تحلیل عدم قطعیت ساختاری در یک نمونه شبیه‌سازی نرم‌افزاری از سامانه‌های هیدرولوژیکی، در این پژوهش با استفاده از پارامترهای مورفومتری حوضه آبریز بالادست سد دز، اقدام به توسعه مدل بارش-رواناب از طریق الحاقیه¬های ArcHydro و HEC-GeoHMS در محیط GISبر پایه سه اندازه سلولی حدودا ۱۲، ۳۰ و ۷۰ متری شده است. مدل‌های تولید شده با شرایط اولیه یکسان در نرم‌افزار HEC-HMS اجرا شد. مبنای برتری هر مدل تولید شده با مرزبندی متفاوت، کمترین خطا در گام اولیه بود. در نهایت مدل ۳۰ متری به‌منظور اجرای واسنجی و صحت سنجی در یک دوره تداومی از آمار هیدرومتری انتخاب شد. برتری مدل ۳۰ متری نسبت به مدل با پایه ۷۰ متر از رقوم ارتفاعی، دقت بالاتر ضرایب مدل و همچنین در مقابل لایه ۱۲ متری، کاهش انحراف آماری نتیجه‌گیری شد.

با توجه به آنکه در فرآیند مدل‌سازی، رقوم واقعی از جریان آب در اختیار بوده است، بنابراین انجام صحت‌سنجی براساس اعداد تخمین جریان در یک دوره می‌تواند ضامن تائید شبیه‌سازی باشد. با این حال مدل‌هایی که با انبوهی از داده‌ها به‌عنوان پارامترهای ورودی مواجه هستند، به همان اندازه که مدل‌هایی با ساختار متراکم و ناهمگن توسعه پیدا می‌کنند، از خود ناکارآمدی نشان خواهند داد.

در اینجا روش تهیه مدل‌های بارش-رواناب حوضه آبریز مستقل سد دز، تماما نرم‌افزاری بوده است. بنابراین نمی‌توان علت تفاوت فاحش خطای موجود در مدل¬های با پایه DEM 12 و ۷۰ متری را به خطایی غیر از روش محاسباتی نسبت داد. الگوریتم D8 در مدل‌سازی‌های محیطی به‌عنوان یک روش شناخته شده مسیریابی، جریان را تا نقطه خروجی براساس تراکم سلولی پیدا خواهد کرد. این روش آبراهه‌های مستخرج را ملاک مرزبندی حوضه‌های آبریز قرار می‌دهد. توزیع ناهمگن حوضه‌ها و در نتیجه الحاق مقادیر ناهمسان پارامتری نظیر ضرایب روندیابی به‌عنوان مهم‌ترین این موارد که در این مقاله بحث شد، منجر به انحراف آماری و در نتیجه خطا در خروجی محاسبات می‌شود. و در تحلیل حساسیت پارامترها (CN-LagTime-K-X) می‌توان به این نتیجه رسید که از بین پارامترهای ضروری در مدل ضریب K ماسکینگام مهم‌ترین پارامتر و ضریب LagTime (زمان تآخیر) کمترین اثر را در تحلیل فرآیند بارش-رواناب و دقت مدل‌سازی دارد.

٥- فهرست نشانه‌ها

دبی (m^3s^{-1})	Q
مقدار جریان ورودی (m^3s^{-1})	I
مقدار جریان خروجی (m^3s^{-1})	O
زمان (s)	T
زیرنویس‌ها:	
شبیه‌سازی شده	sim
مشاهده شده	obs

٦- سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه خوارزمی بابت حمایت و تهیه امکانات

لازم در تهیه مقاله حاضر کمال تشکر را دارند.

منبع‌ها References

Barati, R. (2011). Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead simplex algorithm. Journal of Hydrologic Engineering, 16(11), 946-954.

Beven, K. Pappenberger, F. Ratto, M. (2008). Milti-Method global sensitivity analaysis of flood in undation Models,Advances in water Resources, 31(1) ,1-14.

De Silva, M. M. G. T., Weerakoon, S. B., & Herath, S. (2014). Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEC–HMS: case study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. Journal of Hydrologic Engineering, 19(4), 800-806.

Heydari BISEFR, A., Hesari, B., Samadian, M. (2020). Sensitivity analasis of parameters affecting the design flood using HEC-HMS mathematical model. Iranian journal of Eco HYDROLOGY, 7(4) , 951-965.

Jain, S. K., Singh, R. D., & Seth, S. M. (2000). Design flood estimation using GIS supported GIUHApproach. Water resources management, 14(5), 369-376.

Khosroshahi, M., Saghfian, B. (2005). Determining the sensitivity of the effect of some factors affecting the flooding of watershed sub-basins using basin outlet hydrograph analysis and application of HEC-HMS model, Journal Forests and pastures (forests and pastures) , NO 67.(In Persion)

Mahmoudian Shushtari, M., M.R. Tabatabai Majdzadeh and A. Yoosefi. (2003). Study and application of HEC-HMS model in River Engineering (Case study: River kor and Sivand in the fars Province), Proceedings of the 6th Int. River Engineering Conference. Ahvaz, pp: 1061-1068

Neshat, A., Sedghi, H. (2006). To Evaluation the Rate of Run Off Hydrographs of Floods in Bagh Malek Watershed Basin of Khozestan Using SCS Abstraction Parameters and HEC-HMS MODEL, Journal of Agricultural Sciences, 12(4), 787-798. (In Persion)

Natarajan, S., & Radhakrishnan, N. (2019). Simulation of extreme event-based rainfall–runoff process of an urban catchment area using HEC-HMS. Modeling Earth Systems and Environment, 5(4), 1867-1881.

Olayinka, D., & Irivbogbe, H. (2017). Estimation of Hydrological Outputs using HEC-HMS and GIS. NJ Environ. Sci. Technol, 1, 390-402.

Oleyiblo, J. O., & Li, Z. J. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. Water Science and Engineering, 3(1), 14-22.

Perrin, C., Oudin, L. (2007). Impact of stream flow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models, Hydrological sciences Journal, 152.

Rajkumar, S., Mishra, S. K., & Singh, R. D. (2021). Application of hydrologic modelling system (HEC-HMS) for flood assessment; case study of Kelani River Basin, Sri Lanka. In Hydrological extremes (pp. 3-18). Springer, Cham.

Sampath, D. S., Herath, S., & Weerakoon, S. B. (2015). HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment with intra-basin diversions-case study of the Deduru Oya river basin, Sri Lanka.

Singh, P. K., Mishra, S. K., & Jain, M. K. (2014). A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. Hydrological Sciences Journal, 59(2), 239-261.

Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2019). Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. Hydrology, 6(1), 21.

Yilma, H., Moges, S.A. (2007). Application of semi-distributed conceptual hydrolog-ical model for flow forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, acase study of Gilgel Abbay catchment. Catchment and Lake Research, 200.