

EXTENDED ABSTRACT

Investigating The Hydrological Drought Trend using the SWAT Model (Case Study: Qatur Chay Watershed)

Mahsa Mohammad Hossein Zadeh ^{*a}, Hossein Rezaie ^b

^a PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

^b Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 29 December 2024; **Reviewed:** 04 March 2025; **Accepted:** 12 April 2025

Keywords:

Qatur Chay watershed, SWAT, SUFI2 algorithm, Uncertainty analysis, SPI and SDI drought indices.

1. Introduction

In this study, the hydrological performance of the Qatur Chay watershed was analyzed with using the SWAT soil and water model with data from 9 rainfall stations and one synoptic station over a 29-year period (1987-2018). The sensitive parameters results showed that the values of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient varied between 0.64-0.85 during the calibration period and 0.50-0.7 during the validation period at the hydrometric stations, indicating the good performance of the SWAT model. Then, the hydraulic drought index SDI in all sub-basins and the meteorological drought index SPI were also determined in the sub-basins. The results of the index study showed that in the upstream sub-basins, the alignment of the SPI and SDI indices (in sub-basins 3, 14, 15, 7, 8) was observed, and in other sub-basins, there was less alignment between the indices, which was due to surface water withdrawal along the route to the outlet point and land use change. Therefore, in the absence of data to calculate drought indices, the SWAT model can be used to simulate predictions and statistical gaps, and to evaluate the causes of land use changes, a comparison of the two indices can be used.

2. Methodology

2.1. Study area

The Qatur Chay watershed is located in the northwest of Iran, adjacent to the watersheds of Lake Urmia and the Zangmar and Ahar Chay rivers in West Azerbaijan province.

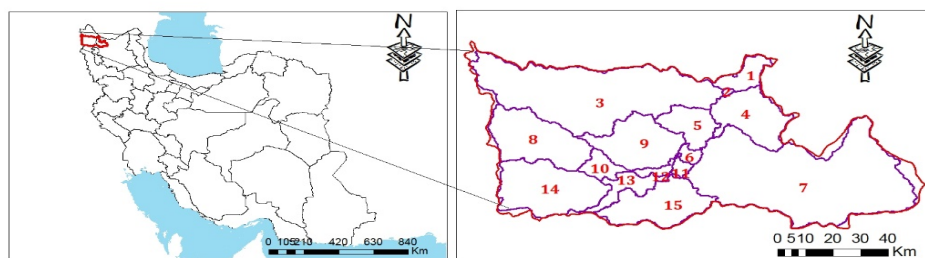


Fig. 1. Geographical location of the study area and sub-basins

The Qatour River, with a basin area of 68,400 hectares, is one of the largest rivers in the Aras River basin in West Azerbaijan province. The climate of the region in the basin is temperate, and the Qatour River is one of the important branches of the Aras River in Iran and flows mainly in the Khoy (Qatour) watershed (Fig. 1).

2.2. SWAT set-up and calibration, validation and uncertainty analysis

In this study, the land use map of the study area was divided into 14 specific cover types, and the soil map of the area was divided into 5 different classes, and the slope of the area was divided into 5 categories based on the digital elevation map, which showed a large difference in elevation. Considering the spatial changes in soil texture, land use, and topographic conditions of the area, the Qatur Chay watershed was divided into 15 sub-basins and 285 hydrological response units. Meteorological data on a daily scale between 1987 and 2018 were used in the simulation, and in order to reduce the effect of initial condition errors in the model, the first three years of the statistical period (1987-1990) were considered for adapting the model to the basin conditions (warm-up). Then, the model was run to simulate the basin runoff on a monthly scale. To improve the performance of the model, sensitive factors were identified and calibrated for uncertainty analysis.

The factor uncertainty of the model in response to changes in known sensitive factors was investigated. For this purpose, the performance of the model in response to changes in the values of its sensitive factors was measured by the Nash-Sutcliffe Efficiency Factor (SUFI2). The simulation uncertainty analysis started with the initial 30 factors. By applying the factors individually in the model and examining the sensitivity of the model to each factor, it was determined that 17 factors have a potential effect on the calibration of the model. The factor CH_K2 (effective hydraulic conductivity of the riverbed) has the most effective factor on the amount of runoff produced in this basin under the SWAT model.

2.2. Investigation of climatic drought index SPI and SDI flow

The SPI index is based on calculating the probability of rainfall occurrence for each time scale, which was first presented by McKee et al. in 1993 for the purpose of monitoring and determining drought in the state of Colorado, USA. This index can be calculated for time scales of 48, 24, 12, 9, 6, 3, 1 month and one year.

According to this method, a drought period occurs when the SPI is continuously negative and less than minus one and ends when the SPI becomes positive. The SDI hydraulic drought index is similar to the relations of the hydrological drought index, with the difference that instead of putting a factor for analysis and evaluation, the flow rate factor is included in it, and it was first proposed by Nalbantis.

3. Results and discussion

3.1. SWAT sensitivity analysis, calibration and validation analysis

Simulation uncertainty analysis started with 30 initial factors. By applying the factors individually in the model and checking the sensitivity of the model to each factor, it was found that 17 factors have a potential effect on the model calibration. It shows the sensitive factors of the model that had the greatest impact on the model calibration. The factor CH_K2 (effective hydraulic conductivity of the river bed) has as the most effective factor on the amount of runoff produced in this basin under the SWAT model. In Table 1, two factors r_SOL_BD (1) and V_ALPHA_BF with t-stat values equal to 0.15 and 0.11 are placed in the second and third rank of sensitive factors, respectively. The above results are consistent with the studies of Ja'farzadeh and Rouhani (2016) and Judi-Hamzehabadi et al. (2016) is consistent.

The evaluation of model simulations in each stage of recalibration shows the range of model changes, or in other words, the uncertainty of the model in response to the fluctuations of its factors. Table 2 shows the uncertainty range of the model in the recalibration and validation period.

The comparison of the simulated flow and observations in Rch9 hydrometric stations also shows the value of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient according to Table 2, which indicates the satisfactory accuracy of the model.

Table 1. Effective factors in flow simulation and uncertainty analysis

p-value	t-stat	Max	min	factor
0.99	0	-0.17	-0.17	R_CN2.mgt
0.9	0.11	0.57	0.49	V_ALPHA_BF.gw
0.96	-0.01	0.6	0.4	V_GWQMN.gw
0.99	0	-0.28	-0.039	V_GW_REVAP.gw
0.97	0.03	0.001	0.03	v_GWHT.gw
0.96	0.05	0.86	0.82	V_CH_N2.rte
0.87	0.16	92.5	83.4	V_CH_K2.rte
0.94	0.07	0.4	0.37	V_ALPHA_BNK.rte
0.97	0.04	5.48	4.84	v_RCHRG_DP.gw
0.93	0.08	0.73	0.67	v_OV_N.hru
0.98	0.02	0.05	0.04	V_ESCO.hru
0.9	0.13	11.4	8.76	r_SOL_AWC(1).sol
0.96	0.04	4.54	4.42	r_SOL_K(1).sol
0.99	0.015	38.2	26.2	r_SOL_BD(1).sol
0.96	0.05	-0.001	0	v_REVAPMN.gw
0.93	-0.08	13.6	7.14	v_DEEPST.gw
0.98	-0.03	17.1	0.49	v_SHALLST.gw

Table 2. Statistical criteria to evaluate the accuracy of the model in simulating the runoff of each station

Validation				Calibration				station	Sub-basin name
R-FACTOR	P-FACTOR	R2	NSE	R-FACTOR	P-FACTOR	R2	NSE		
0	0.04	0.99	0.7	0.10	0.14	0.90	0.85	Marakand- Qatour	Rch2
0	0.14	0.86	0.65	0.23	0.43	0.83	0.78	Muzaffarabad	Rch7
0	0.15	0.88	0.63	0.15	0.20	0.82	0.76	Marakand-Aq-chay	Rch3
0	0.05	0.82	0.46	0.29	0.46	0.72	0.71	badlan	Rch8
0	0.06	0.72	0.54	0.50	0.52	0.67	0.64	Yazdkan Bridge	Rch14
0	0.05	0.98	0.5	0.23	0.35	0.71	0.65	malhazan	Rch9
0	0.03	0.99	0.69	0.16	0.32	0.74	0.69	Musa qoli	Rch15

3.2. SPI and SDI results

As can be seen in Fig.1, in the upstream and mountainous sub-basins (sub-basins 3, 7, 8, 14 and 15) where there are fewer agricultural uses, the alignment of hydrological and meteorological drought indices is quite evident considering the behavior of the SDI drought index in sub-basins 5 and 9, each of which is located in separate sub-basins and on a single branch of the flow path, the alignment of drought indices is observed.

In other sub-basins, since they are located at the outlet of several sub-basins, due to the existence of different uses in these sub-basins, the alignment of indices has acted differently. The different classes of this index for the time period of flow simulation in hydrometric stations in this research based on the flow rate of the studied sub-basins are shown.

4. Conclusions

In this research, first, in order to examine the results of the simulated hydrograph with observational data, an uncertainty analysis of the influential factors in the hydrological modeling structure was performed, and then, using the SPI meteorological drought index, wet and drought periods were examined to determine their impact on the intensity of the basin runoff. Initially, in this study, factor uncertainty analysis of the SWAT model of the Qatur Chay basin was performed using the SUFI2 algorithm in the SWAT CUP software. In the present study, despite the shortcomings of the recorded statistics of the basin's hydrometric and meteorological stations, an attempt was made to reduce the uncertainty caused by the SWAT model factors by selecting the most appropriate and logical range for the factors affecting runoff using the SUFI2 algorithm.

After examining the effective factors in the model calibration, CH_K2 (effective hydraulic conductivity of the riverbed), r_SOL_BD (1) and V_ALPHA_BF are considered sensitive factors. During the calibration period, the uncertainty bandwidth was 0.92 and 68% of the observation data were within the 95% uncertainty band. In general, considering the obtained confidence, it can be stated that the uncertainty of the SWAT model factors has been quantified with appropriate estimation by the SUFI2 algorithm and the model's applicability under different uncertainty conditions is guaranteed.



Fig. 1. Results of the study of hydrological and meteorological drought indicators in the 15 studied sub-basins

On the other hand, comparing the results of hydrological and meteorological drought shows that in the upstream and mountainous sub-basins where there are fewer agricultural uses, the alignment of hydrological and meteorological drought indices is clearly evident. In single-branch sub-basins, despite different uses, the alignment of rainfall and runoff drought can be observed. Therefore, by applying hydrological climate change conditions in the SWAT model in upstream basins and single-branch sub-basins, future hydrological drought conditions can be optimally presented.

بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز قطورچای)

مهسا محمد حسینزاده¹، حسین رضایی^{2*}

¹ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

² استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

دریافت: 1403/10/9، بازنگری: 1403/12/14، پذیرش: 1404/1/23، نشر آنلاین: 1404/1/23

چکیده

تغییر اقلیم و افزایش مدت خشکسالی‌ها سبب افزایش سطح اراضی بایر و کاهش پوشش گیاهی می‌گردد، بنابراین احتمال وقوع رخداد های سیلابی و خسارت‌های جانی و مالی افزایش می‌یابد. در این تحقیق عملکرد هیدرولوژیکی حوضه آبریز قطورچای با داده‌های 9 ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه سینوپتیک (Synoptic station) دوره 29 ساله (1987-2018) جهت تحلیل پدیده خشکسالی هیدرولوژیکی از مدل آب و خاک (SWAT Soil and Water Assessment Tool) استفاده شده است. پارامترهای حساس مدل به کمک الگوریتم SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) در نرم‌افزار SWAT CUP در 7 ایستگاه هیدرومتری مشخص گردید. نتایج نشان داد مقادیر ضریب کارایی نش ساتکلیف (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) در دوره‌های واسنجی در محدوده 0/64-0/85 و اعتبارسنجی 0/50-0/7 در ایستگاه‌های هیدرومتری متغییر بوده و بیانگر کارایی خوب مدل SWAT می‌باشد سپس شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI Standardized Precipitation Index) در کل زیرحوضه‌ها (8 زیرحوضه فاقد ایستگاه هیدرومتری و 7 زیرحوضه دارای داده‌های مشاهده‌ای) و شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI Standardized Precipitation Index) نیز در زیرحوضه‌ها تعیین گردید. نتایج بررسی شاخص‌ها نشان داد که در زیرحوضه‌های آبریز بالادست همسویی شاخص‌های SPI و SDI (در زیرحوضه‌های 3، 14، 15، 7، 8) مشاهده گردید و در دیگر زیرحوضه‌ها همسویی کمتری بین شاخص‌ها وجود داشته که ناشی از برداشت آب سطحی در طول مسیر تا نقطه خروجی و تغییر کاربری اراضی بوده است. بنابراین در صورت فقدان داده‌ها برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی میتوان از مدل SWAT پیش‌بینی‌ها و خلاء آماری را شبیه‌سازی نموده و برای ارزیابی علل تغییرات کاربری اراضی از مقایسه دو شاخص استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: حوضه آبریز قطورچای، SWAT، الگوریتم SUFI2، تحلیل عدم قطعیت، شاخص خشکسالی SPI و SDI.

1- مقدمه

رواناب نقش مهم در زیر حوضه آبریز دارد (Koren و همکاران، 1999).

مدل‌های هیدرولوژیکی به دلیل خطاهای رایج در جمع‌آوری و ثبت داده‌ها و همچنین محدودیت‌های ایجاد شده برای توسعه مدل عموماً به فرآیندهای واسنجی و اعتبارسنجی نیاز دارند که خطا می‌تواند عامل ایجاد عدم قطعیت باشد، اما مفهوم «عدم قطعیت» به هیچ‌وجه برابر با «خطا» نیست. اثر عوامل مختلف ایجادکننده عدم قطعیت در فرآیند مدل‌سازی به صورت تجمعی در نتیجه نهایی مدل نمایان خواهد شد (Galav و Lee، 2012). معمولاً عواملی که در مدل حساسیت بالاتری دارند جهت واسنجی

مدل‌های هیدرولوژیکی نقشی حیاتی برای درک رفتار و پاسخ‌های حوضه آبریز دارند (Singh، 2008، Bárdossy، 2008). شبیه‌سازی جریان برای توسعه حوضه آبریز بسیار مهم است چراکه این امر باعث حفظ پایدار اجزای هیدرولوژیکی از جمله رواناب، آب‌های زیرزمینی، نفوذ، جریان جانبی و تبخیر و تعرق و ... می‌شود. بارندگی یکی از ورودی‌های اولیه برای شبیه‌سازی جریان سطحی است که بر هیدروگراف جریان تأثیر می‌گذارد (Caracciolo و همکاران، 2014؛ Sun و همکاران، 2002) از این رو بررسی شاخص‌های خشکسالی و ترسالی در حوضه‌ها، بارندگی و



زمانی دلخواه به عنوان مناسبترین شاخص محاسباتی خشکسالی شناخته شده است (Rezaie و همکاران، 2016).

این شاخص بر اساس محاسبه احتمال بارندگی برای هر مقیاس زمانی است که برای اولین بار توسط McKee و همکاران در سال 1993 به منظور پایش و تعیین خشکسالی در ایالت کلرادو آمریکا ارائه شده است. این شاخص را می توان برای مقیاس های زمانی 48، 24، 12، 9، 6، 3، 1 ماهه و یک ساله محاسبه کرد (McKee و همکاران، 1993).

بر اساس این روش، دوره خشکسالی زمانی اتفاق می افتد که SPI به طور پیوسته منفی باشد و به مقدار 1- یا کمتر از آن برسد و با مثبت شدن SPI به پایان می رسد (Alizadeh، 2016).

برای محاسبه شاخص SPI، ابتدا با برازش تابع گاما روی داده های بارندگی ماهانه یا کل بارندگی در هر زمان دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن محاسبه می شود، سپس با انتقال این تابع به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر SPI و SRI² محاسبه می شود (Wu و همکاران، 2007).

پراکنش ایستگاه های باران سنجی در زمینه توزیع بارش و تعیین شاخص خشکسالی اهمیت داشته به نحوی که باران سنج ها باید بر اساس فاصله بهینه قرار گیرد. با این حال، بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به ویژه در مناطق تپه ای، با مشکل شبکه باران سنج پراکنده مواجه هستند (Woldemeskel و همکاران 2013). شبیه سازی بارش - رواناب در مدیریت آبخیزداری از اهمیت زیادی برخوردار است.

Smith و همکاران (2004) فرضیه تغییرپذیری مکانی بارش در حوضه های واتس³ و آلدون⁴ را بررسی کرده اند که بارندگی عامل مهم در شبیه سازی های خروجی را نشان می دهد.

Douinot و همکاران (2016) رویکرد راهنمای هدایت سیل ناشی از متوسط بارندگی در حوضه های مدیرانه ای فرانسه با استفاده از یک مدل فرآیند محور هیدرولوژیکی با تأثیر مکانی بارش مورد ارزیابی قرار گرفتند.

Cristiano و همکاران (2017) به بررسی سیستماتیک در مورد تغییرات مکانی و زمانی بارندگی و تأثیر آن بر انعکاس هیدرولوژیکی شهری ارائه کردند و بحث کردند که داده های با دقت بیشتر برای ارائه تنوع ویژگی های حوضه و فرآیندهای هیدرولوژیکی، مانند رواناب سطحی، تبخیر و نفوذ و همچنین بهبود اندازه گیری بارش پاسخ بهتری را در حوضه ارائه می دهد. شبکه باران سنج متراکم یکی از ضروری ترین ورودی ها برای مدل سازی هیدرولوژیکی می باشد. به گفته Brath (2004) چهار باران سنج برای حوضه 1000 کیلومتر مربعی است.

مدل انتخاب می شوند. تحلیل حساسیت توسط روش های مختلف ریاضی و یا بر اساس نتایج بررسی و تحقیقات قبلی در حوضه های مختلف انتخاب می شود (Nasiri و همکاران، 2020؛ Shafiei و همکاران، 2014).

پژوهشگران متعددی استفاده از الگوریتم های مختلف را برای ارزیابی واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل های هیدرولوژیکی توزیعی و نیمه توزیعی پیشنهاد می کنند. از میان روش های گسترده تحلیل عدم قطعیت در مدل های هیدرولوژیکی می توان به الگوریتم های MCMC¹ و الگوریتم های مشابه آن SUFI-2 اشاره کرد (Roodaki و Azizian، 2020).

یکی از مدل های مناسب شبیه سازی هیدرولوژیکی که قابلیت بررسی و تحلیل عدم قطعیت با الگوریتم های مختلف در قالب نرم افزار جانبی SWAT cup را دارد می توان به مدل هیدرولوژیکی SWAT اشاره کرد این مدل اطلاعاتی در مورد اقلیم، ویژگی های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی، مدیریت کاربری اراضی و شیوه های کاربری اراضی ارائه می دهد. فرآیندهای فیزیکی مربوط به حرکت آب، رسوب، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و غیره را مستقیماً از عامل های ورودی شبیه سازی می کند (Abbaspour و همکاران، 2007؛ Yang و همکاران، 2016؛ Akhoun و همکاران، 2018).

مدل SWAT از عامل های ورودی قابل دسترس و اندازه گیری استفاده می کند و از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است. شبیه سازی عملکرد حوضه های بزرگ و پیچیده و با راهکارهای مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل اجراست. این مدل کاربر را قادر به مطالعه تأثیرات بلندمدت می سازد (Maski و همکاران، 2008).

علاوه بر این می توان به کاربرد مدل در شبیه سازی رواناب و مطالعات مدیریت حوضه اشاره کرد. همچنین در بسیاری از مطالعات از این مدل برای پیش بینی وضعیت جریان در شرایط تغییر اقلیم استفاده شده است (Morid و همکاران، 2016).

اخیراً پدیده تغییر اقلیم از جمله چالش های مورد توجه در جهان بوده است. یکی از دلایل وقوع پدیده تغییر اقلیم افزایش گازهای گلخانه ای می باشد که تأثیر زیادی بر وقایع حدی مانند سیل و خشکسالی دارد (Van Pelt و همکاران، 2011؛ Jahangiri و همکاران، 2024).

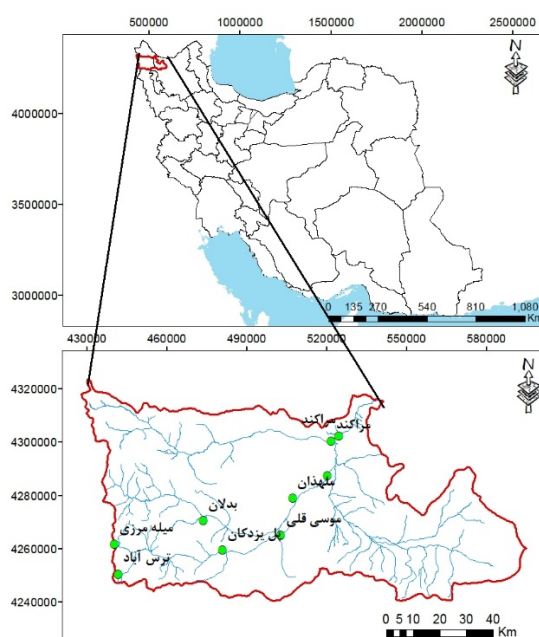
خشکسالی با ماهیتی خزنده و درازمدت منابع آبی، کشاورزی و محیط زیست را تحت تأثیر قرار می دهد (Navabi و همکاران، 2021). شاخص استاندارد بارش SPI یکی از مهمترین و در عین حال ساده ترین شاخص های تحلیل خشکسالی است. این شاخص به دلیل سادگی محاسبات، قابلیت محاسبه در مقیاس

3. Watss
4. Aldon

1. Markov chain Monte Carlo (MCMC)
2. Standardized Runoff Index (SRI)

دامنه‌های شرقی کوه‌های بایزدا⁵ در خاک ترکیه سرچشمه می‌گیرد. دامنه نوسان سالانه دما در آن‌ها 60 درجه سلسیوس است (Esfandiari و همکاران، 2022). حجم بارش مفید برای دشت در حوضه مورد مطالعه 25/23 میلیون متر مکعب در دوره درازمدت می‌باشد که سهم رواناب 0/31 و سهم نفوذ 19/92 میلیون مترمکعب است. به همین ترتیب برای ارتفاعات حوضه میزان رواناب و نفوذ به ترتیب 180/31 و 109/97 میلیون مترمکعب و بارش مفید آن 290 میلیون مترمکعب در دوره درازمدت می‌باشد (Aras River Basin Balance Sheet Report, 2016).

از نظر زمین‌شناسی واحدهای سنگی از قدیمی‌ترین دوره زمین‌شناسی تا عهد حاضر، در مناطق مختلف حوضه بیرون‌زدگی دارد و ارتفاعات حاشیه دشت در بخش‌های شمالی و غربی عمدتاً از سنگ آذرین و در نواحی جنوبی ماسه سنگ و کنگلومرا⁶ در نواحی شمال شرقی حوضه سنگ آهک دوره پرمین⁷ مشاهده می‌شود (Momenian و همکاران، 2018).



شکل 1- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

2-2- مدل SWAT

در این مطالعه، از مدل SWAT که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا به منظور پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر میزان رسوب، جریان، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های آبریز با در نظر گرفتن نوع خاک، کاربری

Dodov و همکاران (2005) نیز اشاره کردند که سه باران‌سنج برای 4800 کیلومتر مربع حوضه مورد نیاز هستند. بنابراین، ایستگاه پایش باران‌سنج برای هر تحلیل هیدرولوژیکی ضروری است. خشکسالی هیدرولوژیکی به دلیل پیامدهای زیادی که بر منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی دارد بیشترین توجه دولت‌ها، محققان و مردم را به خود جلب کرده است. خشکسالی هیدرولوژیکی از طریق تأثیر بر کاهش مخازن آب زیرزمینی، کاهش آورد رودخانه و کاهش ذخیره آب دریاچه‌ها تشخیص داده می‌شود و معمولاً بر منطقه وسیعی تأثیرگذار است (Cui و همکاران، 2021).

خشکسالی هیدرولوژیکی می‌تواند به‌طور فزاینده‌ای بر عملکرد اکوسیستم محیطی و جوامع انسانی تأثیرگذار باشد (Hooshyaripor و همکاران، 2022). ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی به دلیل پیچیدگی‌های موجود دارای شاخص جامع و کاملی نمی‌باشد (Hayes و همکاران، 2011). شاخص‌های زیادی جهت تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی در سطح جهان ارائه شده است که یکی از پرکاربردترین این شاخص‌ها شاخص جریان استاندارد (SDI) می‌باشد (Nalbantis و همکاران، 2013).

با توجه به اهمیت آمار رواناب در حوضه‌های آبریز و مخصوصاً در حوضه‌هایی با تغییرات ارتفاعی زیاد اهمیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی بسیار زیاد می‌باشد. در حوضه آبریز قطورچای به علت وجود مناطق مرتفع و فاقد دسترسی جهت اندازه‌گیری جریان زیرشاخه رودخانه‌ها باعث کمبود آمار مشاهداتی در مناطق مرتفع بوده است. که با مدل‌سازی هیدرولوژیکی این کمبود در برآورد شدت خشکسالی هیدرولوژیکی مرتفع خواهد شد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در زیرحوضه‌های حوضه آبریز قطورچای و پهنه‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی جهت توجه بیشتر بر حفظ اکوسیستم حوضه می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- خصوصیات منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز قطورچای در شمال غرب ایران در مجاورت حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه‌های زنگمار و اهرچای در استان آذربایجان غربی در عرض شمالی 38 درجه و 20 دقیقه شمالی تا 38 درجه و 57 دقیقه و طول شرقی 44 درجه و 17 دقیقه تا 45 درجه و 27 دقیقه قرار دارد (شکل 1). رودخانه قطور با سطح حوضه 68400 هکتار یکی از رودخانه‌های بزرگ حوضه آبریز ارس در استان آذربایجان غربی می‌باشد. رودخانه قطور از دامنه‌های شمال و شمال غربی کوه‌های منگنه و میرعمر و

7. Permian

5. Bayazdaga
6. Conglomerate

در معادله فوق، SW_t میزان نهایی آب در خاک (میلی‌متر آب) تا روز t ، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک، t برحسب روز و R_{day} میزان بارندگی در روز i ، Q_{surf} مقدار رواناب در روز i ، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i از منطقه ریشه خارج می‌شود و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i می‌باشد (Neitsch و همکاران، 2011). تمامی واحدها برحسب میلی‌متر می‌باشند.

2-3- تحلیل عدم قطعیت

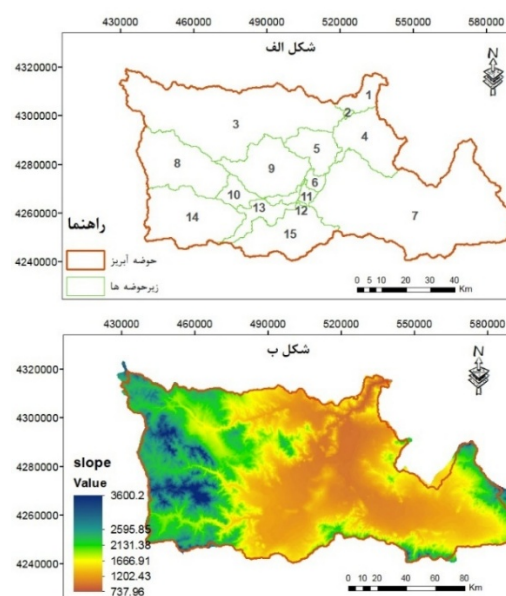
تحلیل عدم قطعیت عاملی مدل SWAT مرحله‌ای مهم در تعیین میزان وابستگی خروجی‌های مدل نسبت به حساسیت در ورودی مدل می‌باشد. بنابراین ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی SWAT در تحلیل عدم قطعیت از مدل SWAT-CUP، به‌همراه الگوریتم SUFI2 برای واسنجی و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر جریان استفاده شده است (Ahmadi و همکاران، 2020).

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های زیادی جهت کالیبراسیون مدل‌ها و تحلیل عدم قطعیت (به‌علت وجود عدم قطعیت در ورودی، ساختار مدل و ...) به‌وجود آمده است. از روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توان به الگوریتم‌های MCMC، bMCMC، N-MCMC، SUFI2 و GLUE اشاره کرد (Roodaki و Azizian، 2020).

SUFI2 یک الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای اصول رگرسیون غیرخطی می‌باشد و در کالیبراسیون مدل‌های بزرگ مقیاس کاربرد دارد. در SUFI2 هدف شناسایی یک مجموعه عامل رفتاری است که منجر به شبیه‌سازی‌های قابل قبول در مدل هیدرولوژیک می‌شوند. مجموعه عواملی که مقادیر انتخابی آن‌ها باعث برازش مناسبی در مدل باشد به‌عنوان مجموعه عوامل رفتاری شناخته می‌شود (Mirzaei و همکاران، 2013).

SUFI-2 یک روش نیمه‌خودکار است که برای واسنجی، اعتبارسنجی و حساسیت و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود. در SUFI-2، تمام منابع عدم قطعیت به عامل‌ها اختصاص داده می‌شوند. در این روش عدم قطعیت در داده‌های ورودی به‌صورت توزیع‌های یکنواخت تعریف می‌شود. در مقابل، عدم قطعیت تولیدی با عدم قطعیت برآورد 95% محاسبه می‌گردد که در سطح 2/5 و 97/5% توزیع تجمعی متغیرهای خروجی به‌دست آمده از طریق نمونه برداری از مکعب لاتین هستند. GLUE¹⁰ به خروجی محاسبات از روش مونت‌کارلو متکی است. یک مجموعه عامل بهینه کلی و جستجوی بهینه عامل مورد نظر در آن بازه مذکور انجام می‌شود. این روش مبتنی بر نظریه غیر منحصراً به فرد بودن است، به این معنی که مجموعه عوامل مختلف می‌توانند

اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای بازه‌های زمانی طولانی مدت ایجاد شده است (Hajimohammadi و همکاران، 2018؛ Arnold، 1998). این مدل دارای یک رابط گرافیکی است که Arcswat نام دارد که پس از نصب به‌عنوان یک نوار ابزار در برنامه Arc Gis اضافه می‌شود و همه مراحل مدل‌سازی در محیط ArcMap انجام می‌شود. ابتدا نقشه رقمی ارتفاع حوضه به‌صورت DEM⁸ به مدل معرفی می‌شود. مدل با تجزیه و تحلیل این نقشه، شبکه آبراهه را ترسیم و تعدادی زیرحوضه‌ها را مشخص می‌کند. در ادامه، نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب به مدل معرفی شده و مدل براساس این اطلاعات، زیرحوضه‌ها را شناسایی و به واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU)⁹ تقسیم می‌گردد. هر یک از این واحدها دارای پوشش گیاهی، خاک، شیب و مدیریت تقریباً یکسانی دارند و همچنین تا حد زیادی نیز از نظر هیدرولوژیکی مشابه هستند (Yang و همکاران، 2016؛ Neitsch و همکاران، 2011؛ Abaspour و همکاران، 2011). زیرحوضه‌ها در شکل (2-الف) و نقشه شیب در شکل (2-ب) و محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل 2- الف) زیرحوضه‌ها، ب) نقشه شیب محدوده مورد مطالعه (Aras River Basin Balance Sheet Report، 2016)

در مدل SWAT اساس حل جریان و شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی بر اساس معادله بیلان آبی انجام می‌گیرد:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a + W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (1)$$

10. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)

8. Digital Elevation Model (DEM)

9. Hydrological Response Unit; HRU

عدم قطعیت باریک ضمن پوشش حداکثری داده مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت 95% خواهد بود (Kavian و همکاران 2017؛ Abaspour و همکاران، 2011؛ Judi و همکاران، 2016). شاخص‌های مختلفی برای برآورد دقت رفتار شبیه‌سازی شده حوضه آبریز توسط مدل SWAT در مقایسه با داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود. در این مطالعه از سه معیار ارزیابی نکویی برازش که عبارتند از ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NSE)¹² از معادله (2) ضریب تبیین (R2) معادله (3)، درصد اریبی (PBIAS)¹³ معادله (4) نتایج را مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ضریب نش- ساتکلیف با تغییراتی بین منفی بی‌نهایت تا یک (بهترین برازش) معیاری جهت ارزیابی اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل محاسبه می‌شود. ضریب تبیین نیز به مقایسه پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های مشاهداتی می‌پردازد در ضمن تغییر بین مقادیر صفر تا یک، به ترتیب بدترین و بهترین برازش را مشخص می‌کند (Zuo و همکاران، 2014). بیش پیش‌بینی و کم پیش‌بینی کردن سیستماتیک مدل نیز با استفاده از معیار PBIAS محاسبه می‌شود که مقادیر نزدیک به صفر عملکرد خوب مدل و تا ± 25 عملکرد رضایت بخش مدل را نشان می‌دهد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}) - (p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 - \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \right] \quad (3)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (o_i)} \right] \quad (4)$$

در معادلات فوق n تعداد داده، O_i مقدار داده مشاهداتی، p_i مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل، \bar{o} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{p} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- شبیه‌سازی هیدرولوژیکی SWAT

در تحقیق حاضر جهت شبیه‌سازی حوضه آبریز قطورچای از نقشه DEM با اندازه سلولی 28 متر، جهت تولید شبکه آبراهه، طول آبراهه اصلی، زیرحوضه‌ها و مسیر جریان استفاده شد. پس از این مرحله نوبت به ساخت گروه پاسخ گویی هیدرولوژیکی HRU می‌رسد که با ورود نقشه کاربری، نقشه خاک و محدوده کلاس شیب توسط مدل انجام می‌گیرد. در تحقیق پیش رو نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعاتی به 14 نوع پوشش مشخص (جنگل متراکم، جنگل نیمه‌انبوه، جنگل پراکنده، مناطق سنگی، مناطق

عملکردهای به‌همان اندازه خوب و قابل قبولی از پیش‌بینی مدل را به دلیل فعل و انفعال عوامل مختلف تولید کنند. هدف GLUE شناسایی مدل‌های رفتاری در حالت کلی از ترکیب‌های ممکن مدل و با عامل است.

PSO¹¹ یک روش بهینه‌سازی آماری مبتنی بر ازدحام جمعیت است که از اقدامات اجتماع پرندگان یا ماهیگیری الهام گرفته شده است. PSO یا ذرات تصادفی که در فضای جستجوگر Optima حرکت می‌کنند، آغاز می‌شود PSO موقعیت و سرعت ذرات را ایجاد می‌کند و سپس سرعت هر ذره را با استفاده از اطلاعات بهترین نتیجه‌ای که تاکنون رسیده است و بهترین جواب به‌دست آمده توسط سایر ذرات را به‌روز می‌کند. موقعیت جدید هر ذره با به‌روزرسانی موقعیت فعلی با استفاده از بردار سرعت محاسبه می‌شود.

مراحل اجرای SUFI2 به‌صورت زیر است:

- 1) تعیین تابع هدف
 - 2) مشخص کردن مقادیر حداقل و حداکثر مطلق عوامل
 - 3) آنالیز حساسیت تمامی عوامل در مراحل اولیه واسنجی
 - 4) ارزیابی دامنه عدم قطعیت با روش نمونه برداری لاتین-هایپرکیوب
 - 5) اجرای نمونه برداری لاتین-هایپرکیوب و شبیه‌سازی انجام می‌گیرد.
 - 6) شبیه‌سازی براساس تابع هدف صورت می‌گیرد.
 - 7) عوامل حساس شناسایی شده و بهینه‌سازی براساس عوامل حساس در طی مرحله واسنجی صورت می‌پذیرد.
- محدوده تغییرات خروجی شبیه‌سازی مدل به‌دلیل مجموعه عوامل رفتاری به‌کار رفته در آن، بازه عدم قطعیت در خروجی مدل SWAT تحت اثر عوامل آن را نشان می‌دهد. در واقع در مرحله واسنجی شبیه‌سازی‌های متعددی براساس تعداد مقادیر تصادفی انجام می‌گردد و در مرحله اجرای الگوریتم بازه عوامل مورد استفاده کوچک‌تر شده تا به یک مقدار بهینه ثابت برسد. دو معیار r-factor و p-factor جهت کمی نمودن و ارزیابی عدم قطعیت استفاده می‌شود. معیار p-factor درصد استقرار داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت 95% و معیار r-factor میانگین باند محدوده عدم قطعیت 95% (فاصله حد بالا و پایین) می‌باشد.

برای ایجاد برازش مناسب، هدف دستیابی به بیشترین پوشش داده مشاهداتی با کمترین باند عدم قطعیت و مقادیر p-factor بین صفر و 1 و r-factor بین صفر و ∞ است. مقادیر r-factor کمتر و p-factor بیشتر به ترتیب نشان‌دهنده محدوده

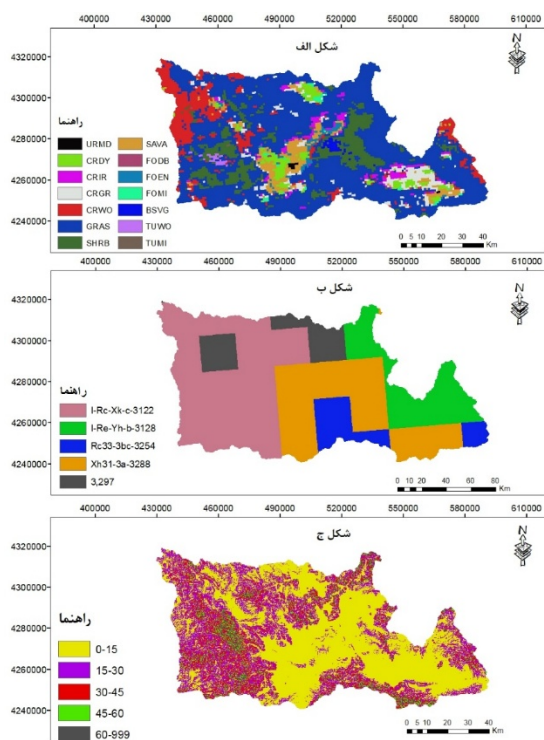
13. Biased sampling

11. Particle Swarm Optimization (PSO)

12. Nash-Sutcliffe

2-3- عدم قطعیت عاملی مدل

تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی با 30 عامل اولیه شروع شد. با اعمال عوامل به‌صورت تکی در مدل و بررسی حساسیت مدل به هر عامل، مشخص شد که 17 عامل اثر بالقوه در واسنجی مدل دارند. نتایج جدول (1)، عوامل حساس مدل که بیشترین تأثیر در واسنجی مدل را داشتند نشان می‌دهد. عامل CH_K2 (هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه) به‌عنوان مؤثرترین عامل بر میزان جریان رواناب تولیدی در این حوضه تحت مدل SWAT را دارد. در جدول (1) دو عامل r_{SOL_BD} و V_ALPHA_BF با مقادیر t-stat برابر با 0/15 و 0/11 به ترتیب در رتبه دوم و سوم عامل حساس قرار می‌گیرند. نتایج فوق با مطالعات Ja'farzadeh و Rouhani (2016) و Judi-Hamzhabadi و همکاران (2016) مطابقت دارد.

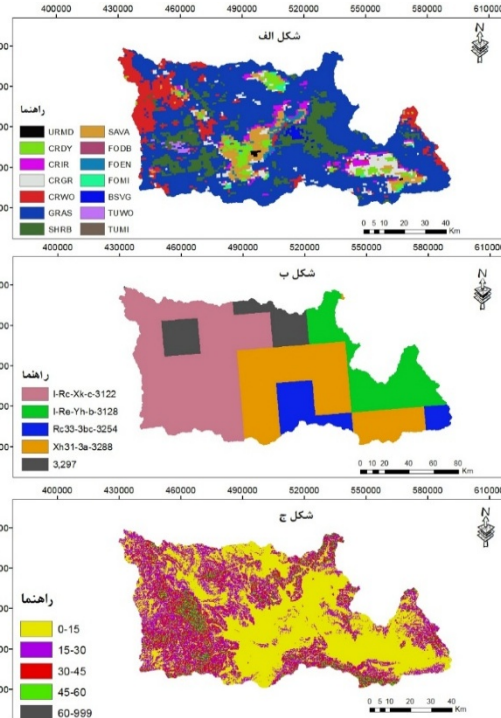


شکل 3- الف) نقشه کاربری اراضی، ب) کلاس خاک منطقه، ج) کلاس شیب حوضه (2016, Aras River Basin Balance Sheet Report)

2-3- عدم قطعیت عاملی مدل

تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی با 30 عامل اولیه شروع شد. با اعمال عوامل به‌صورت تکی در مدل و بررسی حساسیت مدل به هر عامل، مشخص شد که 17 عامل اثر بالقوه در واسنجی مدل دارند. نتایج جدول (1)، عوامل حساس مدل که بیشترین تأثیر در واسنجی مدل را داشتند نشان می‌دهد. عامل CH_K2 (هدایت

مسکونی، سطوح آبگیر، مراتع، زمین زراعی آبی، زمین زراعی دیم، باغات، زمین بایر، بوته‌زار، مراتع و بوته‌زار) و نقشه خاک منطقه به 5 کلاس متفاوت و شیب منطقه براساس نقشه رقومی ارتفاع که اختلاف ارتفاع زیادی را نشان می‌داد به 5 دسته (0-15، 15-30، 30-45، 45-60 و بیش تر از 60) تقسیم‌بندی گردید که نقشه کاربری اراضی در شکل (3-الف)، کلاس خاک منطقه در شکل (3-ب) و کلاس شیب حوضه در شکل (3-ج) ارائه گردیده است. با توجه به تغییرات مکانی بافت خاک، کاربری اراضی و وضعیت توپوگرافی منطقه، حوضه آبریز قطورچای به 15 زیرحوضه و 285 واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم گردید. داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه در محدوده سال‌های 1987-2018 در شبیه‌سازی استفاده شده و جهت کاهش اثر خطاهای شرایط اولیه در مدل، سه سال ابتدایی دوره آماری (1987-1990) برای تطبیق مدل با شرایط حوضه (warm-up) در نظر گرفته شد. سپس مدل برای شبیه‌سازی رواناب حوضه در مقیاس ماهانه اجرا گردید. مدل اولیه توانست الگوی تغییرات ماهانه رواناب در طول دوره آماری مشاهداتی در ایستگاه‌های مراکند (قطورچای)، مظفرآباد، مراکند (آق‌چای)، بدلان، پل یزدکان، مله‌ذنان، موسی‌قلی را پیش‌بینی کند. اما دقت اولیه مدل کافی نبود. از این‌رو، عوامل حساس مدل در فرآیند تحلیل عدم قطعیت شناسایی و تحت واسنجی قرار گرفت تا عملکرد مدل بهبود گردد.



شکل 3- الف) نقشه کاربری اراضی، ب) کلاس خاک منطقه، ج) کلاس شیب حوضه (2016, Aras River Basin Balance Sheet Report)

مقادیر بهینه عوامل مدل برای رسیدن به بالاترین مقدار تابع هدف (عملکرد) است. طی فرآیند واسنجی مقادیر پیش فرض عوامل مدل تعدیل یافته و بعد از شبیه سازی به دفعات زیاد برای منطقه مورد مطالعه اصلاح و بهینه می گردد و بدین ترتیب دامنه عدم قطعیت به تدریج کاهش می یابد. در این تحقیق تعداد 1000 تکرار شبیه سازی شده است. ارزیابی شبیه سازی های مدل در هر مرحله از واسنجی، بازه تغییرات مدل و یا اصطلاحاً عدم قطعیت مدل در واکنش به نوسانات عوامل خود را نشان می دهد. جدول (2) بازه عدم قطعیت مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی را نشان می دهد که دارای p-factor (پوشش مقادیر مشاهده ای در محدوده باند عدم قطعیت) می باشد.

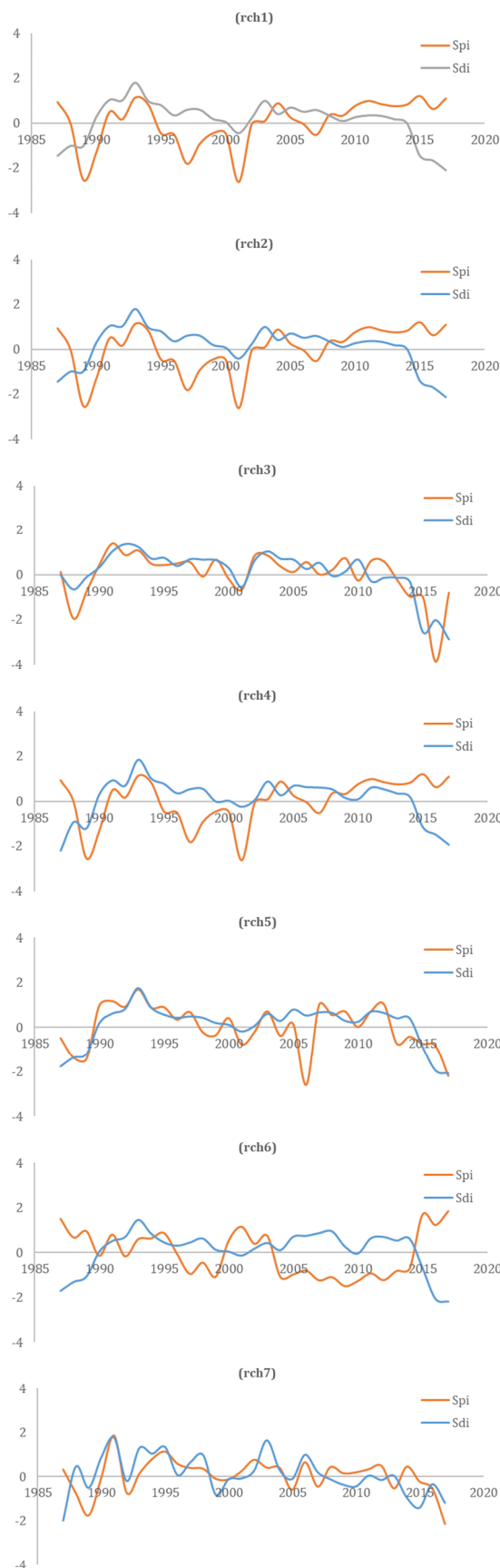
هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه) به عنوان مؤثرترین عامل بر میزان جریان رواناب تولیدی در این حوضه تحت مدل SWAT را دارد. در جدول (1) دو عامل r_SOL_BD (1) و V_ALPHA_BF با مقادیر t-stat برابر با 0/15 و 0/11 به ترتیب در رتبه دوم و سوم عامل حساس قرار می گیرند. نتایج فوق، با مطالعات Ja'farzadeh و Rouhani (2016) و Judi-Hamzehabadi و همکاران (2016) مطابقت دارد. عدم قطعیت عاملی مدل در واکنش به تغییرات در عوامل حساس شناخته شده بررسی شد به این منظور، عملکرد مدل در واکنش به تغییر در مقادیر عوامل حساس آن به وسیله ضریب کارایی نش- ساتکلیف (تابع هدف در SUFI2) سنجیده شد. شایان توجه است که روش مدل سازی معکوس که SUFI2 از آن استفاده می کند، مشابه فرآیند واسنجی مدل به مفهوم تعیین

جدول 1- عوامل مؤثر در شبیه سازی جریان و تحلیل عدم قطعیت

ردیف	عامل	نام عامل	حداقل	حداکثر	t-stat	p-value
1	R_CN2/mgt	شماره منحنی	-0/17	-0/17	0	0/99
2	V_ALPHA_BF/gw	ضریب α آب زیرزمینی	0/49	0/57	0/11	0/90
3	V_GWQMN/gw	حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستایی در سفره های کم عمق برای وقوع جریان	0/4	0/6	-0/04	0/96
4	V_GW_REVAP/gw	ضریب تعیین نفوذ به آب زیرزمینی عمیق یا صعود موئینگی از سفره آب کم عمق	-0/039	-0/28	0	0/99
5	v_GWHT/gw	عمق اولیه آب در آبخوان عمیق	-0/03	0/001	-0/03	0/97
6	V_CH_N2/rte	ضریب مانینگ برای رودخانه اصلی	0/82	0/86	0/05	0/96
7	V_CH_K2/rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی (mm/hr)	83/4	92/5	0/16	0/87
8	V_ALPHA_BNK/rte	ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال	0/37	0/4	0/07	0/94
9	v_RCHRG_DP/gw	عمق اولیه آب در سفره کم عمق	4/84	5/48	0/04	0/97
10	v_OV_N/hru	ضریب مانینگ	0/67	0/73	0/08	0/93
11	V_ESCO/hru	فاکتور جبران نگهداشت گیاهی	0/04	0/05	0/02	0/98
12	r_SOL_AWC(1)/sol	ظرفیت آب موجود لایه خاک	8/76	11/4	0/13	0/90
13	r_SOL_K(1)/sol	هدایت هیدرولیکی اشباع شده	4/42	4/54	0/04	0/96
14	r_SOL_BD(1)/sol	چگالی ظاهری مرطوب	26/2	38/2	0/015	0/99
15	v_REVAPMN/gw	عمق آستانه آب در سفره کم عمق برای "تجدید مجدد" رخ می دهد	0	-0/001	0/05	0/96
16	v_DEEPST/gw	عمق اولیه آب در آبخوان عمیق	7/14	13/6	-0/08	0/93
17	v_SHALLST/gw	عمق اولیه آب در سفره کم عمق	0/49	17/1	-0/03	0/98

جدول 2- معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل در شبیه سازی رواناب هر یک از ایستگاهها

ردیف	نام ایستگاه	واسنجی				صحت سنجی			
		R-FACTOR	P-FACTOR	R ²	NSE	R-FACTOR	P-FACTOR	R ²	NSE
1	مراکند (قطورچای)	0/90	0/14	0/85	0/7	0/04	0/99	0/85	
2	مظفرآباد	0/83	0/43	0/78	0/65	0/14	0/86	0/78	
3	مراکند (آقچای)	0/82	0/20	0/76	0/63	0/15	0/88	0/76	
4	بدلان	0/72	0/46	0/71	0/46	0/05	0/82	0/71	
5	پل یزدکان	0/67	0/52	0/64	0/54	0/06	0/72	0/64	
6	ملهذان	0/71	0/35	0/65	0/5	0/05	0/98	0/65	
7	موسی قلی	0/74	0/32	0/69	0/69	0/03	0/99	0/69	



3-3- بررسی شاخص خشکسالی اقلیمی SPI و جریان SDI

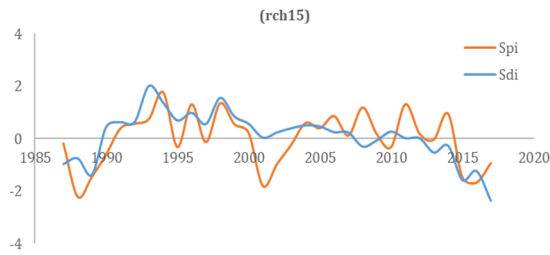
داشتن یک نرم افزار کارآمد در جهت کاهش هزینه، وقت در جهت محاسبه شاخص های خشکسالی از جمله SPI یکی از نیازهای اساس جامعه مهندسين و کارشناسان بوده است. در این راستا نرم افزار DIP که حاصل از بررسی و پژوه طراحی سیستم پایش خشکسالی استان تهران بوده که توسط معاونت پژوهش و مطالعات پایه شرکت سهامی مدیریت منابع آب طراحی شده مورد استفاده شده است. این نرم افزار اغلب شاخص های خشکسالی هواشناسی را محاسبه می نماید و سری زمانی شاخص ها را در مقیاس زمانی مختلف ایجاد می کند (Kazemi, 2007).

اساس شاخص SPI بر محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار بوده که برای اولین بار توسط Mckee و همکاران در سال 1993 به منظور پایش و تعیین خشکسالی در ایالت کلرادو آمریکا ارائه شده است. این شاخص برای مقیاس های زمانی 1، 3، 6، 9، 12، 24، 48 ماهه و یکساله قابل محاسبه است (Mckee و همکاران، 1993). طبق این روش دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می افتد که SPI به طور مستمر منفی و کمتر از منهای یک برسد و هنگامی پایان می یابد که SPI مثبت گردد (Mckee, 2016). طبقه بندی خشکسالی بر اساس دو شاخص SPI و SDI مطابق جدول (3) انجام می گردد.

جدول 3- طبقه بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI و SDI (Mirshra و همکاران، 2007)

مقدار شاخص خشکسالی	طبقات خشکسالی
بزرگتر یا مساوی 2	مرطوب شدید
1/5 تا 1/99	مرطوب متوسط
1 تا 1/5	کمی مرطوب
0/99 تا -0/99	نرمال
-1 تا -1/49	خشکسالی ضعیف
-1/5 تا -1/99	خشکسالی متوسط
کوچکتر مساوی -2	خشکسالی شدید

برآورد شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI شبیه روابط شاخص خشکسالی هواشناسی بوده با این تفاوت که به جای این که عامل بارش مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد، فاکتور دبی جریان در آن قرار داده می شود و اولین بار Nalbantis پیشنهاد شده است (Nalbantis, 2008). طبقات مختلف این شاخص و شاخص SPI برای بازه زمانی شبیه سازی جریان در ایستگاه های هیدرومتری در این پژوهش براساس زیرحوضه های مورد مطالعاتی در شکل های (5) ارائه شده است.

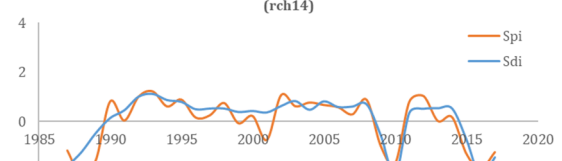
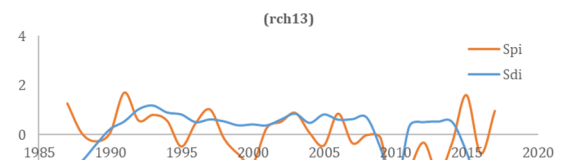
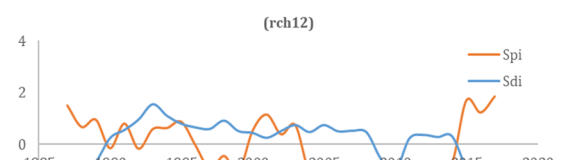
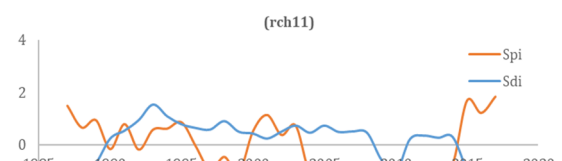
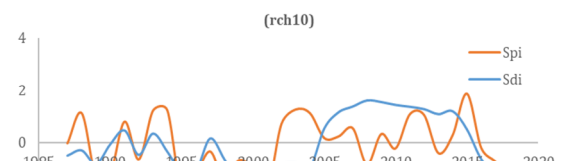
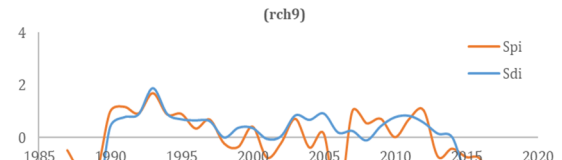
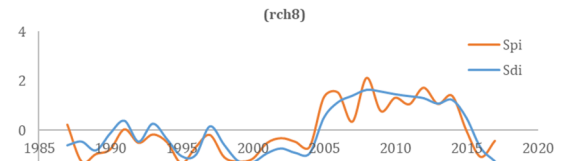


شکل 5- نتایج بررسی شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در 15 زیرحوضه مورد مطالعه

همان‌طور که در شکل (5) مشاهده می‌شود در زیرحوضه‌های بالادستی و کوهستانی (زیرحوضه‌های 3، 7، 8، 14 و 15) که مصارف کشاورزی کمتری وجود دارد همسویی شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی کاملاً مشهود است. با توجه به رفتار شاخص خشکسالی SDI در زیرحوضه‌های 5 و 9 که موقعیت هر یک در زیرحوضه‌های مجزا و بر روی تک‌شاخه از مسیر جریان واقع شده است همسویی شاخص‌های خشکسالی مشاهده می‌شود. در سایر زیرحوضه‌ها از آنجایی که در خروجی، چند زیرحوضه واقع شده‌اند به علت وجود مصارف مختلف در این زیرحوضه‌ها همسویی شاخص‌ها متفاوت‌تر عمل کرده است.

4- نتایج

در تحقیق صورت گرفته ابتدا در جهت بررسی نتایج هیدروگراف شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی تحلیل عدم قطعیت عوامل تأثیرگذار در ساختار مدل‌سازی هیدرولوژیکی صورت گرفت و سپس با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI دوره‌های ترسالی و خشکسالی بررسی گردید تا بتوان تأثیر آن بر شدت رواناب حوضه مشخص گردد. در ابتدا در این مطالعه، تحلیل عدم قطعیت عاملی مدل SWAT حوضه آبریز قطورچای با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT CUP انجام گرفت. در مطالعه حاضر با وجود نواقص آمار ثبت شده ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی حوضه، تلاش گردید با انتخاب مناسب‌ترین محدوده منطقی و مناسب برای عوامل تأثیرگذار بر رواناب توسط الگوریتم SUFI2، میزان عدم قطعیت ناشی از عوامل مدل SWAT کاهش یابد. پس از بررسی عوامل مؤثر در واسنجی مدل، CH_K2 (هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه)، $r_SOL_BD(1)$ و V_ALPHA_BF عامل حساس قرار می‌گیرند. در دوره واسنجی، پهنای باند عدم قطعیت برابر $0/92$ بود و 68% از داده‌های مشاهداتی در محدوده باند عدم قطعیت 95% واقع شدند. به‌طور کلی با توجه به اطمینان حاصل شده می‌توان بیان کرد که عدم قطعیت عوامل مدل SWAT با تخمین مناسب توسط الگوریتم SUFI2 به کمیت در آمده است و قابلیت اجرایی مدل در شرایط مختلف عدم قطعیت را تضمین می‌کند. از طرفی مقایسه نتایج



21 (7), 3859-3878. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3859-2017>, 2017

Cui A, Li J, Zhou Q, Zhu R, Liu H, Wu G, Li Q, "Use of a multiscale GRACE-based standardized terrestrial water storage index for assessing global hydrological droughts", *Journal of Hydrology*, 2021, 603, 126871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126871>

Dodov B, Fofoula-Georgiou E, "Incorporating the spatio-temporal distribution of rainfall and basin geomorphology into nonlinear analyses of streamflow dynamics", *Advances in Water Resources*, 2005, Jul 1, 28 (7), 711-728. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.12.013>

Douinot A, Roux H, Garambois PA, Larnier K, Labat D, Dartus D, "Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting", *Journal of Hydrology*, 2016, Oct 1, 541, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.24>

East Azerbaijan Regional Water Company, "Aras Basin Balance Sheet Reports", 2016.

Galavi HG, Shui LeeTeang SL, "Uncertainty analysis of climate change impacts on runoff", *Future Environment and Energy*, 2012, 28.

Hajimohammadi M, Azizian A, Ghermezcheshmeh B, "Evaluation of the impact of climate change on runoff in Kan Watershed", *Watershed Engineering and Management*, 2018, Jun 22, 10 (2), 144-156. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.116456>

Hayes M, Svoboda M, Wall N, Widhalm M, "The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended", *Bulletin of American Meteorological Society*, 2011, 92 (4), 485-488.

Ja'farzadeh M, Rouhani H, "Sensitivity analysis of SWAT model in runoff simulation, In Proc. of Uncertainty Estimation (GLUE) Method", *Water Resources Research*, 2017, 44, 1-17.

Jahangiri E, Motamedvaziri B, Kiadaliri H, "Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed)", *Jwmseir*, 2024, 18 (65), 8. <http://jwmsei.ir/article-1-1116-en.html>

Judi-Hamzehabadi A, Kadkhodoseini M, Akhavan S, Nozari H, "Evaluation of SWAT and SVM models to simulate the runoff of Lighvanchay river", *Water and Soil Science*, 2016, 26, 137-150 (In Persian).

Kavian A, Namdar M, Golshan M, Bahri M, "Hydrological modeling of climate changes impact on flow discharge in Haraz river basin", *Journal of Natural Environmental Hazards*, 2017, Jun 22, 6 (12), 89-104. <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3119>

Kazemi A, "Evaluation of drought and drought indicators in the climatic conditions of Hamadan province", Master's thesis, Faculty of Agriculture, University of Hamadan, 2007, 40-50.

Khadkhodahosseini A, Akhavan S, Nozari H, Khadkhodahosseini M, "Evaluation of SWAT and SVM models to simulate the runoff of lighvanchay river", *Water and Soil Science*, 2017, Feb 19, 26 (4.1), 137-150.

Koren VI, Finnerty BD, Schaake JC, Smith MB, Seo DJ, Duan QY, "Scale dependencies of hydrologic models

خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی نشان می‌دهد در زیرحوضه‌های بالادستی و کوهستانی که مصارف کشاورزی کمتری وجود دارد همسویی شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی کاملاً مشهود است. در زیرحوضه‌های تک‌شاخه‌ای نیز با وجود مصارف مختلف همسویی خشکسالی بارش و رواناب را می‌توان مشاهده کرد. بنابراین می‌توان با اعمال شرایط تغییر اقلیم هواشناسی در مدل SWAT در حوضه‌های بالادست و زیرحوضه‌های تک‌شاخه‌ای شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی در آینده را به‌نحو مطلوبی ارائه نمود.

5- مراجع

Abbaspour KC, "User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs", Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 2007.

Abbaspour KC, "Swat-Cup2, SWAT calibration and uncertainty programs manual version 2", Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM) Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2011, 106p.

Ahmadi A, Nasser M, "Do direct and inverse uncertainty assessment methods present the same results", *Journal of Hydroinformatics*, 2020 Jul 1, 22 (4), 842-55. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.190>

Akhoun S, Shahverdi M, Zare-Abyaneh H, "Modeling the spatial changes of blue and green water (case study, Hamadan province)", 2018, In, Proc. of First.

Alizadeh A, "Principles of applied hydrology", Astan Quds Razavi Publications, 2016.

Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR, "Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development1", 1998, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

Bárdossy A, Singh SK, "Robust estimation of hydrological model parameters", *Hydrology and earth system sciences*, 2008, 12 (6), 1273-1283. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1273-2008.2008>

Brath A, Montanari A, Toth E, "Analysis of the effects of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially-distributed hydrological model", *Journal of Hydrology*, 2004, Jun 1, 291 (3-4), 232-253. <https://doi.org/10.16/j.jhydrol.2003.12.044>

Caracciolo D, Arnone E, Noto LV, "Influence of spatial precipitation sampling on hydrological response at the catchment scale", *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, Mar 1, 19 (3), 544-53, Challenges (In Persian). [https://doi.org/10.1016/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000829](https://doi.org/10.1016/(ASCE)HE.1943-5584.0000829)

Cristiano E, ten Veldhuis MC, Van De Giesen N, "Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas-a review", *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, Jul 28,

- algorithm", Iran-Water Resources Research, 2020, Aug 22, 16 (2), 50-66.
<https://doi.org/20.1001.1.17352347.1399.16.2.4.0>
- Shafiei M, Ghahraman B, Saghafian B, Davary K, Vazifedust M, "Calibration and uncertainty analysis of SWAP model by using GLUE method", Water Research in Agriculture Journal, 2014, 28 (2), 477-488. <https://doi.org/10.22092/jwra.2014.100047>
- Smith Michael B, Victor I, Koren Ziya Z, Seann M, Reed Jeng-J P, Fekadu M, "Runoff response to spatial variability in precipitation, an analysis of observed data", Journal of hydrology, 2004, 298, (1-4), 267-286.
<https://doi.org/10.1016/j.hydro.2004.03.039>
- Sun H, Cornish PS, Daniell TM, "Spatial variability in hydrologic modeling using rainfall-runoff model and digital elevation model", Journal of Hydrologic Engineering, 2002 Nov, 7 (6), 404-412.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:6\(404\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:6(404))
- Van Pelt SC, Swart RJ, "Climate change risk management in transnational river basins: the Rhine", Water resources management, 2011, 25, 3837-3861.
<https://doi.org/10.1007/s11269-011-9891-1>
- Woldemeskel FM, Sivakumar B, Sharma A, "Merging gauge and satellite rainfall with specification of associated uncertainty across Australia", Journal of Hydrology, 2013 Aug 30, 499, 167-76.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2013.06.39>
- to spatial variability of precipitation", Journal of Hydrology, 1999, 217 (3-4), 285-302.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00231-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00231-5)
- Maski D, Mankin KR, Janssen KA, Tuppad P, Pierzynski GM, "Modeling runoff and sediment yields from combined in-field crop practices using the soil and water assessment tool", Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 63 (4), 193-203.
<https://doi.org/10.2489/jswc.63.4.193>
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, 17 (22), 179-183.
- Mirzaei M, Galavi H, Faghih M, Huang YF, Lee TS, El-Shafie A, "Model calibration and uncertainty analysis of runoff in the Zayanderod River basin using generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method", Journal of Water Supply, Research and Technology, 2013, Aqua, Aug 1, 62 (5), 309-320.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2013.038>
- Morid R, Delavar M, Eagderi S, Kumar L, "Assessment of climate change impacts on river hydrology and habitat suitability of Oxynoemacheilus bergianus, Case study, Kordan River, Iran", Hydrobiologia, 2016, May, 771, 83-100.
<https://doi.org/10.1007/s10750-015-2617-2>
- Nalbantis I, "Evaluation of a hydrological drought Index", Journal of European Water, 2008, 23, 24, 67-77.
- Nalbantis I, Tsakiris G, "Assessment of hydrological drought revisited", Journal of Water Resources Management, 2009, 23, 881-897.
<https://doi.org/10.1039/C5EM00030K>
- Nasiri S, Ansari H, Ziaei AN, "Simulation of stream flow in Samalqan watershed using SWAT hydrological model", Water Resources Engineering National Conference on Water Resources Management Strategies and Environmental, 2020, Jul 22, 13 (45), 39-56.
<https://doi.org/20.1001.1.20086377.1399.13.45.4.7>
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, "Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009", Texas Water Resources Institute, 2011.
- Navabi N, Moghaddisi M, Genji Khorram, "Evaluation of agricultural drought monitoring using different indicators based on ground data and remote sensing, case study: Lake Urmia watershed", 2021, Journal of Watershed Engineering and Management, 2021, Issue 13, 12-1.
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.126860.1684>
- Rezaei H, Khanmohammadi N, Montasari M, Bahmanesh J, "Investigating the effect of distribution function and estimation method of potential evapotranspiration in determination of dry matter identification index", Journal of Irrigation Science and Engineering, 2016, 40, Special Issue 1/1, 167-183 (In Persian).
<https://doi.org/10.22055/jise.2017.12965>
- Roodaki S, Azizian A, "Uncertainty analysis due to the application of different infiltration methods on the performance of HEC-HMS model using GLUE