



Assessing the Impact of Climate Change on Aras River Flow (Case Study: Ardabil Province)

B. Farid Giglou^{1*}, R. Ghazavi², and S. Dokhani³

Abstract

Climate change and its effects on temperature, precipitation and river flow have been the subject of many studies around the world. The purpose of this study was to evaluate the effects of climate change on Aras River catchment discharge at different time scales. In this study, RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the near future (2017-2036) were applied in HadGEM model and LARS-WG micro scale model to analyze the future and predict the minimum and maximum future changes of Aras discharge. Climate scenario outputs were entered into SWAT model for calibration and validation period and their results were analyzed. Monthly rainfall data of Pars Abad Synoptic Station during the period of 1985-2005 were used as control period. To evaluate and compare the accuracy of finely scaled data, comparison of baseline data and historical data produced by the model was performed using the calibration parameters. For example, the NSE index values for precipitation, minimum temperature and maximum temperature were 0.695, 0.624 and 2.054, respectively. According to the results, all three scenarios predicted an increase in precipitation for August and December and a decrease for April and November, but it is shown overall that the average annual precipitation in the Aras watershed during the period 2017-2036 would decrease. All three scenarios also predicted an increase in the minimum and maximum temperatures. Also according to SWAT model results, the inlet discharge of Aras River should decrease by 30.7, 30.2, and 22.2% under scenarios RCP8.5, RCP4.5 and RCP2.6, respectively. In general, and based on the results of the models used, the temperature in the study area will increase and precipitation will decrease, which will have a negative impact on the Aras River discharge and will require proper and principled management of water resources utilization.

Keywords: RCP, Discharge, SWAT Model, Water Resources.

Received: June 16, 2020

Accepted: October 24, 2020

ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان آورد رودخانه ارس (مطالعه موردی: محدوده استان اردبیل)

بهنام فرید گیگلو^{۱*}، رضا قضاوی^۲ و سیامک دخانی^۳

چکیده

وجود تغییر اقلیم و آثاری که بر روی دما، بارش و آورد رودخانه‌ها برجای می‌گذارد، مورد تأکید بسیاری از مطالعات در سراسر جهان بوده است. این تحقیق با هدف ارزیابی اثرات ناشی از تغییر اقلیم بر میزان آورد رودخانه ارس در مقیاس‌های مختلف زمانی انجام پذیرفته است. در این تحقیق برای تحلیل آینده و پیش‌بینی حداقل و حداکثر تغییرات آینده از سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۷-۲۰۳۶) از مدل HadGEM و مدل ریز مقیاس‌گردانی LARS-WG استفاده شد. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و بررسی مقدار آورد رودخانه ارس در دوره‌های آبی، خروجی‌های سناریوهای اقلیمی به مدل SWAT که برای دوره پایه واسنجی و صحت‌سنجی شده است، وارد شده و نتایج آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های ماهانه بارش ایستگاه سینوپتیک پارس‌آباد در طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۵ به عنوان داده‌های شاهد استفاده شد. جهت ارزیابی و مقایسه دقت داده‌های ریزمقیاس شده، مقایسه داده‌های دوره پایه و داده‌های تاریخی تولید شده توسط مدل با استفاده از پارامترهای خطاسنجی انجام شد که به عنوان مثال مقدار شاخص NSE برای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر به ترتیب ۰/۶۹۵، ۰/۶۲۴ و ۲/۰۵۴ به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده هر سه سناریو افزایش بارندگی را برای ماه‌های آگوست و دسامبر و کاهش بارندگی را برای ماه‌های آپریل و نوامبر پیش‌بینی نموده‌اند، لیکن به طور کلی مجموع بارش متوسط سالانه در دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۶ حوزه آبخیز ارس روند کاهشی خواهد داشت. همچنین هر سه سناریو افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر را در تمامی ماه‌ها و فصول سال پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آورد رودخانه ارس نیز حاکی از کاهش ۳۰/۷٪، ۳۰/۲٪ و ۲۲/۲٪ درصدی دبی ورودی به رودخانه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشد. به طور کلی و با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌های استفاده شده، در منطقه مورد مطالعه دما افزایش و بارش کاهش خواهند داشت که بر آورد رودخانه ارس تأثیر منفی خواهد داشت و نیازمند مدیریت صحیح و اصولی بهره‌برداری از منابع آبی می‌باشد.

کلمات کلیدی: RCP، دبی، مدل SWAT، منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۸/۳

1- Ph.D. Student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran. behnam.farid65@gmail.com
2- Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
۲- استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

(2018; Yonesifard et al, 2020). در همین راستا محققین در نقاط مختلف جهان، شرایط فعلی رودخانه‌ها را از نظر کمی و کیفی مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده و تأثیر تغییر اقلیم بر آینده این منابع آبی را به کمک مدل‌های هیدرولوژیکی بررسی نموده‌اند (Wurbs and Muttiah, 2002; Keycha, 2015; Xu et al., 2018; Fatayi et al., 2013). در حال حاضر مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب استفاده می‌شوند. یکی از مدل‌های پرکاربرد برای این منظور، مدل هیدرولوژیکی SWAT (ابزار ارزیابی خاک و آب) می‌باشد که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن به وسیله محققان مختلف تأیید شده است (Gautier et al., 2018; Abbaspur et al., 2009; Neitsch et al., 2005; Koutrolis et al., 2013; Mishra et al., 2018; Shen et al., 2018; Vliet et al., 2013; Wang et al., 2019).

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی، مفهومی و پیوسته است که برای شبیه‌سازی فرایندهای متعدد هیدرولوژیکی مانند تولید رواناب، فرسایش و رسوب و کیفیت آب در حوضه‌های آبخیز پیچیده و وسیع کاربرد دارد (Bahri, 2014; Mohammadi, 2015).

رودخانه ارس مهمترین و پرآب‌ترین رودخانه منطقه شمال غرب ایران به شمار می‌رود (Javadi Nejad et al., 2013). این رودخانه از کشور ترکیه سرچشمه گرفته و پس از طی ۱۰۷۰ کیلومتر به دریای خزر می‌ریزد و حدود ۴۷۵ کیلومتر از آن مرز بین کشور ایران با ارمنستان و آذربایجان را تشکیل می‌دهد. این رودخانه در محل سد میل و مغان وارد محدوده استان اردبیل شده و در قسمت شمال شرقی شهرستان پارس‌آباد مغان وارد خاک آذربایجان گردیده و در آنجا به رود عظیم کورا پیوسته و سپس به دریای خزر می‌ریزد (Rahimian, 2016). این رودخانه مهمترین منبع تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت در شمال استان اردبیل است و تغییرات کمی و کیفی آب این رودخانه می‌تواند اقتصاد و زندگی مردم منطقه را تحت تأثیر قرار دهد (Pahlavani, 2015).

با توجه به بررسی منابع انجام پذیرفته مطالعات مربوط به تغییرات هیدرولوژیکی به منظور انطباق با شرایط فعلی و تغییراتی که به دلیل تغییرات اقلیمی در منابع آبی ممکن است حادث شود، ضروری و حائز اهمیت است. از سوی دیگر با عنایت به اینکه آب آشامیدنی منطقه مغان شامل شهرستان‌های پارس‌آباد و بیله سوار از طریق رودخانه ارس تأمین می‌شود ضروری است تا آب این رودخانه از جنبه‌های مختلف کمی و کیفی مورد بررسی قرار گیرد. بر همین اساس این تحقیق با هدف ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات دبی رودخانه

حفاظت و استفاده بهینه از منابع آب از اصول توسعه پایدار هر کشور است ولی با توجه به تغییر اقلیم و اقتصادی-اجتماعی، منابع آبی در سراسر جهان در مرحله بحرانی بوده و کمبود و آلودگی آن برای جهانیان مشکلات زیادی را به وجود آورده است (Gosain et al., 2006). در طول زمان نیز با افزایش جمعیت و افزایش تقاضا و فشار بر روی منابع، درجه و مقیاس مخاطرات آبی دچار تغییر شده است (Chimtenge et al., 2014; Yosefi et al., 2020). امروزه کاهش کمی آب شیرین و آلودگی آب در بسیاری از کشورها به یک فاکتور کلیدی اثرگذار بر توسعه پایدار تبدیل شده و برای بیشتر کشورهای در حال توسعه تهدیدی بسیار بزرگ‌تر از مناقشات مسلحانه به شمار می‌آید (Calzadilla et al., 2013). آمارهای سازمان‌های بین‌المللی از جمله شورای جهانی آب، یونسکو و سازمان ملل درباره‌ی منابع آب شرب در مقیاس جهانی بسیار هشدار دهنده است (Bahri, 2014). از دیدگاه شورای جهانی آب تا سال ۲۰۵۰ اغلب کشورهای جهان دچار بحران آب می‌شوند. از لحاظ کمی، رشد تقاضای جهانی برای آب شرب تا سال ۲۰۲۰ به ۸۰ درصد افزایش خواهد یافت و تغییر اقلیم و روند گرم شدن زمین حتی کشورهای دارای منابع آب فراوان را نگران کرده است (Mehrotra et al., 2014).

در گزارشات ارائه شده از سوی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) با قطعیت بالا آمده است که دمای سطح خشکی و آب در کره زمین از قرن ۱۹ تاکنون به میزان ۰/۴ تا ۰/۷۸ درجه سانتیگراد افزایش داشته است (Hutchins et al., 2018). سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها حاصل تأثیرات اصلی تغییر اقلیم روی مقدار آب قابل استفاده و دسترسی می‌باشد (Gosain et al., 2006). در گزارش فنی مذکور آمده است که تغییرات اقلیمی اعم از دما و بارش به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک و با میانگین پائین بارندگی، اثرات قابل توجهی بر رواناب و در دسترسی بودن آب، دارد (Li et al., 2013) و این امر برای شرایط اقلیمی ایران که تغییرات آب و هوایی و به ویژه بارش بر منابع آب آن تأثیرات قابل توجهی می‌گذارد، بسیار حائز اهمیت است (Osman et al., 2014).

پژوهشگران در مطالعات خود تأثیرگذاری پدیده تغییر اقلیم بر منابع آبی را بررسی کرده‌اند (Xu et al., 2013; Saha et al., 2013; Leigh et al., 2016; Hosseini, 2016; Habibnejhad and Shokuhi, 2020) و تأثیرات مختلف تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت منابع آبی، هیدرولوژی، تنوع بیولوژیکی و زیستگاهی، سلامت رودخانه تأکید کرده‌اند (Neitsch et al., 2005; Neitsch et al., 2011; Du et al., 2013; Wang et al., 2014; Pahlavani et al., 2015; Rosen, 2017; Marie Couture,

ارس در محدوده استان اردبیل و در دوره‌های آماری ۲۰۱۷-۲۰۳۶ انجام پذیرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

حوضه رودخانه ارس در محدوده استان اردبیل طبق سیستم مختصات جغرافیایی GCM، با مختصات جغرافیایی $55^{\circ} 47' - 55^{\circ} 25' 47^{\circ}$ طول شرقی و $39^{\circ} 38' - 39^{\circ} 16'$ عرض شمالی، واقع شده و در جنوب شمال استان اردبیل قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی این تحقیق را بخشی از رودخانه ارس که در استان اردبیل واقع است تشکیل می‌دهد (شکل ۱).

هدف از این مطالعه برآورد اثرات تغییر اقلیمی تحت سناریوهای مختلف بر مقدار دبی حوضه مورد مطالعه است. بدین منظور این مطالعه در دو مرحله اصلی شامل بررسی تغییرات اقلیم تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی انجام شد. در این تحقیق از داده‌های بارش و دما چهار مدل CMIP5 شامل CCSM4، CSIRO-Mk3.6.0، GFDL-ESM2G، HadGEM2 برای دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) استفاده شد. برای بررسی تغییرات اقلیمی منطقه، خروجی مدل HadGEM تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از مدل LARS-WG برای دوره‌های ۲۰۱۷-۲۰۳۶ کوچک مقیاس شده و تغییرات اقلیمی دوره‌های آینده در مقایسه با دوره پایه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

مدل HadGEM در بردارنده وضعیت جفت شده هواسپهری-اقیانوسی است که با گسترش قائل یا بدون آن در هواسپهر، شامل ارزیابی خوب از پوشش سپهر و موقعیت سامانه زمین است که شامل پوششی گیاهی، زیست اقیانوسی و شیمی هواسپهر نیز می‌گردد. مؤلفه هواسپهری این مدل دارای ۳۹ لایه که تا ارتفاع ۴۰ کیلومتری امتداد می‌یابد و تفکیک افقی آن از $1/25$ درجه عرض جغرافیایی و $1/875$ درجه طول جغرافیایی است. تفکیک مکانی مدل با حدود ۲۰۸ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر استوار است که در عرض‌های بالاتر این مقدار کاهش یافته و در عرض جغرافیایی ۵۵ به ۱۲۰ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر می‌رسد. مؤلفه اقیانوسی از شبکه عرضی و طولی با تفکیک طولی یک درجه و تفکیک مکانی عرضی که از ۱ درجه بین قطبین و ۳۰ درجه شمالی و جنوبی که به طور یکنواخت یک سوم درجه در استوا است، استفاده می‌کند (Kolinz et al., 2008). ساختار این مدل، پایدار بوده که حالت و وضعیتی واقعی را از شرایط زیستی آب و هوا، پوشش گیاهی و اقیانوس بدون نیاز به اصلاحات فرضی و ساختگی ارائه دهد و تعادل چرخه کربن را بین اقیانوس، زمین و پوشش گیاهی پویا نشان می‌دهد (Ahmadi et al., 2019).

به منظور ارزیابی و مقایسه دقت مدل استفاده شده برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گردش عمومی از مقایسه داده‌های دوره پایه و داده‌های تولید شده به وسیله مدل با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای و پارامترهای خطاسنجی BIAS، MAE، RMSE و NSE صورت گرفت.

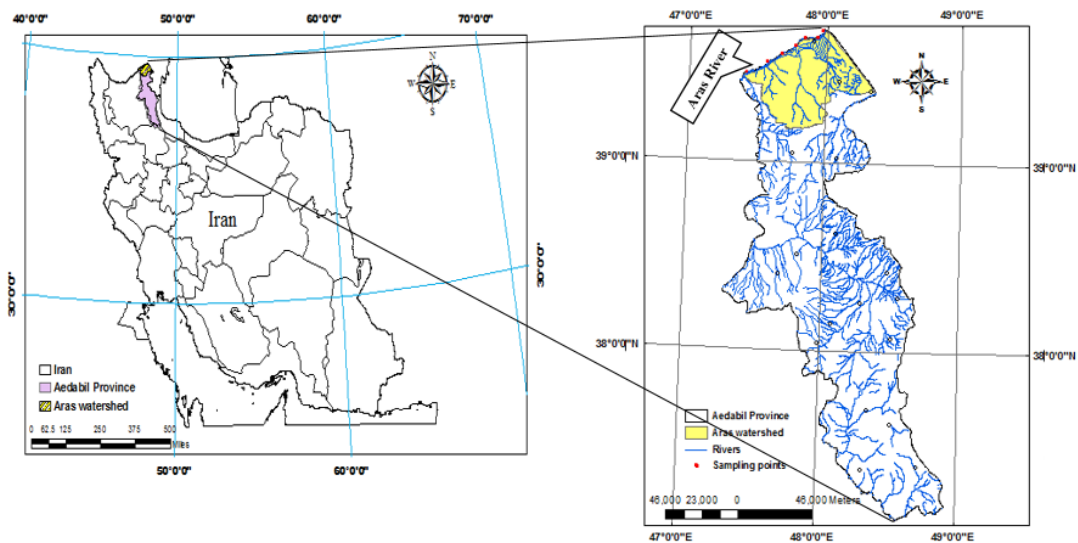


Fig. 1- Geographical location of Aras watershed Within Ardabil province
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز ارس در محدوده استان اردبیل

تولید رواناب، فرسایش و رسوب و کیفیت آب در حوضه‌های آبخیز پیچیده و وسیع کاربرد دارد (Neitsch et al., 2005). مؤلفه‌های اصلی SWAT شامل آب و هوا، هیدرولوژی، رسوب، رشد محصول، مواد غذایی، آفتکش‌ها، باکتری‌ها و پاتوژن‌ها و مدیریت کشاورزی می‌باشد. در این مدل حوضه بر اساس نوع خاک، کاربری اراضی و کلاس‌های شیب به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌شوند.

در این مطالعه از داده‌های ماهانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک پیرامون حوضه مورد مطالعه در طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۵ به عنوان داده‌های شاهد استفاده شد. جهت ارزیابی و مقایسه دقت داده‌های ریزمقیاس شده، مقایسه داده‌های دوره پایه و داده‌های تاریخی تولید شده توسط مدل با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای و پارامترهای خط‌سنجی RMSE، MAE، BIAS، NSE انجام شد. مقدار پارامتر NSE بین $-\infty$ و ۱ متغیر می‌باشد و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده بیش‌تر بودن دقت مدل است. پارامترهای MAE و RMSE خطای مدل را نشان می‌دهند و پایین‌تر بودن مقادیر مربوط به این دو معیار نشان‌گر کارایی بهتر مدل می‌باشد. نزدیک به صفر بودن پارامتر BIAS نیز نشان‌دهنده دقت بیش‌تر مدل در شبیه‌سازی است (Mehrotra et al., 2014). آماره‌های مذکور با استفاده از روابط ۲ تا ۵ محاسبه شده‌اند:

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum (X_o - X_s)^2}{\sum (X_o - \bar{X}_o)^2} \right] \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_o - X_s|}{N} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (X_s - X_o) \quad (5)$$

در روابط بالا X_o : داده‌های مشاهده شده، X_s : داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o : میانگین داده‌های مشاهده شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

پس از اطمینان از قابلیت مدل ریزمقیاس‌نمایی تغییر عامل در تولید داده‌های اقلیمی، این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی برون‌داد مدل گردش کلی جو و تولید داده‌های مصنوعی جهت پیش‌بینی اقلیم دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ اجرا شد. در مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی به علت عدم شناخت کامل فرآیندها در سامانه اقلیمی وجود دارد. در این پژوهش سعی شده است تا عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل گردش کلی با در نظر گرفتن سه سناریو از سری سناریوهای مورد تأیید IPCC شامل سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تعدیل گردد. پس از اجرای مدل و تولید مقادیر ماهانه پارامتر بارش برای دوره‌های آینده این پارامتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شرایط اقلیمی دوره آینده پیش‌بینی شد.

چرا که نیاز اساسی مدل LARS-WG 5.5 در مرحله واسنجی کردن، فایلی است که مشخص‌کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته می‌باشد. این فایل با استفاده از داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی کلیه ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه، با در نظر گرفتن یک دوره به عنوان دوره پایه، تهیه شده و مدل بر اساس آن اجرا شد. در مرحله بعد با استفاده از آماره‌های صحت‌سنجی اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های مشاهده شده در دوره پایه گردید. پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، مرحله سوم یا شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ اجرا شد. جهت اصلاح و ریزمقیاس‌نمایی مدل در دوره ارزیابی از رابطه ۱ استفاده شد:

$$x_{cor, i} = x_{o, i} \times \frac{\mu_p}{\mu_b} \quad (1)$$

که در این رابطه، $X_{cor, i}$ نشان‌دهنده داده‌های اصلاح شده و $X_{o, i}$ نشان‌دهنده داده‌های شاهد در دوره ارزیابی، μ_p و μ_b به ترتیب نشان‌دهنده داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره پایه و دوره ارزیابی و داده‌های شاهد می‌باشد. جهت اصلاح داده‌ها در دوره ارزیابی به صورت ماهانه میانگین بارش تمامی ماه‌های ژانویه در دوره ارزیابی بر میانگین تمام ماه‌های ژانویه در دوره پایه تقسیم شد، بدین ترتیب عامل تغییر ماه ژانویه به دست آمد، برای ماه‌های دیگر نیز به همین ترتیب عمل شد در مرحله بعد عامل تغییر به دست آمده برای ماه‌های ژانویه در تک تک ماه‌های ژانویه مشاهداتی در دوره پایه ضرب شد و داده‌های دوره ارزیابی اصلاح و از یک درجه به ۰/۲۵ درجه ریزمقیاس شد.

سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرکه‌های تابشی هستند و در میان آنها سناریو RCP2.6 سناریوهای انتشار و محرکه‌های تابشی کم و RCP8.5 سناریوهای انتشار و محرکه‌های تابشی زیاد و RCP4.5 شرایط متوسط را از نظر انتشار و محرکه‌های تابشی نشان می‌دهند (Lu et al., 2010). به همین دلیل یکی از مهمترین ویژگی‌های این سناریوها توانایی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم می‌باشد (Nelson et al., 2009). در این تحقیق برای تحلیل آینده از میان سناریوهای معرفی شده توسط IPCC (AR5) سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۳۶-۲۰۱۷) انتخاب شد. هدف از انتخاب آنها پیش‌بینی حداقل و حداکثر تغییرات آینده می‌باشد.

برای بررسی مقدار دبی حوضه مطالعاتی در دوره‌های آتی، خروجی‌های سناریوهای اقلیمی به مدل SWAT که برای دوره پایه واسنجی و صحت‌سنجی شده است، وارد شده و نتایج آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این مدل متعلق به مدل‌های هیدرولوژیک نیمه توزیعی، و پیوسته است که برای شبیه‌سازی فرایندهای متعدد هیدرولوژیکی مانند

به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب از مدل SWAT استفاده شد. مؤلفه‌های اصلی SWAT شامل آب و هوا، هیدرولوژی، رسوب، رشد محصول، مواد غذایی، آفتکش‌ها، باکتری‌ها و پاتوژن‌ها و مدیریت کشاورزی می باشد (Morid et al., 2016).

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و یا با استفاده از روش‌های اتوکالیبراسیون امکان‌پذیر است. در پژوهش حاضر، این مرحله به صورت اتوکالیبراسیون و با استفاده از برنامه SUFI2 و بر اساس آمار دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه سد میل و مغان بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۰ انجام شد. SUFI2 یک الگوریتم اتوماتیک مدل‌سازی معکوس است. مراحل اجرای برنامه SUFI2 بدین صورت است که پس از تعیین محدوده منطقی و مناسب برای هر یک از عوامل مدل توسط کاربر و تعیین تعداد تکرار شبیه‌سازی، برنامه با نمونه‌گیری لاتین هایلبرگ کیوب در فضای عوامل (بازه تعیین شده برای هر یک از عوامل) به صورت تصادفی مقادیری برای عوامل انتخاب می‌کند. بدین ترتیب، اگر n تکرار برای اجرای مدل در نظر گرفته شود، n ترکیب مختلف از عوامل ایجاد می‌شود. سپس مدل SWAT، n بار اجرا می‌شود و سری زمانی خروجی‌های مدل در فایل‌هایی ذخیره می‌شود (Ababayi et al., 2012).

در الگوریتم SUFI-2، عدم قطعیت برای تمام منابع مؤثر هم‌چون بارش باران، مدل مفهومی، پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. در این برنامه از عامل P-factor برای بیان میزان تأثیر تمام پارامترهایی که باعث به وجود آمدن عدم قطعیت شده‌اند استفاده می‌گردد، که بیانگر درصد داده‌هایی است که باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. همچنین R-factor از دیگر پارامترهای مشخص کننده تحلیل عدم قطعیت در برنامه SUFI-2 می‌باشد که عبارت از متوسط پهنای باند اطمینان ۹۵ درصد است که از تقسیم انحراف استاندارد داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های واقعی به دست می‌آید. از لحاظ تئوری مقادیر عددی R-factor و P-factor به ترتیب در محدوده صفر تا ۱۰۰ درصد و صفر تا بی‌نهایت قرار می‌گیرند. اما در عمل، امکان رسیدن به چنین ارقامی وجود ندارد (Abbaspour, 2007).

در ادامه، معیارهای برآورد عدم قطعیت و شاخص‌های نیکویی برازش مانند ضریب تعیین ضریب نش- ساتکلیف برای بهترین شبیه‌سازی محاسبه می‌شوند. با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل، عوامل مهم و مؤثر شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. در نرم‌افزار SWAT CUP جهت واسنجی ابتدا پارامترهای حساس با استفاده از مطالعات انجام شده در آن حوضه و آزمون و خطا

شناسایی می‌شوند، سپس این پارامترها وارد مدل گردیده و با مقادیر حداقل و حداکثر ورودی مورد واسنجی قرار می‌گیرند، پس از چندین مرحله واسنجی که نتایج حاصل از توابع هدف ثابت شده و نتیجه‌ی نهایی کسب شد، در این مرحله پارامترهای حساس نیز ثابت شده و مقدار حداقل و حداکثر و بهینه‌ی آنها بدست می‌آید. پس از بدست آمدن مقدار بهینه‌ی پارامتر، آن مقدار وارد مدل SWAT شده و مدل دوباره اجرا می‌گردد. همچنین مقادیر بهینه مقادیر آماده جهت ورود به مدل نبوده و برای ورود به مدل جهت کالیبراسیون، بایستی روش‌هایی که در فوق ذکر شد بر روی مقادیر پارامترها اعمال شده و سپس وارد مدل گردند.

جهت واسنجی دوره آماری ۱۱ ساله (۲۰۰۶-۱۹۶۶) مورد استفاده قرار گرفت. واسنجی و تحلیل باند عدم قطعیت خروجی مدل SWAT به صورت خودکار و با استفاده از نرم‌افزار SWATCUP و الگوریتم SUFI2، انجام گرفت. جهت رسیدن به نتایج مطلوب، واسنجی چندین بار تکرار شد تا نتایج حاصل از توابع هدف به مقادیری ثابت برسد. برای شبیه‌سازی جریان، مقدار معیارهای نش- ساتکلیف و ضریب تعیین برآورد شده در مرحله واسنجی به ترتیب معادل ۰/۷۹ و ۰/۶۶ در مرحله اعتبارسنجی معادل ۰/۶۸ و ۰/۶۰ می‌باشد. عموماً اگر شاخص نش- ساتکلیف بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج رضایتبخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیر قابل قبول فرض می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970).

۳- نتایج

در جدول ۱ مقادیر BIAS؛ NSE؛ MAE و RMSE مربوط به پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر ارائه شده است. بالا بودن مقادیر پارامتر NSE، نشان از کارایی و توانایی بالای مدل LARS-WG در تولید پارامترهای اقلیمی حوضه مورد مطالعه دارد. مقدار پارامتر RMSE برای حداکثر و حداقل دما به ترتیب ۰/۲۵۹ و ۰/۱۱ کمتر از مقدار این پارامتر برای بارش است که نشان‌دهنده توانایی بیشتر LARS-WG در مدل‌سازی داده‌های دما نسبت به بارش بوده و دلیل این امر مربوط به ماهیت پارامتر دما می‌باشد که عنصری پیوسته است و تغییرپذیری بارش دلیل بر افزایش خطای مدل‌سازی این پارامتر می‌باشد. به عبارتی هر چه پارامتر حالت پیوستگی داشته باشد میزان خطای مدل‌سازی به حداقل می‌رسد که نتیجه به دست آمده با نتایج تحقیقات مشابهی نظیر Babayian and Koutrolis et al. (2013)، Najafi (2007) و Ababayi et al. (2012) و Bahri (2014) هم‌خوانی دارد.

افزایش خواهد یافت در صورتی که سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 به ترتیب کاهش ۲/۵۷ و ۲/۲۵ درصدی بارندگی را نشان می‌دهد (شکل ۲).

نتایج مربوط به تغییرات مجموع بارش در فصول مختلف سال در سناریوهای مورد بررسی در دوره آماری نشان می‌دهد که در فصل بهار به جز یک مقطع در بین سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ شاهد افزایش نسبی مجموع بارندگی خواهیم بود. پیش‌بینی‌های سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 بسیار به یکدیگر نزدیک بوده ولی سناریو RCP 8.5 در بعضی از مقاطع زمانی متفاوت می‌باشد. برای فصول تابستان، پاییز و زمستان هر سه سناریو روند متغیری را نشان می‌دهند (شکل ۳).

شکل ۴ میانگین دمای حداقل حوضه مورد مطالعه دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ را نسبت به دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ نمایش می‌دهد. هر سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 افزایش دمای حداقل را در تمامی ماه‌ها پیش‌بینی کرده‌اند. سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب نشان از افزایش دمای ۰/۲ تا ۱/۱ و ۰/۵ تا ۰/۹ و ۰/۲ تا ۱/۰۷ درجه سانتی‌گرادی دمای حداقل دارند. به‌صورتی که بیش‌ترین افزایش دما مربوط به ماه جولای و کم‌ترین آن مربوط به ماه اکتبر خواهد بود. چنان‌چه مشاهده می‌شود سناریوی RCP 2.6 افزایش دمای بیش‌تری را پیش‌بینی می‌کند.

از نظر تغییرات فصلی نیز هر سه سناریو افزایش دمای حداقل را برای تمامی فصول پیش‌بینی نموده‌اند. افزایش مقدار دمای حداقل در تابستان و بهار بیش‌تر از فصول زمستان و پاییز و به مقدار ۰/۶ تا ۰/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۴).

Table 1- Values of error evaluation parameters of climatic parameters

Index	Precipitation	Minimum temperature	Maximum temperature
BIAS	0.64	0.165	0.172
NSE	0.659	0.624	2.054
MAE	5.57	0.536	0.637
RMSE	7.494	0.11	0.259

میانگین بارش ماهانه تولید شده و تغییرات بارش دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ نسبت به دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ در شکل ۲ آورده شده است. میزان تغییرات بارش روند یکنواختی را نشان نمی‌دهد. هر سه سناریو به‌صورت مشترک افزایش بارندگی را برای ماه‌های آگوست و دسامبر و کاهش بارندگی را برای ماه‌های آپریل و نوامبر پیش‌بینی نموده‌اند. سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 و RCP 8.5 بیش‌ترین افزایش بارندگی را برای ماه دسامبر پیش‌بینی نموده‌اند. در ماه‌های فوریه، می، مارس، ژوئن، سپتامبر و اکتبر سناریوها تغییرات متفاوتی را نشان داده‌اند. به‌طور کلی مجموع بارش متوسط سالانه در دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ حوزه آبخیز ارس روند کاهشی خواهد داشت. میزان تغییرات بارش متوسط سالانه پیش‌بینی شده برای این دوره تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر با ۲/۵۷، ۲/۲۵ و ۱/۷۶ درصد خواهد بود، در صورتی که میزان بارندگی سالانه دوره پایه ۲۸۶/۶۴ میلی‌متر بوده، بدین صورت حوضه مورد مطالعه شاهد کاهش بارش ۷/۳۹ تا ۶/۴۵ میلی‌متر خواهد بود.

از نظر تغییرات فصلی، فصول پاییز و زمستان با کاهش بارندگی همراه خواهند بود. در فصل تابستان و پاییز سناریوها عملکرد متفاوتی داشته‌اند، طبق سناریو RCP 8.5 بارندگی به میزان ۱/۷۶ درصد

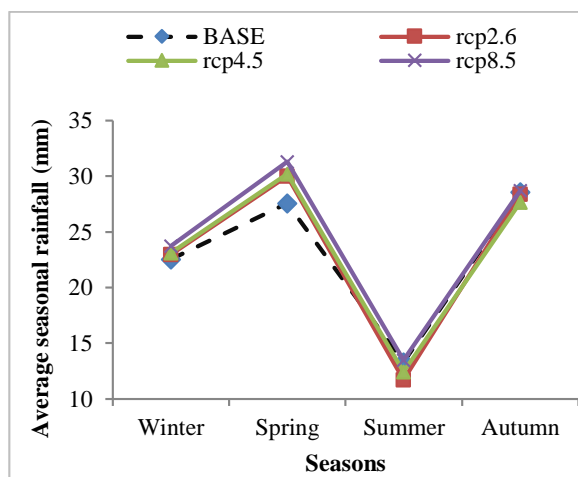
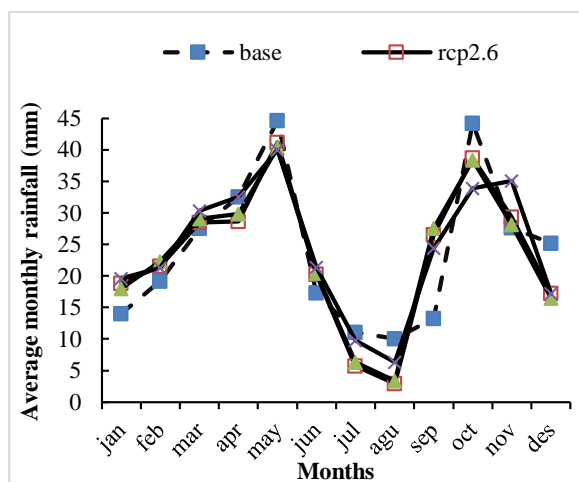


Fig. 2- Average monthly and seasonal precipitation of 1985-2005 and 2017-2036 under the influence of RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

شکل ۲- میانگین بارش ماهانه و فصلی ۱۹۸۵-۲۰۰۵ و ۲۰۱۷-۲۰۳۶ بر اساس سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

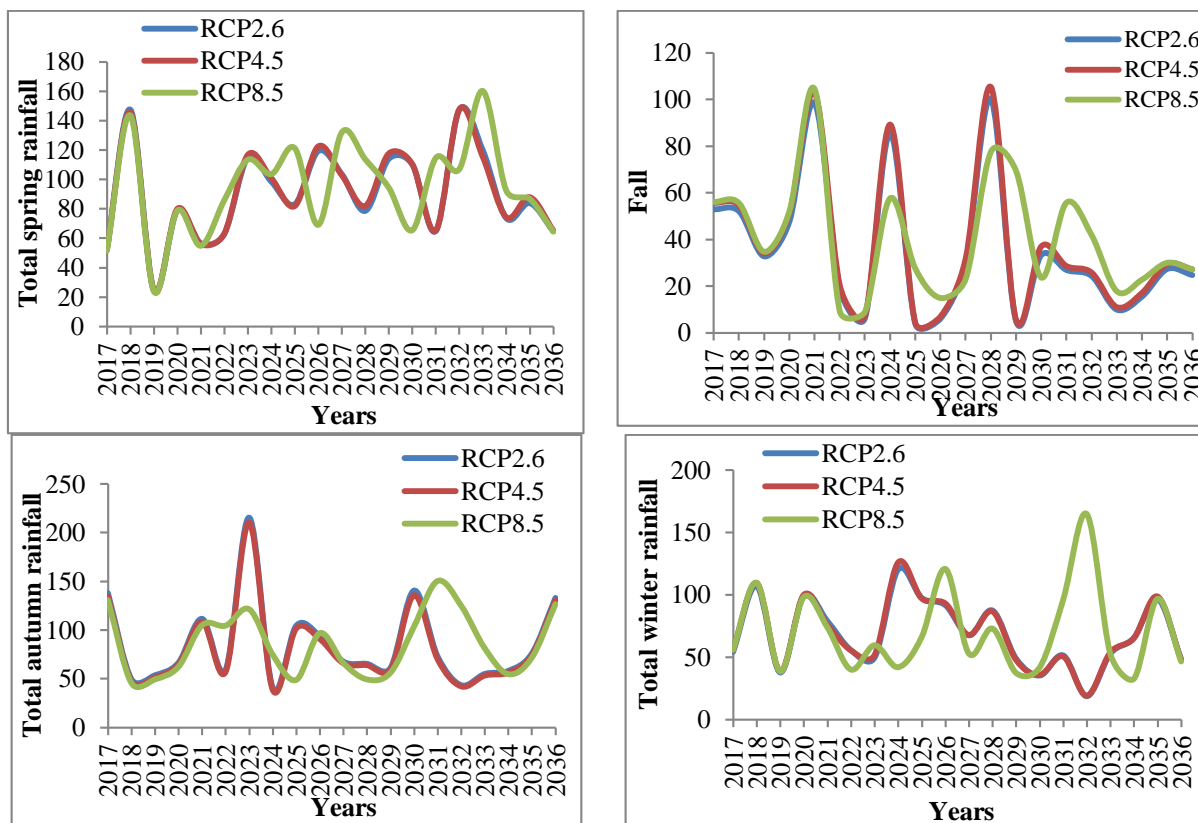


Fig. 3- Time series related to the total seasonal rainfall in the years 2017-2036 based on the scenarios of RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5

شکل ۳- سری زمانی مربوط به مجموع بارش فصلی در سالهای ۲۰۱۷-۲۰۳۶ بر اساس سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

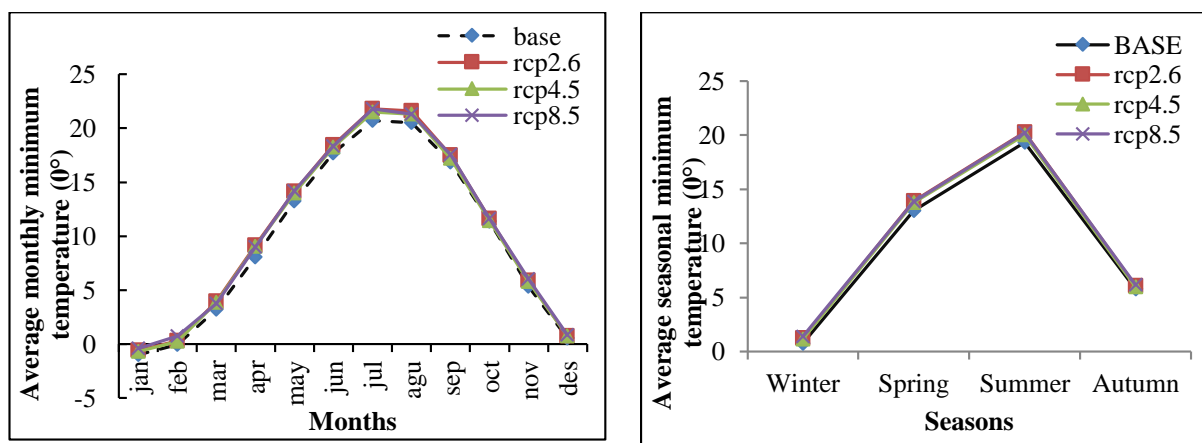


Fig. 4- Average monthly and seasonal average temperature of 1985-2005 and 2017-2036 under the influence of RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

شکل ۴- میانگین دمای حداقل ماهانه و فصلی دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ و ۲۰۱۷-۲۰۳۶ بر اساس سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

سانتی‌گراد خواهد بود. کم‌ترین افزایش مربوط به ماه جولای و به میزان ۰/۹ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد رخ خواهد داد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که سناریو RCP 4.5 افزایش دمای بیش‌تری را پیش‌بینی می‌کند.

با توجه به شکل (۵) هر سه سناریو مطالعه شده افزایش دمای حداکثر را برای تمامی ماه‌ها پیش‌بینی نموده‌اند. با مقایسه دمای حداکثر دوره مشاهده‌ای و دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۶، مشاهده می‌شود که بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر در ماه مارس و به مقدار ۰/۵ تا ۱/۱ درجه

بر پارامترهای حساس انجام گرفت. در جدول ۲ پارامترهای حساس به ترتیب حساسیت، همراه با مقادیر اولیه پارامتر و مقادیر حداقل و حداکثر و مقدار بهینه شده آورده شده‌اند.

باتوجه به جدول فوق مشاهده می‌شود که پارامترهای حساس به ترتیب حساسیت از شماره ۱ تا ۲۰ آورده شده‌اند. حساسیت پارامترها با دو فاکتور P-Value و T-Stat سنجیده شد. نحوه‌ی تعیین حساسیت بدین‌گونه است که در فاکتور P-Value هرچه مقدار پارامتر به صفر نزدیک باشد، آن پارامتر حساس بوده و در رتبه‌بندی در ردیف اول قرار می‌گیرد (Abbaspour, 2008). در مورد T-Stat نیز بدین‌گونه است که هرچه مقدار قدر مطلق پارامتر بیشتر باشد آن پارامتر حساس‌تر است (Abbaspour, 2008). با توجه به موارد ذکر شده عامل جبران تبخیر در خاک (ESCO.hru) بیشترین تأثیر و بیشینه نرخ ذوب برف (SMFMX.bsn) کمترین تأثیر را روی دبی خروجی داشته است.

در این تحقیق واسنجی در دو مرحله و در هر مرحله با ۵۰۰ تکرار انجام شد و سپس مقادیر حاصله ثابت شد. نتایج آماری عدم قطعیت با استفاده از توابع هدف، از قبیل ضریب تعیین (R^2)، کارایی مدل (NS)، P-factor، R-factor، PBIAS و MSE مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

طبق جدول ۳، مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از توابع هدف قبل از واسنجی اولیه رضایت‌بخش نبوده است ولی پس از واسنجی نتایج توابع هدف شرایط مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

در بررسی تغییرات فصلی دمای حداکثر ملاحظه می‌شود که دمای حداکثر نیز همانند دمای حداقل در تمامی ماه‌ها افزایش خواهد داشت. به‌طوری که افزایش دمای حداکثر همانند دمای حداقل، در سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 در فصول گرم بیش‌تر از فصول سرد خواهد بود. لیکن در سناریوی RCP 4.5 فصول سرد نسبت به فصول گرم سال افزایش بیشتری را نشان می‌دهند و بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر تحت سناریوی RCP 4.5 برای فصل زمستان و به مقدار ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای تابستان به مقدار ۵/۳ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است.

در شکل ۵ طبق سناریوی RCP 2.6 نیز بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر برای فصل بهار و به مقدار ۱/۰ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای زمستان به مقدار ۰/۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. همچنین بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر تحت سناریوی RCP 8.5 برای فصل بهار و به مقدار ۰/۷ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای زمستان به مقدار ۰/۵ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. پس از استخراج داده‌های حاصل از پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، داده‌های بارش پیش‌بینی شده به عنوان ورودی به مدل کالیبره شده SWAT معرفی شد و تأثیر این تغییرات بر میزان آورد رودخانه برآورد گردید.

حساسیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز بر حسب شرایط و ویژگی‌هایشان، در برابر یک پارامتر خاص کاملاً متفاوت است. طبق مطالعات انجام شده در این زمینه، تعداد ۲۰ پارامتر از حساس‌ترین‌ها انتخاب و جهت واسنجی وارد مدل گردیدند. در مرحله اول واسنجی ابتدا پارامترهای حساس شناخته شد و عملیات واسنجی بیشتر با تأکید

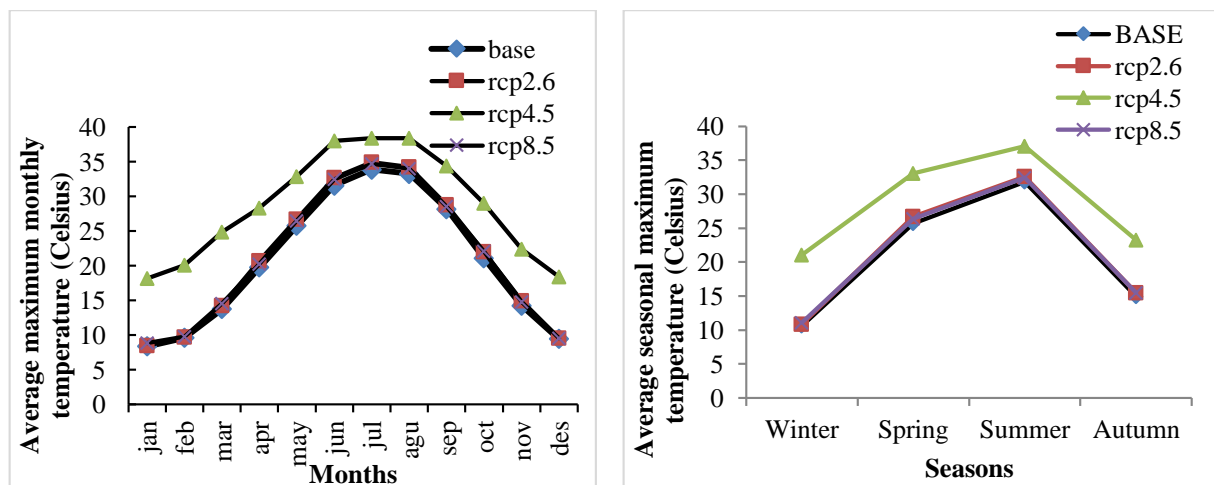


Fig. 5- Average monthly and seasonal average temperature of the period 1985-2005 and 2017-2036 under the influence of RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

شکل ۵- میانگین دمای حداکثر ماهانه و فصلی دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷-۲۰۳۶ بر اساس سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

Table 2- Selected sensitive parameters and optimal values of parameters obtained from Aras watershed sensitivity analysis

جدول ۲- پارامترهای حساس انتخاب شده و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای حاصل از آنالیز حساسیت حوزه آبخیز ارس

Optimized value	Maximum value	Minimum value	T-Stat	P-Value	Unit	Parameter characteristic	Parameter name	Rank
Optimal values of parameters			Selected sensitive parameters from sensitivity analysis					
2.57	5	0.00	3.82	0.00	-	ESCO.hru	Compensating the evaporation in the soil	1
8.21	10	-10	3.21	0.00	C°	CN2.mgt	SCS method curve number	2
0.78	0.9	-0.9	2.74	0.00	mm/hr	SOL_AWC.sol	Available water	3
12.5	100	0.00	2.13	0.02	m	SLSUBBSN.hru	Average slope length	4
7.25	24	0.00	-1.53	0.04	-	SURLAG.bsn	Surface runoff delay coefficient	5
0.59	1	0.00	-1.45	0.05	mm/mm	SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity	6
0.82	1	-1	1.33	0.05	day	ALPHA_BF.gw	Constant groundwater discharge	7
-3.15	10	-10	-1.22	0.10	mm/ °C-day	GW_DELY.gw	Groundwater delay time	8
5.26	10	0.00	1.19	0.11	g/cm ³	SOL_BD.sol	Soil mass density	9
1.36	5	1	-1.16	0.14	mm	SOL_Z.sol	Thickness of soil layers	10
30.69	100	0.00	-1.07	0.23	mm/hr	CH_K2.rte	Hydraulic conduction of the channel	11
0.85	1	0.00	-1.05	0.24	-	ALPHA_BNK.rte	Moisture retention factor	12
2.56	5	0.00	1.04	0.3	-	EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	13
0.25	1	0.00	-0.73	0.43	mm	GWQMN.gw	The minimum amount of water stored in the shallow aquifer for the base flow to occur	14
0.05	0.1	-0.1	0.72	0.43	-	SMTMP.bsn	Snowfall temperature	15
0.85	1	0.00	0.68	0.43	m	REVAPMN.gw	Depth of water threshold in shallow aquifer to penetrate deep aquifer	16
0.68	1	0.00	0.65	0.48	-	TIMP.bsn	Stack snow temperature delay factor	17
-0.2	10	-10	-0.52	0.49	mm/ °C-day	SMFMN.bsn	Minimum snow melting rate	18
-2.30	10	-10	0.25	0.73	C°	SFTMP.bsn	Snowmelt temperature	19
7.52	10	0.00	-0.02	0.94	day	SMFMX.bsn	Maximum snow melting rate	20

Table 3- Preliminary results of modeling and validation model for Aras watershed

جدول ۳- نتایج اولیه واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای حوزه آبخیز ارس

MSE	PBIAS	R-factor	P-factor	NS	R2	Calibration steps
58.35	23.45	0.00	0.12	0.36	0.11	Before calibration
22.28	14.25	0.54	0.53	0.79	0.66	Initial calibration
26.73	19.4	0.40	0.41	0.68	0.60	Validation period

شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی مدل SWAT قبل از واسنجی را برای دوره ۲۰۰۶-۱۹۹۶ نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، مدل در شبیه‌سازی کمتر برآورد داشته است و همچنین روند داده‌ها نیز همخوانی خوبی با داده‌های مشاهداتی ندارد. باتوجه به شکل ۷ تغییرات

طبق نتایج (Akhavan et al. (2009)، اگر مقدار نش -ساتکلیف از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود.

ارس با دقت مناسب را دارد. به طور کلی مقادیر همه شاخص‌های ارزیابی بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان می‌باشد (جدول ۳).

دبی برای دوره‌ی واسنجی نشان داده شده است. چنانچه از شکل مشخص است روند افزایش یا کاهش دبی شبیه‌سازی شده، مطابقت و همخوانی زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آن دارد.

پس از مرحله اعتبارسنجی، مدل واسنجی شده SWAT برای بررسی تاثیر شرایط تغییر اقلیم به‌اجرا در آمد. به این منظور با ثابت در نظر گرفتن شرایط ادا فیزیکی و کاربری اراضی، مقادیر برآورد شده بارش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی به مدل معرفی شد. بر این اساس تغییرات دبی ورودی به ایستگاه شاخص حوضه (ایستگاه سد میل و مغان) در سناریو پایه و آینده تحت هر سه سناریو انتشار RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 مقایسه شدند (شکل ۹). نتایج نشان می‌دهد در ماه‌های مارس، آوریل، می، جون، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش قابل ملاحظه دبی در ایستگاه سد میل و مغان بوجود خواهد آمد، که تحت سناریو RCP8.5 این کاهش شدیدتر می‌باشد.

نتایج حاصل از واسنجی مدل در شکل ۸ حاکی از آن است که روند افزایش یا کاهش دبی شبیه‌سازی شده، مطابقت زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد به نحوی که پس از واسنجی اولیه مدل ضرایب اطمینان R^2 و NS به ترتیب از ۰/۱۱ و ۰/۳۶ به ۰/۶۶ و ۰/۷۹ ارتقاء پیدا کرد.

پس از انجام آنالیز حساسیت و واسنجی، برای دوره‌ی آماری ۱۱ ساله (۲۰۰۷-۲۰۱۷) اعتبارسنجی مدل SWAT انجام شد. نتایج در شکل (۸) آورده شده است. همچنین، در جدول ۳ نتایج ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی آورده شده است. بر اساس این مطلب، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز

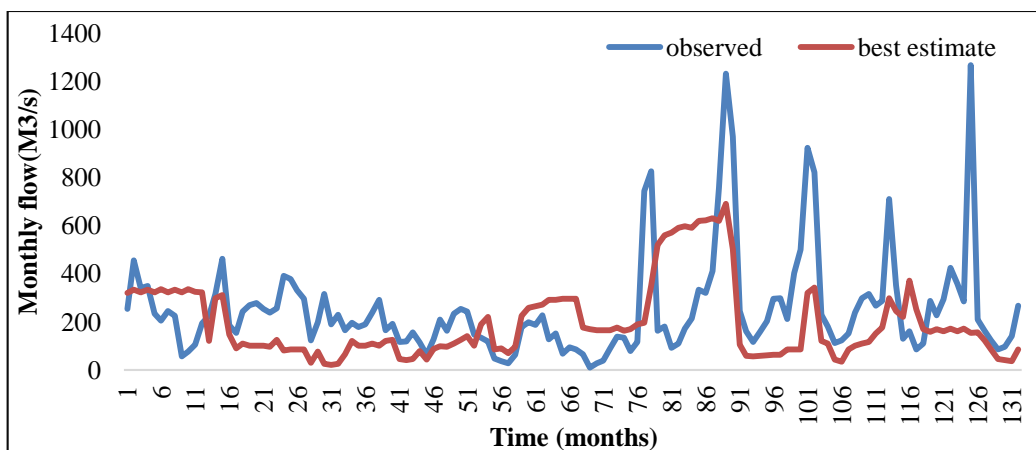


Fig. 6- Scheme of SWAT model before calibration for 11-year period (1996-2006) at Mill and Moghan Dam Station

شکل ۶- نمودار حاصل از مدل SWAT قبل از واسنجی برای دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۶) در ایستگاه سد میل و مغان

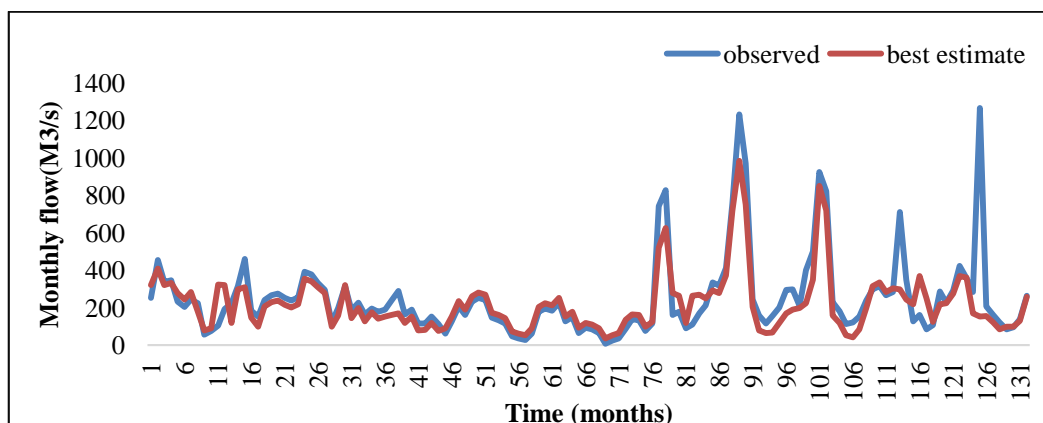


Fig. 7- SWAT diagram of the 11-year period (1996-2006) at the Mill and Moghan Dam Station
شکل ۷- نمودار حاصل از واسنجی مدل SWAT برای دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۶) در ایستگاه سد میل و مغان

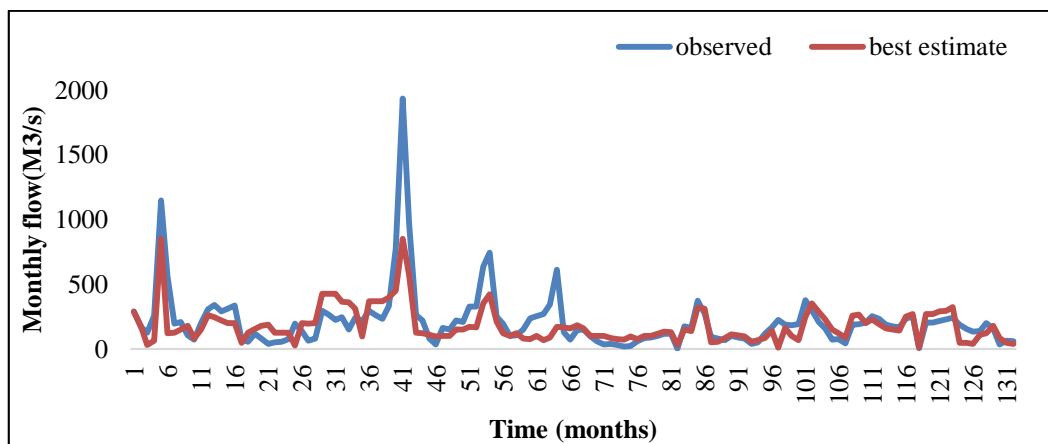


Fig. 8- SWAT validation diagram for the 11-year period (2007-2017) at Mill and Moghan Dam Station
 شکل ۸- نمودار حاصل از اعتبارسنجی مدل SWAT برای دوره ۱۱ ساله (۲۰۱۷-۲۰۰۷) در ایستگاه سد میل و مغان

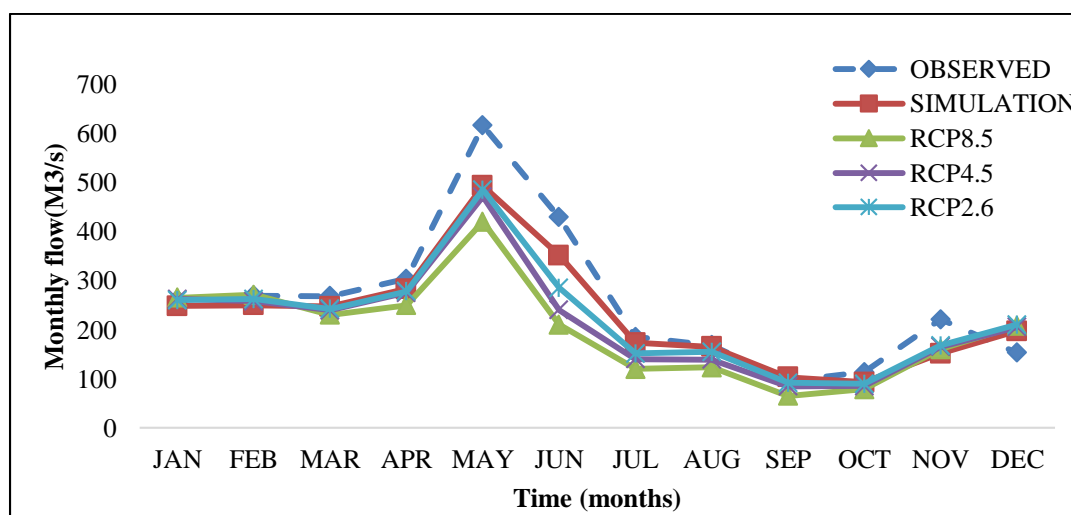


Fig. 9- Comparison of the monthly average results of the output flow of Mill and Moghan dam stations under the scenarios of RCP8.5, RCP4.5 and RCP2.6 of the period 2017-2036

شکل ۹- مقایسه نتایج میانگین ماهانه دبی خروجی ایستگاه سد میل و مغان بر اساس سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۶

RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به صورت مشترک افزایش بارندگی را برای ماه‌های آگوست و دسامبر و کاهش بارندگی را برای ماه‌های آپریل و نوامبر پیش‌بینی کردند و به طور کلی مجموع بارش متوسط سالانه در دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۶ حوزه آبخیز ارس روند کاهشی را نشان می‌دهد. از نظر تغییرات فصلی نیز طبق پیش‌بینی انجام پذیرفته توسط مدل، فصول پاییز و زمستان با کاهش بارندگی همراه خواهند بود که این نتیجه با مطالعات Zhao et al. (2019)، Xu et al. (2019) و Azari et al. (2016) که کاهش بارندگی در نتیجه تغییر اقلیم در مطالعات خود را پیش‌بینی نموده‌اند، مطابقت دارد. با توجه به اینکه بخش وسیعی از حوزه مطالعاتی به کشت دیم اختصاص داشته و علاوه بر آن مناطق تحت کشت آبی در سالهای اخیر با چالش جدی کمبود آب مواجه شده است به نظر می‌رسد در سالهای آتی با توجه به

در بقیه ماه‌ها مقدار میانگین ماهانه دبی اندکی افزایش یافته است اما بطور کلی و در مقیاس سالانه هر سه سناریو کاهش دبی را پیش‌بینی نموده‌اند. مقادیر دبی سالانه در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و تحت سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 به ترتیب برابر با ۸/۶۶، ۸/۷۳ و ۹/۷۳ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است در حالی که این مقدار برای دوره پایه برابر با ۱۲/۵۱ مترمکعب بر ثانیه بوده است و این به معنای کاهش ۳۰/۷، ۳۰/۲ و ۲۲/۲ درصدی دبی ورودی تحت سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج بررسی میزان تغییرات بارش نشان داد که هر سه سناریو

- meteorological stations. Iranian Water Research Journal 5(9):222-217 (In Persian)
- Abbaspour KC (2007) User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag, Swiss Fed. Institute of Aquatic Science and Technology Dübendorf, Switzerland
- Abbaspour KC, Faramarzi M, Seyed Ghasemi S, and Yang Y (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Journal of Water Resources Research 45:1-16
- Ahmadi m, Dadashi Rodbari A, Akbari Azirani T, Karami J (2019) Efficiency of HadGEM2-ES model in evaluating seasonal temperature anomalies in Iran under radiation induction scenarios. Earth and Space Physics 45(3):644-625
- Akhavan S, Abedi Koopai J, Mousavi F, Islamian S (2009) Estimation of water and green water using SWAT model in Hamedan Bahar catchment. Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences 14(50):9-23
- Azari M, Moradi HR, Saghafian B, and Faramarzi M (2016) Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran. Hydrological Sciences Journal 61(1):123-133
- Babaian A and Najafi Nik Z (2007) Introduction and evaluation of LARS-WG model for meteorological parameter modeling, Khorasan Province, statistical period 1961-2003. New Zealand Journal (62):65-49 (In Persian)
- Bahri M (2014) Assessing the impacts of climate change and land use on hydrological practices of watersheds (Case study: Eskandari Watershed, Isfahan Province). Master's Thesis, Yazd University, Iran (In Persian)
- Calzadilla A, Zhu T, Rehdanz K, Tol RSJ, and Ringler C (2013) Economywide impacts of climate change on agriculture in Sub-Saharan Africa. Ecological Economics 93:150-165
- Chimtengo M, Ngongondo C, Tumbare M, and Monjerezi M (2014) Analysing changes in water availability to assess environmental water requirements in the Rivirivi River basin, Southern Malawi. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 67, 202-213
- Collins W J, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Hinton T, Jones C D, Liddicoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, and Senior C (2008) Evaluation of the HadGEM2 model, Hadley Cent. Technical Note, 74
- Du X, Li X, Luo T, Matsuur N, Kadokami K, Chen J (2013) Occurrence and aquatic ecological risk assessment of typical organic pollutants in water of
- پیش‌بینی‌های انجام گرفته چالش آب در حوزه آبخیز مورد مطالعه بسیار جدی‌تر شده و نیازمند مدیریت صحیح و اصولی منابع آب می‌باشد. رودخانه ارس به عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در منطقه بوده که در صورت کاهش بارندگی و کاهش دبی رودخانه بحران آب در دوره‌های آتی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در مورد تغییرات حداقل دما هر سه سناریوی مورد آزمون افزایش دمای حداقل را در تمامی ماه‌ها پیش‌بینی کرده‌اند. به‌صورتی که بیش‌ترین افزایش دما مربوط به ماه جولای و کم‌ترین آن مربوط به ماه اکتبر خواهد بود. از نظر تغییرات فصلی نیز هر سه سناریو افزایش دمای حداقل را برای تمامی فصول پیش‌بینی کردند. افزایش مقدار دمای حداقل در تابستان و بهار بیش‌تر از فصول زمستان و پاییز و به مقدار ۰/۶۵ تا ۰/۹۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. که با نتایج مطالعه Morid et al. (2016) همسو است. بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر در ماه مارس و کم‌ترین افزایش مربوط به ماه جولای پیش‌بینی شده است. بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر تحت سناریوی RCP 4.5 برای فصل زمستان و به مقدار ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین آن برای تابستان به مقدار ۵/۳ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. طبق سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 نیز بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر برای فصل بهار و کم‌ترین آن برای زمستان پیش‌بینی شده است. که با نتایج تحقیقات Hutchins et al. (2018) و Rosen et al. (2017) همسو است. با افزایش دمای هوا به خصوص در فصول سرد سال بارش‌های مایع نسبت به بارش برف در منطقه افزایش یافته و با سرعت بیشتری از دسترس خارج می‌شود و در نتیجه ذخائر آبی حوزه مطالعاتی کاهش خواهد یافت. نتایج برآورد تغییرات آورد رودخانه ارس تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان داد در ماه‌های مارس، آوریل، می، جون، جولای، اگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش قابل ملاحظه دبی در ایستگاه سد میل و مغان بوجود خواهد آمد، که تحت سناریو RCP8.5 این کاهش شدیدتر می‌باشد. در بقیه ماه‌ها مقدار میانگین ماهانه دبی اندکی افزایش یافته است اما بطور کلی و در مقیاس سالانه هر سه سناریو کاهش دبی را پیش‌بینی نموده‌اند. با نتایج حاصل از مطالعه Morid et al. (2016) و Zhao et al. (2019) مطابقت دارد. بدین ترتیب با عنایت به اینکه تأمین مصارف مختلف آبی در حوزه مطالعاتی وابسته به رودخانه ارس است چالش کم‌آبی به خصوص برای مصارف کشاورزی اجتناب‌ناپذیر بوده و نیازمند مدیریت صحیح منابع آبی و به خصوص استفاده از روش‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی به منظور جلوگیری از هدر رفت آب در منطقه می‌باشد.

۵- مراجع

Ababayi b, Mirzai F, and Sohrabi d (2012) Performance evaluation of LARS-WG at 12 Iranian coastal

- Li FP, Zhang GX, and Dong LQ (2013) Studies for impact of climate change on hydrology and water resources. *Science Geographical* 4:457-464
- Lu E, Takle ES, Manoj J (2010) The relationships between climatic and hydrological changes in the upper Mississippi River Basin: A SWAT and Multi-GCM study. *American Meteorological Society* 11:437-451
- Marie Couture R, Jannicke Moe S, Lina Y, Yvind K, et al. (2018) Simulating water quality and ecological status of Lake Vansj, Norway, under land-use and climate change by linking process-oriented models with a Bayesian network. *Science of the Total Environment* 621(2018):713-724
- Mehrotra R, Evans J P, Sharma A, and Sivakumar B (2014) Evaluation of downscaled daily rainfall hindcasts over Sydney, Australia using statistical and dynamical downscaling approaches. *Hydrology Research* 45(2):226-249
- Mishra PK, Prasad S, et al. (2018) Contrasting pattern of hydrological changes during the past twomillennia from central and northern India: regional climate difference or anthropogenic impact? *Global and Planetary Change* 161:97-107
- Mohammadi MF (2015) Assessing the impacts of land use change on the quantity and water quality of Talar River using remote sensing and hydrological modeling M.Sc. Thesis, Sari University of Agriculture and Natural Resources, 104 pages (In Persian)
- Morid R, Delavar M, Eagderi S, and Kumar L (2016) Assessment of climate change impacts on river hydrology and habitat suitability of *Oxyneomacheilus bergianus*, Case study: Kordan River, Iran. *Hydrobiologia* 771:83-100
- Nash J E and Sutcliffe J V (1970) River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282-290
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, and King KW (2005) Soil and water assessment tool-theoretical documentation-version 2005, Texas. Agricultural Research Service 494p.
- Neitsch S L, Williams J R, Arnold J G, and Kiniry J R (2011) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. (2009) Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1):4-11
- Osman Y, Al-Ansari N, Abdellatif M, Sadeq A, Sven K (2014) Expected future precipitation in central Iraq Yangtze River estuary, *Procedia Environmental Sciences* 18:882-889
- Fataei E, Azizi A, Seyed Safavian ST, Imani AA, Ojaqi A, Farhadi H (2018) Predicting changes in some climatic variables of Aras valley watershed in the coming decades using change models. *Journal of Environmental Geology* 11(39):1-12
- Gautier E, Dépret T, Costard F et al. (2018) Going with the flow: hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. *Journal of Hydrology* 557:475-488
- Gosain A, Rao S, and Basuray D (2006) Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science* 90(3):346-353
- Habibnejad R, Shokoohi A (2020) Uncertainty analysis of IDF curves simulation under climate change scenarios using a weather generator model (Case study: Tehran). *Journal of Water Resources Research* 16(2):164-177 (In Persian)
- Hosseini SA (2016) Trends in changes in the quantity and quality of surface water resources and their relationship with land use and drought (Case study: Golgah Watershed, Babol). M.Sc. Watershed Management, Yazd University, 57 pages (In Persian)
- Hutchins MG, Abesser C, Prudhomme b, Celliott JA, et al. (2018) Combined impacts of future land-use and climate stressors on water resources and quality in groundwater and surface waterbodies of the upper Thames river basin, UK. *Science of the Total Environment* 631-632(2018):962-986
- Javadi Nejad H, Kavianpour MR, Budaghpour S, Pirooz B (2013) Investigating the effects of pollutant resources (urban, industrial and agricultural) on Aras River Water Quality and Providing Solutions. First National Conference on New Horizons in Empowerment and Sustainable Development of Architecture, Civil Engineering, Tourism and Urban and Rural Environment, 11 p. (In Persian)
- Keikha A (2015) The impact of climate change on surface water quality in future periods (Case study of Zarrineh Rood River). M.Sc. Thesis in Water Resources Engineering, University of Tehran, Aboorihan Campus 115 p. (In Persian)
- Koutrolis AG, Tsanis IK, Daliakopoulos IN, Jacob D (2013) Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology* 479:146-158
- Leigh C, Boulton AJ, Courtwright JL, Fritz K, May CL, Walker RH, Datry T (2016) Ecological research and management of intermittent rivers: An historical review and future directions. *Freshwater Biology* 61(8):1181-1199

- Wang R, Kalin L, Kuang W, Tian H (2014) Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama. *Hydrological Process* 28(22):5530-5546
- Wurbs RA and Muttiah RS (2002) Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International* 27(3):407-419
- Xu YP, Zhang X, Ran Q, Tian Y (2013) Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. *Journal of Hydrology* 483:51-60
- Yonesi Fard M, Paymazd Sh, Rahimi (2020) Simulation of climate change effect on the runoff of shazand basin applying WetSpa distributional model. *Journal of Water Resources Research* 16(2):230-242 (In Persian).
- Yousefi H, Moridi A, Yazdi J, KhazaiePoul A (2020) Investigating the effect of climate change on discharge, NO₃ load, and agricultural products yield upstream of Esteghlal dam. *Journal of Water Resources Research* 16(2):35-49 (In Persian)
- Zhang J, Gao G, Fu B, Zhang L (2018) Explanation of climate and human impacts on sediment discharge change in Darwinian hydrology: Derivation of a differential equation. *Journal Hydrology* 559:827-834
- Zhao CS, Zhang Y, Yang ST (2019) Predicting future river health in a minimally influenced mountainous area under climate change. *Science of the Total Environment* 656(2019):1373-1385
- using LARS-WG stochastic weather generator. *Engineering* 6:948-959
- Pahlavani S, Saeedpour B, Ghasemi A, Rezaei K (2015) Evaluation of Aras River quality based on Hilshenov index. *International Conference on New Research in Agricultural Sciences and Environment*, 16 p. (In Persian)
- Rahimian F (2016) Evaluation of temporal and spatial changes in the water quality of Aras River. M.Sc. Thesis in environmental geology, Urmia University, 107 p. (In Persian)
- Rosen J (2017) California rains put spotlight on atmospheric rivers. *Science* 355(6327):787-788
- Saha PP, Zeleke K, and Hafeez M (2013) Streamflow modeling in a fluctuant climate using SWAT: Yass River catchment in south eastern Australia. *Environmental Earth Sciences* 71(12):5241-5254
- Shen M, Chen J, Zhuan M, Chen H, Xu CY, Xiong L (2018) Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. *Journal of Hydrology* 556:10-24
- Vliet MT, Franssen WH, Yearsley JR, Ludwig F, Haddeland I, Lettenmaier DP, Kabat P (2013) Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23(2):450-464
- Wang H, Xiao W, Wang Y, Zhao Y, et al. (2019) Assessment of the impact of climate change on hydropower potential in the Nanliujiang River basin of China. *Energy* 167(2019):950e959