

Runoff Estimation Using IHACRES Model Based on CHIRPS Satellite Data and CMIP5 Models (Case Study: Gorganroud Basin- Aq Qala Area)

MAHMOUD AHMADI^{*1}, ABBASALI DADASHI-ROUDBARI¹, AIDA DEYRMAJAI¹

1. Department of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

(Received: Sep. 22, 2019- Revised: Dec. 29, 2019- Accepted: Dec. 30, 2019)

ABSTRACT

The catchment is a temporal-spatial dynamic hydrologic system; therefore, the process of rainfall-runoff is complicated. The hydrological models with their potentials are efficient tools to estimate runoff, especially under the conditions of climate change. The purpose of this study is to estimate runoff of Gorganroud Basin, located in the Aq Qala region, using the IHACRES semi-distributive model. For this purpose, the data of Gorgan Synoptic and Aq Qala Hydrometry Stations, four models; CanESM2, GFDL-CM3, HadGEM2, and MRI-CGCM3 from the CMIP5 models were applied under the SDSM and MarkSimGCM Statistical Downscaling methods. High-resolution CHIRPS precipitation data (0.05×0.05 arc degree) were also used. The statistical indices of R^2 , MBE, and RMSE were used for validation and non-parametric Mann-Kendall and Sen's Slope tests were used to evaluate the trend and slope trend of the data process. The results showed that the CanESM2 model downscaled with SDSM has a higher performance than the other models. CHIRPS data has also shown a good performance for rainfall studies. The long-term statistical behavior of discharge in Aq Qala showed that April and May have the maximum discharges among the other months. Although IHACRES model did not show an appropriate performance for prediction of maximum discharges, but in general, its performance is acceptable. The rainfall-runoff trend during the proposed future period under the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios will be reduced, whereas, it will be increased under the RCP8.5 scenario. Expected flood events in the region are also expected to show an increment trend with respect to the rainfall increment.

Keywords: Rainfall-runoff, CMIP5 models, CHIRPS satellite data, IHACRES model, Aq Qala.

* Corresponding Author's Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

برآورد رواناب با استفاده از مدل IHACRES بر اساس داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS و مدل‌های CMIP5 (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود-منطقه آق‌قلا)

محمود احمدی^{۱*}، عباسعلی داداشی رودباری^۱، آیدا دیرمجائی^۱

۱. گروه آب و هواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۳۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۹)

چکیده

حوضه آبخیز یک سامانه هیدرولوژیکی پویا به لحاظ زمانی-مکانی است؛ بنابراین روند تبدیل بارش به رواناب نیز بسیار پیچیده است. مدل‌های هیدرولوژیکی با توان بالقوه خود، ابزارهای کارآمدی به‌ویژه تحت شرایط تغییرات آب و هوایی محسوب می‌شوند. هدف از این مطالعه برآورد رواناب حوضه آبخیز گرگانرود-منطقه آق‌قلا با استفاده از مدل نیمه توزیعی IHACRES است. به این منظور داده‌های ایستگاه همدید گرگان، ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا، چهار مدل CanESM2، GFDL-CM3، HadGEM2 و MRI-CGCM3 از مجموعه مدل‌های CMIP5 تحت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و MarkSimGCM و داده‌های ماهواره‌ای بارش با توان تفکیک بالا (CHIRPS) (0.5×0.5) درجه قوسی) به‌کارگیری شدند. در ادامه از آماره‌های R^2 ، MBE و RMSE برای صحت‌سنجی و از آزمون‌های ناپارامتریک Mann-Kendall و Sen's Slope برای ارزیابی روند و شیب روند داده‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد مدل CanESM2 ریزگردانی شده با SDSM از عملکرد بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است. همچنین داده‌های CHIRPS کارایی مناسبی را برای مطالعه بارش نشان داده‌اند. رفتار آماری بلندمدت دبی در آق‌قلا نشان داد فروردین و اردیبهشت بیشینه دبی را در بین ماه‌های مختلف سال دارا می‌باشند. مدل IHACRES هر چند که در پیش‌بینی دبی‌های بیشینه نتوانسته دقت مناسبی را ارائه دهد اما در مجموع دارای دقت قابل قبولی است. بارش-رواناب در دوره مدل‌سازی شده آینده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 روند کاهشی و تحت سناریو RCP8.5 روند جزئی افزایشی خواهد داشت. همچنین انتظار می‌رود با افزایش بارش‌های حدی رخدادهای سیلابی در منطقه نیز روندی افزایشی داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: بارش-رواناب، مدل‌های CMIP5، داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS، مدل IHACRES، آق‌قلا.

مقدمه

بارش در چرخه هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد و متغیر ورودی مهم برای مدل‌های گوناگون پیش‌بینی آب و هوایی و بارش-رواناب است (Xu et al., 2005). کمبود ایستگاه‌های هواشناسی با دوره آماری بلندمدت همواره از بزرگ‌ترین مشکلات مدل‌سازی‌ها در ایران است. این مشکل زمانی نمود آشکارتری دارد که منطقه مورد مطالعه کوهستانی و پربارش باشد. در نتیجه اطلاعات بارندگی با کیفیت بالا نقش مهمی در مدل‌سازی‌های بارش-رواناب دارد (Chen et al., 2018). در همین راستا برآورد ماهواره‌ای بارش (SPEs) می‌تواند داده‌هایی با تفکیک زمانی-مکانی بالا و بدون محدودیت در مناطق مختلف جغرافیایی

فراهم و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی را جبران کند (Satgé et al., 2017). در سال‌های اخیر فرآورده‌های (SPE) به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی بارش، خشک‌سالی و شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفتند و دقت آن‌ها مورد تأیید قرار گرفته است. فرآورده‌های SPE گوناگونی در دسترس است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از اندازه‌گیری بارش مناطق گرمسیری (TRMM)، ارزیابی بارش ماهواره‌ای چندگانه (TMPA)، بارش برآورده شده مادون‌قرمز با داده‌های ایستگاهی کارگروه مخاطرات آب‌وهوایی (CHIRPS)، اندازه-گیری بارش جهانی (GPM)، ارزیابی بارش از داده‌های سنجش‌ازدور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (FARSIN) و نسخه PERSIANN-CDR (Sorooshian et al., 2000;)

* نویسنده مسئول: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

1. Satellite-based precipitation estimates (SPEs)
2. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)
3. Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA)
4. Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data (CHIRPS)
5. Global Precipitation Measurement Mission (GPM)
6. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)
7. FARSIN-Climate Data Record (CDR)

است و با ۵ تا ۷ پارامتر می‌توان نتایج آن را واسنجی کرد (Kim *et al.*, 2018). شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط این مدل در مناطق مختلف (تا ۵۰۰۰ کیلومترمربع) و مقیاس زمانی گوناگون قابل انجام است (Sriwongsitanon & Taesombat, 2011). محققان بسیاری مدل IHACRES را برای ارزیابی بارش-رواناب مورد استفاده قرار دادند و کارآمدی آن را برای شبیه‌سازی بارش-رواناب تأیید کردند (Khajeh *et al.*, 2017; Oyerinde *et al.*, 2017).

بلایای ناشی از تغییرات آب و هوایی در صورتی که هشدارهای وضعیت نامناسب آب و هوایی جدی گرفته شود، تا حد زیادی قابل‌پیشگیری است. در همین راستا پژوهش‌های بسیاری به مطالعه اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارش رواناب و سیل پرداختند که به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

Evans & Schreider (2002) تأثیرات هیدرولوژیکی تغییرات آب و هوایی را در حوضه Perth استرالیا با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و با کاربست مدل CMD-IHACRES مورد ارزیابی قراردادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است که رخدادهای ناشی از سیلاب با وجود کاهش فراوان در جریان متناوب به علت اثرات تغییرات آب و هوایی افزایش خواهد یافت. Jones *et al.*, (2006) برآورد حساسیت میانگین رواناب سالانه به تغییرات آب و هوایی را با استفاده از مدل‌های SIMHYD, AWBM و Zhang01 برای ۲۲ حوضه آبخیز در استرالیا بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر ۱ درصد در میانگین بارش سالانه به ترتیب ۲/۲، ۲/۵ و ۲/۱ درصد در جریان سالانه مدل‌های نامبرده تغییر ایجاد خواهد شد. مقایسه و ارزیابی مدل‌های مختلف GCM به‌منظور ارزیابی اثرات تغییرات آب‌وهوا بر رواناب پژوهشی است که Chen *et al.*, (2012) به مطالعه آن پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است که راندمان شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی مدل SDSM بسیار کمتر از مدل SSVM است. Abushandi & Merkel (2013) به مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و IHACRES در حوضه Wadi Dhuliel پرداختند. ضریب نش ساتکلیف (Ef) برای مدل IHACRES، ۰/۵۵ و برای مدل HEC-HMS، ۰/۸۸ به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت بیش‌تر مدل HEC-HMS در مناطق خشک است. Ahooghalandari *et al.* (2015) به ارزیابی دو روش شبکه عصبی مصنوعی و مدل IHACRES برای شبیه‌سازی جریان در حوضه Marillana در غرب استرالیا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برای سیستم‌های هیدرولوژی پیچیده، مدل ANN می‌تواند یک گزینه جایگزین برای مدل‌های هیدرولوژیکی هم‌چون IHACRES باشد. اثرات پوشش

Huffman *et al.*, 2007; Funk *et al.*, 2015; Ashouri *et al.*, 2015; Omranian & Sharif, 2018). فرآیندهای هیدرولوژیکی تغییرات و رفتارهای چرخه‌ای را مقیاس‌های مختلف زمانی از چرخه‌های کوتاه‌مدت (روزانه، رویدادهای حدی و فصلی) تا چند دهه‌ای را نشان می‌دهند (Fowler *et al.*, 2016). رژیم جریان در مدل‌های هیدرولوژیکی به‌عنوان یک پارامتر مهم پایش می‌شود. رژیم جریان را می‌توان به چندساله، متناوب و کوتاه‌مدت تقسیم‌بندی کرد. در سامانه‌های چندساله ارتباط دائمی بین جریان و آب‌های زیرزمینی وجود دارد؛ در عین حال باید توجه داشت که این جریان نمی‌تواند نماینده آب‌های زیرزمینی و بیلان آن باشد (Borzi *et al.*, 2018). جریان‌های کوتاه‌مدت پس از بارندگی تعریف می‌شوند که این نوع از جریان در مسائل مربوط به سیلاب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در کنار مباحث مطروحه، تغییرات آب و هوایی امروزه به یک واقعیت انکارناپذیر تبدیل شده است و ادامه روند پارامترهای آب و هوایی می‌تواند تعدادی از عناصر چرخه هیدرولوژیکی از جمله بارش و تبخیر و تعریق را تحت تأثیر قرار دهد. باید توجه داشت که هرچند اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارش محتمل است اما با قطعیت نمی‌توان در خصوص این پارامتر بحث کرد چرا که تغییرپذیری بالایی دارند (McVicar *et al.*, 2012). در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران و به‌طور خاص‌تر اقلیم خزری ممکن است در آینده بارش کمتر/بیشتری را نسبت به دوره مشاهداتی خود داشته باشند؛ لذا ضروری است تا رفتار بارش-رواناب در بلندمدت مورد ارزیابی قرار گیرد تا بهتر بتوان نسبت به ارائه برنامه‌های تعدیل و سازگاری اقدام کرد.

مدل‌های بارش-رواناب عمدتاً برای درک سامانه‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی رواناب استفاده می‌شوند (Guo *et al.*, 2018). با این وجود عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی این مدل‌ها و ساختار آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج نامطلوب شود (Clark *et al.*, 2008). عدم قطعیت در داده‌های ورودی همچنین می‌تواند نتایج شبیه‌سازی‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Kavetski *et al.*, 2006). رواناب یکی از عوامل اصلی مدیریت منابع آب است. لذا برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بر اساس پیش‌بینی رواناب و برنامه‌های تغییرات آب و هوایی باید به‌درستی و در یک بازه زمانی مشخص انجام شود (Ahmadi *et al.*, 2019). حوضه آبخیز یک سامانه هیدرولوژیکی پویا است که در آن بارندگی طی یک فرآیند پیچیده تبدیل به رواناب می‌شود (Abushandi & Merkel, 2013). از بین مدل‌های موجود برای ارزیابی بارش-رواناب مدل IHACRES یک مدل یکپارچه و مفهومی است که توسط (Croke & Jakeman, 2008) توسعه داده شد. این مدل برای شبیه‌سازی بارش رواناب بسیار کارا

۴/۶ درصد تحت سناریوی B2 کاهش می‌یابد. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوضه مطالعاتی می‌توان به مطالعات (Ashofteh & Massah Bavani (2009), Yaghoobi & Massah Bavani (2016); Panahi *et al.*, 2017; Ahmadi *et al.*, 2019 اشاره کرد.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون در پژوهشی به شکل توأمان از قابلیت‌های SPE و مدل‌های CMIP5 استفاده نشده؛ همچنین بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران با استفاده از یک روش ریزگردانی به مطالعه شرایط آینده بارش-رواناب پرداخته‌اند. لذا در این پژوهش برای نخستین بار از داده‌های بارش برآورده شده مادون‌قرمز با داده‌های ایستگاهی کارگروه مخاطرات آب‌وهوایی (CHIRPS) به همراه مدل‌های CMIP5 مبتنی بر برون‌داد سناریوهای واداشت تابشی (RCP) تحت دو روش ریزگردانی آماری SDSM و MarkSimGCM به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه گرگانرود-منطقه آق‌قلا استفاده شد. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌های مدیریتی مقابله با سیلاب و سیاست‌های تعدیل و سازگاری تغییرات آب‌وهوایی مفید باشد.

روش تحقیق

الف) عرصه پژوهش

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه گرگانرود (منطقه آق-قلا) در استان گلستان است (شکل ۱). مساحت حوضه آبخیز گرگانرود ۱۱۳۸۰ کیلومتر مربع، معادل ۴۸ درصد سطح استان گلستان است. این منطقه از شمال به حوضه آبخیز رودخانه اترک سفلی، از جنوب به حوضه آبخیز اصلی ایران مرکزی در استان سمنان و از غرب به دریای خزر محدود شده است. ۶۷ درصد آب سطحی استان، یعنی ۸۲۸ میلیون مترمکعب در این حوضه جریان دارد.

ب) داده‌های مورد استفاده

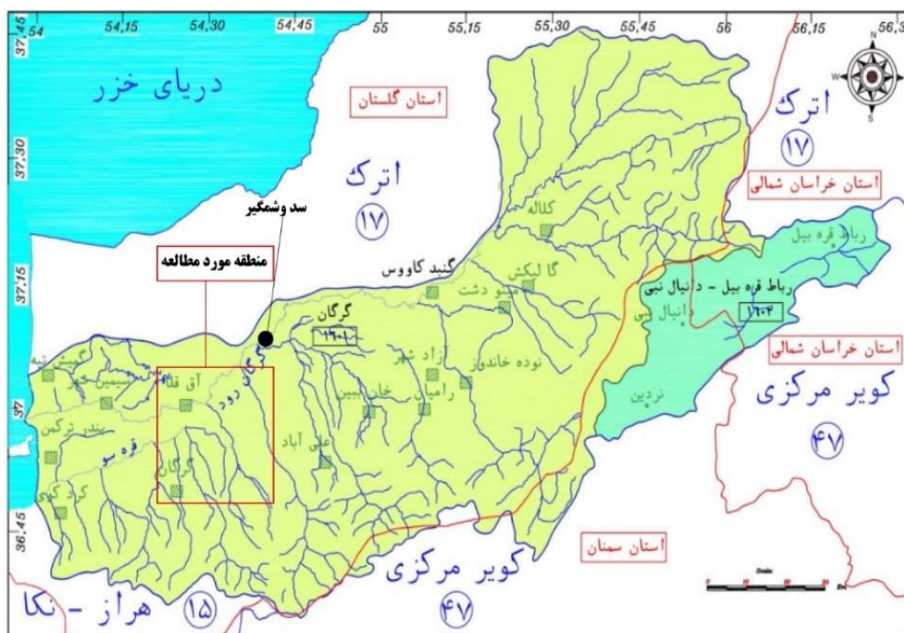
ب-۱) ایستگاه همدید

به‌منظور ارزیابی شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه از داده‌های ایستگاه همدید گرگان استفاده شد. داده‌های این ایستگاه از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ به شکل روزانه از سازمان هواشناسی کشور برای پارامترهای بارش، دمای بیشینه و کمینه، سرعت باد و رطوبت نسبی اخذ گردید.

ب-۲) ایستگاه هیدرومتری

داده‌های دبی روزانه طی یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۶۴ خورشیدی) برای ایستگاه آق‌قلا از وزارت نیرو اخذ گردید.

زمین و تغییرات آب و هوایی در انتقال رواناب سطحی از یک منطقه نیمه‌مرطوب به نیمه‌خشک در شمال غربی چین پژوهشی است که (Yin *et al.*, 2017) به آن پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد تغییرات کاربری اراضی نقش مهمی در چرخه هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه دارد در مقابل تغییرات آب و هوایی در هر دهه مورد بررسی در تحقیق اثرات متفاوتی را نشان داده است که پژوهشگران تحقیق نامبرده دلیل آن را عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌ها عنوان کردند. (Dakhlaoui *et al.* (2017) به ارزیابی توانایی مدل‌های بارش رواناب مفهومی (IHACRES و HBV.GR4j) تحت تغییرات آب و هوایی در شمال تونس پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که سه مدل هیدرولوژیکی تحت تغییرات آب و هوا به طور مشابه رفتار می‌کنند. این مدل‌ها هنگام انتقال به شرایط مرطوب و سردتر از حالت خشک و گرم، الگوی رواناب را بهتر شبیه‌سازی می‌کنند. در ایران نیز پژوهش‌های بسیاری اثرات تغییرات آب و هوایی را بر بارش رواناب مطالعه کردند. (Nazaripouya *et al.*, 2016) برای ارزیابی تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر پارامترهای هیدرو اقلیمی در حوضه سد اکباتان مدل‌های HadCM3، MPEH5 و IPCM4 را تحت دو سناریوی A2 و B1 برای دوره ۲۰۴۵-۲۰۶۵ با استفاده از مدل LARS-WG مورد بررسی قرار دادند. در نهایت برای شبیه‌سازی رواناب از مدل IHACRES استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های آب و هوایی تحت دو سناریوی A2 و B1 مقدار دمای حوضه افزایش و بارندگی کاهش می‌یابد و این تغییرات تأثیرات منفی زیادی بر رواناب حوضه خواهد داشت. مدل‌سازی جریان خروجی زیرحوضه‌های کارون بزرگ در شرایط آب و هوایی آینده پژوهشی است که توسط (kayhanpanah *et al.* (2017) انجام شد. در این پژوهش دما و بارش برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ و ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ تحت دو سناریوی A2 و B1 ریزمقیاس‌سازی شدند و سپس رواناب تحت مدل IHACRES شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی رواناب نشان داد در حوضه‌های مطالعه شده میزان رواناب دوره‌های آبی تحت هر دو سناریو، در فصل‌های بهار و تابستان، کاهش و در پاییز و زمستان، افزایش خواهد یافت. (Mirdashtovan *et al.*, 2018) برای شبیه‌سازی جریان سطحی در حوضه دریاچه ارومیه از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 با استفاده از روش SDSM برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ با کاربست مدل هیدرولوژیکی IHACRES به این نتیجه رسیدند که جریان سطحی در دوره آبی به میزان ۲۴/۶ درصد تحت سناریوی A2 افزایش و به میزان



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (Khazaei Moughani et al., 2013)

در ادامه شرح مختصری از آن‌ها ارائه خواهد شد.

ج- روش‌های پردازش داده

ج-۱) مدل IHACRES

مدل IHACRES، یک مدل عددی مبتنی بر هیدروگراف و مؤلفه‌های جریان ناشی از بارش، تبخیر و تعرق و جریان دبی (جریان رودخانه‌ای) است. هدف اصلی IHACRES توصیف رفتار هیدرولوژیک حوضه با استفاده از کمترین پارامتر ممکن است، و IHACRES برای اجرا به مجموعه‌ای سه‌گانه از داده‌ها (بارش، دما و دبی) در هر واحد زمانی لازم دارد. همانطور که گفته شد IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب است (Croke & Jakeman, 2008) این مدل دارای دو قسمت است ۱- تابع تبدیل غیرخطی برای محاسبه بارندگی مؤثر و ۲- تابع خطی برای تبدیل باران مؤثر به جریان رواناب (Croke & Jakeman, 2004). بخش اول، بارش دریافتی محل را به بارش مؤثر و بارش مازاد که سرانجام با تبخیر و تعرق از بین می‌رود (با فرض غیرقابل نفوذ بودن حوضه آبخیز) تقسیم می‌کند؛ و بخش دیگر بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده تبدیل می‌کند (Croke & Jakeman, 2008). IHACRES دارای شش پارامتر است، که سه پارامتر آن (C و τ_w و f) مربوط به بخش تلفات غیرخطی و سه پارامتر (τ_s و τ_q و V_s) مربوط به بخش تابع تبدیل خطی است (Croke & Jakeman, 2004).

ب-۳) داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا CHIRPS

از آنجایی که حوضه گرگانرود یک حوضه کوهستانی و پربارش محسوب می‌شود. به منظور تحلیل فضایی میانگین بارش روزانه از داده‌های بارش رقومی ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا CHIRPS استفاده شد. روش ترکیبی CHIRPS یک الگوریتم وزنی معکوس و دارای چندین ویژگی منحصر به فرد است. نخست آن که برای تعریف فاصله از وابستگی محلی استفاده می‌شود، این فاصله جایی است که همبستگی نقطه به نقطه برآورد شده صفر است. داده‌های CHIRPS از مقیاس زمانی ۶ ساعته تا ۳ ماهه با تفکیک مکانی 0.05×0.05 درجه قوسی در دسترس است (Funk et al., 2015). داده‌های این پایگاه از سال ۱۹۸۱ میلادی در دسترس است اما در این پژوهش به منظور همگام کردن داده‌های ایستگاهی، سال شروع برداشت داده ۱۹۸۶ در نظر گرفته شد و در نهایت با دوره آماری ایستگاه همدید گرگان منطبق گردید.

ب-۴) داده‌های شبیه‌سازی شده تحت شرایط تغییرات آب و هوایی

شرایط آینده آب و هوایی بارش و دما برای ایستگاه گرگان تا ۲۰۵۰ میلادی با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی (RCP) (RCP2.6; RCP4.5; RCP8.5) چهار مدل منتخب CanESM2، MRI-CGCM3 و HadGEM2، GFDL-CM3 تحت دو روش ریزگردانی آماری SDSM و MarkSimGCM استفاده شدند که

ج-۲) مدل ریزگردانی آماری SDSM

در این روابط X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در جامعه آماری n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

ج-۴) روند و شیب روند داده‌های آب و هوایی و رواناب

روش‌های پارامتری و ناپارامتری برای شناسایی روند در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما روش‌های ناپارامتری به دلیل توانایشان در پایش داده‌های پرت از یک سو و همچنین ضرورت نداشتن نرمال بودن داده‌ها بیش‌تر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Duhan & Pandey, 2013). به‌منظور ارزیابی روند داده‌های آب و هوایی و رواناب از آزمون ناپارامتریک Mann-Kendall استفاده شد. این روش نیز همانند آزمون شیب خط Sen's در مباحث علوم محیطی به‌طور گسترده‌ای کاربرد دارد. جهت برآورد شیب روند در سری زمانی داده‌ها از روش Sen's Slope استفاده شد. روش حاضر همانند بسیاری از روش‌های ناپارامتریک همچون Mann-Kendall بر ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (Li et al., 2014).

نتایج و بحث

مشخصات آماری، روند و شیب روند ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا جدول (۱) اطلاعات آماری دبی ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا را طی دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۶۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول پیداست فصول تابستان و پاییز کمترین مقدار میانگین دبی را در آق‌قلا دارند. بیشینه میانگین دبی در آق‌قلا در فصل بهار ماه‌های فروردین و اردیبهشت است. بیشینه آماری دبی نیز در اردیبهشت با ۱۲۱/۸ و فروردین ۱۱۸ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است. به‌منظور محاسبه روند از آزمون ناپارامتریک من-کندال استفاده شد. آماره Z این آزمون نشان دهنده روند (افزایشی در حالت مثبت و کاهش‌ی در حالت منفی) است. اگر مقدار Z بین ۰ تا $\pm 1/96$ قرار گیرد آزمون در سطح ۹۵ و اگر بیش‌تر از $\pm 1/96$ در سطح ۹۹ معنی‌دار است. روند دبی در تمامی ماه‌های مورد مطالعه منفی است که از این بین تنها ۵ ماه از سال روند معنی‌داری را نشان داده‌اند. آبان در سطح ۰/۰۵ و آذر، دی، بهمن و فروردین در سطح ۰/۰۱ روند کاهش‌ی معنی‌داری را نشان داده‌اند. بیشینه شدت روند کاهش‌ی نیز در بهمن با نمره Z آزمون من-کندال ۳/۵۰ محاسبه گردید. فروردین نیز با مقدار شیب روند

مدل آماری SDSM ارتباطات آماری بین رفتارهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی شونده‌ها) را بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. این ارتباطات با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه و بروندادهای مدل‌های گردش عمومی در دوره مشابه دیدبانی ایجاد می‌شوند. فرض بر این است که این روابط در آینده نیز صادق باشند، به‌عبارت دیگر فرض اساسی در ریزگردانی آماری مستقل از زمان بودن این ارتباطات است. قبل از انجام فرآیند ریزگردانی توسط این مدل داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌های گردش عمومی با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار آن‌ها در دوره مورد نظر به‌ننجار می‌شوند (Wilby et al., 2002).

ج-۲) مدل ریزگردانی آماری MarcSimGCM

مدل MarcSimGCM یک ابزار شبیه‌ساز آب‌وهوایی هست. این مدل دمای کمینه و بیشینه، بارش و تابش روزانه برای دوره آینده تا ۲۰۹۵ را شبیه‌سازی می‌نماید. این روش ریزگردانی ۱۷ مدل جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCM) از سری مدل‌های CMIP5 را برای شبیه‌سازی داده‌های آینده استفاده می‌نماید (Ouma et al., 2016). الگوریتم پایه مدل یک شبیه‌سازی روزانه است که از فرآیند سوم زنجیره مارکوف در قالب رویکرد تصادفی برای پیش‌بینی داده‌های دما، بارش و تابش استفاده می‌شود. مدل MarcSimGCM از مجموعه داده‌های WorldClim برای آینده بر اساس داده‌های پایه که برای دوره ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ کل کره زمین جمع‌آوری شده‌اند استفاده می‌کند (Funes et al., 2016).

ج-۳) صحت سنجی داده‌های مدل‌سازی شده و ماهواره‌ای

ارزیابی داده‌های مدل‌سازی شده و ماهواره‌ای با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) که معادلات آن به‌ترتیب در روابط (۱) تا (۳) مشخص شده‌اند، انجام شد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Y_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

(MBE) نشان داده‌اند. مدل‌های منتخب برای بارش نیز الگویی مشابه با دما را ارائه داده‌اند. در تمامی مدل‌ها مقدار RMSE بیش-تر از ۲۰ میلی‌متر به دست آمده است که با توجه پربارش بودن منطقه این مقدار می‌تواند مناسب باشد چراکه کمیت‌های آماری همچون RMSE از حجم جامعه آماری متأثر می‌شوند و طبیعتاً با افزایش مقدار بارش مقدار RMSE نیز افزایشی خواهد بود. مدل CanESM2 برای بارش همانند دمای کمینه و بیشینه بهترین مدل برای حوضه گرگان رود-ایستگاه گرگان شناسایی شد. بطوریکه ضریب تعیین آن برای سناریو RCP2.6، ۰/۴۷۹، سناریو RCP4.5، ۰/۵۴۱ و سناریو RCP8.5، ۰/۷۷۰ محاسبه گردید. بر اساس نتایج ارائه شده مدل CanESM2 ریزگردانی شده با استفاده از مدل SDSM مدل بهینه از بین مجموعه مدل‌های منتخب شناسایی شد و برای شبیه‌سازی رواناب در آینده از خروجی‌های این مدل استفاده شد.

به منظور صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای بارش برآورده شده مادون قرمز با داده‌های ایستگاهی کارگروه مخاطرات آب-وهوایی (CHIRPS) از روش‌های RMSE، MBE و R^2 استفاده شد. نتایج نشان داده است داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS با ضریب تعیین ۰/۸۱ و مقدار RMSE، ۲۱/۶۳ و میانگین اریب خطا (MBE) ۱۵/۱۶- از عملکرد مناسبی برخوردار می‌باشند. همان‌طور که پیش‌تر در خصوص مقدار RMSE بالا برای بارش مدل‌سازی شده بحث شد این امر برای داده‌های ماهواره‌ای نیز صادق است نکته دیگری که باید برای داده‌های ماهواره‌ای به آن توجه داشت فاصله ایستگاه تا نزدیک‌ترین یاخته است (ایستگاه گرگان تا نزدیک‌ترین یاخته ۱۰/۰۵ کیلومتر فاصله دارد) و طبیعتاً این اختلاف با توجه به پربارش بودن منطقه می‌تواند یک عامل مهم برای افزایش خطا باشد.

۱/۱۴- بیشینه مقدار کاهشی شیب روند دبی ماهانه را به خود اختصاص داده است.

کارایی مدل‌های منتخب CMIP5 تحت روش‌های ریزگردانی آماری SDSM و MarkSimGCM

نتایج صحت‌سنجی داده‌های مدل‌سازی شده بر اساس سه روش RMSE، MBE و R^2 نشان داد که مدل CanESM2 ریزگردانی شده با استفاده SDSM از توانایی مناسب‌تری نسبت به مدل‌های GFDL-CM3، HadGEM2 و MRI-CGCM3 که با استفاده از روش MarkSimGCM ریزگردانی شدند برخوردار است. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شد در تمامی سناریوهای مورد مطالعه پارامترهای دمای کمینه و بیشینه دو مدل HadGEM2-ES و GFDL-CM3 کارایی چندانی ندارند. به‌طوریکه در تمامی سناریوها مقدار RMSE بیش‌تر از ۲ درجه سلیسوس می‌باشد. مدل MRI-CGCM3 نزدیک‌ترین نتایج را به مدل CanESM2 نشان داده است بطوریکه مقدار RMSE این مدل نسبت به دو مدل پیشین که با روش MarkSimGCM ریزگردانی شدند اختلاف یک درجه‌ای را نشان داده است. ضریب تعیین برای دمای کمینه و بیشینه مدل CanESM2 مقدار ۰/۹۹ را نشان داده است این در حالی است که مدل‌های ریزگردانی شده با روش MarkSimGCM برای دمای کمینه مقدار ۰/۹۷ و برای دمای بیشینه مقدار ۰/۹۸ را نشان داده‌اند. میانگین اریب خطا (MBE) مدل برای کمیت‌های دمایی رفتاری مشابه با RMSE را نشان داده است. دمای کمینه مدل‌سازی شده تحت مدل CanESM2 مقدار اریبی ۰/۵ درجه سلیسوسی را برای تمامی سناریوها نشان داده است این در حالی است که سایر مدل‌های بیش از یک درجه اختلاف را برای مقدار میانگین اریب خطا

جدول ۱. اطلاعات آماری و مشخصات روند و شیب روند ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا (۱۳۹۳-۱۳۶۴) (متر مکعب بر ثانیه)

ماه	فراسنج	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
	میانگین	۶/۸	۸/۴	۱۰/۵	۱۱/۲	۱۵	۱۸/۹	۲۸/۱	۱۹/۵	۷	۱/۵	۱/۷	۴/۱
	کمینه	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۰	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۵	۰	۰	۰/۰۱
	بیشینه	۲۵	۲۹	۲۹/۸	۴۶	۵۷/۹	۷۹/۲	۱۱۸	۱۲۱/۸	۵۵/۵	۶/۳	۱۱/۵	۳۷/۲
	نمره Z	-۱/۵	-۲/۳	-۳/۰	-۳/۵	-۲/۹	-۱/۸	-۲/۹۹	-۱/۶۵	-۱/۷	-۱/۴	-۱/۲	-۱
	آماره Q	-۰/۱	-۰/۲	-۰/۴	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۳	-۱/۱۴	-۰/۲۵	-۰/۱	-۰/۰۳	-۰/۰	-۰/۰۲

سلول‌های پررنگ در سطح ۰/۰۵ معنی دار هستند.

جدول ۲. کارایی مدل‌های منتخب CMIP5 تحت روش‌های ریزگردانی SDSM و MarkSimGCM

سناریو	مدل منتخب	دمای کمینه			دمای بیشینه			بارش		
		R2	MBE	RMSE	R2	MBE	RMSE	R2	MBE	RMSE
6.RCP2	GFDL-CM3	۰/۹۷	-۱/۸۱	۲/۳۴	۰/۹۸	-۳/۲۹	۳/۵۸	۰/۱۲۶	-۲/۸۹	۲۹/۲۵
	HadGEM2-ES	۰/۹۷	-۲/۰۵	۲/۴۶	۰/۹۵	-۲/۸۶	۳/۱۰	۰/۰۰۲	۶/۲۳	۲۵/۳۲
	MRI-CGCM3	۰/۹۷	-۰/۷۶	۱/۵۶	۰/۹۸	-۱/۴۴	۱/۸۵	۰/۱۷	۱/۰۳	۲۳/۴۸
	CanESM2	۰/۹۹	-۰/۵۰	۱/۲۱	۰/۹۹	-۱/۳۱	۱/۴۷	۰/۴۷	۹-۲۴/۵	۲۷/۰۳
5.RCP4	GFDL-CM3	۰/۹۸	-۱/۷۴	۲/۳۱	۰/۹۸	-۳/۲۱	۳/۵۷	۰/۰۹	۶/۱۰	۲۴/۳۴
	HadGEM2-ES	۰/۹۷	-۱/۹۶	۲/۳۶	۰/۹۸	-۲/۸۵	۳/۰۷	۰/۰۸	۲/۹۸	۲۵/۶۹
	MRI-CGCM3	۰/۹۷	-۱/۱۹	۱/۷۶	۰/۹۸	-۱/۷۷	۲/۰۲	۰/۱۸	-۲/۱۰	۲۸/۳۳
	CanESM2	۰/۹۹	-۰/۵۲	۱/۲۵	۰/۹۹	-۱/۳۸	۱/۶۲	۰/۵۴	-۲۱/۶۳	۲۴/۰۶
5.RCP8	GFDL-CM3	۰/۹۸	-۲/۱۱	۲/۴۸	۰/۹۹	-۳/۶۰	۳/۸۴	۰/۰۴	۳/۴۴	۲۵/۷۲
	HadGEM2-ES	۰/۹۷	-۲/۲۶	۲/۶۸	۰/۹۸	-۳/۱۲	۳/۳۷	۰/۰۱	۷/۹۲	۲۴/۵۲
	MRI-CGCM3	۰/۹۷	-۱/۴۲	۱/۹۶	۰/۹۸	-۲/۱۶	۲/۴۵	۰/۱۹	-۴/۵۴	۲۹/۷۸
	CanESM2	۰/۹۹	-۰/۴۹	۱/۱۶	۰/۹۹	-۱/۴۳	۱/۶۷	۰/۷۷	-۱۹/۴۱	۲۰/۹۰

شبیه‌سازی بارش-رواناب

برای اجرای مدل IHACRES از داده‌های فیزیوگرافی حوضه، آب و هواشناسی و هیدرولوژی طی دو دوره واسنجی (۲۰۰۳-۱۹۸۶) و صحت‌سنجی (۲۰۰۹-۲۰۰۳) استفاده شد و پارامترهای به‌دست آمده از فرآیند واسنجی مؤلفه‌های خطی و غیرخطی در جدول (۳) ارائه شد. مقایسه گرافیکی (شکل ۲) از نمودارهای به‌دست‌آمده این امکان را فراهم کرده است تا اطلاعات کلی را از دقت مدل‌سازی انجام‌شده به دست آوریم. بر اساس اطلاعات ارائه‌شده مدل از کارایی مناسبی برخوردار است. همان‌طور که در شکل (۲) برای مقادیر جریان روزانه شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده نیز مشخص است مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان داشته است. این تطابق برای دبی‌های کم جریان بیشتر است. علت این امر می‌تواند ناشی از چندین عامل تغییرات زیاد کاربری اراضی، خشکی حوضه در مقاطع مختلف، وقوع بارش‌های فرین (شدت بسیار در یک زمان محدود) باشد. این نتیجه پیش‌تر توسط Dye & Croke, (2003) در چندین حوضه در آفریقای جنوبی نیز مورد تأیید قرار گرفته است. این موارد نشان از توانایی کمتر مدل در شبیه‌سازی دبی‌های سریع و سیلابی است. عامل مهم دیگری که در آق‌قلا و جریان رواناب در آن می‌تواند نقش داشته باشد سد و شمشگیر است. همان‌طور که Kheirfam *et al.*, (2013) به توضیح آن پرداختند این سد نقش کنترلی را در تعدیل دبی‌های بسیار بالا دارد و در نتیجه تعادل جریان در این منطقه را توسط یک عامل انسانی باید مورد تأیید قرارداد. با توجه به این‌که پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری در ایران به‌خصوص در حوضه‌های کوهستانی چندان مناسب نمی‌باشد. در صورت عدم وجود ایستگاه می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای همان‌طور که در این تحقیق برای

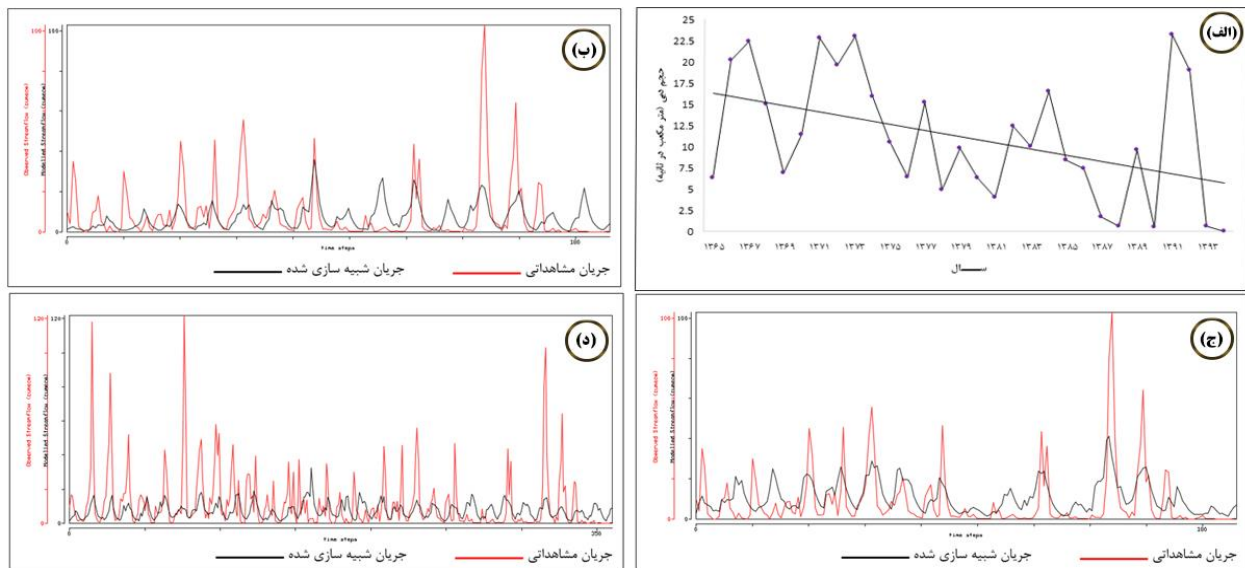
منطقه آق‌قلا آمده است، استفاده کرد. به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای آن هم در مناطق پربارش کوهستانی در صورت وجود ایستگاه اندازه‌گیری زمینی (همانند این تحقیق) به عنوان داده تکمیلی می‌تواند مفید باشد. علت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در این تحقیق از یک سو جهت افزایش دقت در برآورد رواناب و از سوی دیگر ارائه یک داده جایگزین برای مناطقی بدون ایستگاه هواشناسی است.

مؤلفه‌های خروجی مدل IHACRES مبتنی بر داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده

پارامتر c نشان‌دهنده ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه آبخیز را برحسب میلی‌متر نشان می‌دهد و در حقیقت نشان می‌دهد که حوضه آبخیز نسبت به بارش چه واکنشی نشان می‌دهد. طبیعتاً مقدار پایین این پارامتر نشانگر واکنش آهسته حوضه نسبت به بارش است و مقدار بیشینه آن نیز برعکس حالت پیشین است. همان‌طور که در جدول (۳) نیز آمده است این مقدار پایین است و از آنجایی که منطقه مورد مطالعه پوشش قابل توجهی دارد و جریان پایه آن نیز قابل توجه است، چندان دور از انتظار نیز نبوده است. در آینده نیز با توجه به تغییرات الگوهای بارش و دما مقدار این پارامتر بر اساس سناریوهای RCP کاهش خواهد داشت که می‌توان اذعان داشت نگهداشت بارش در آینده نسبت به شرایط مشاهداتی کاهش خواهد بود. ثابت زمانی کاهش جریان (T(s)) نشان‌دهنده کاهش پاسخ جریان سریع است مقدار بیشتر این پارامتر نشان‌دهنده پاسخ دیرتر حوضه به جریان است و در مقابل جریان سریع حوضه دیرتر کاهش می‌یابد. بر اساس مدل‌سازی-های انجام‌شده تحت سناریو RCP2.6 این مقدار نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد داشت اما در دو سناریو RCP4.5 و

از سوی دیگر است. شاخص حداکثر پاسخ جریان ($\beta(s)$) یکی از شاخص‌های مهم خروجی مدل است که نسبت حداکثری رواناب را در یک بستر مورد ارزیابی قرار می‌دهد مقدار عددی این شاخص هر چه بیشتر باشد نشان‌دهنده رفتار مدل به نسبت داده‌های هواشناسی به خصوص بارش است. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شد، حداکثر پاسخ جریان در دوره مشاهداتی ۰/۳۲۴ است و در آینده و بر اساس سناریو RCP8.5 مقدار این شاخص به ۰/۵۳۷ می‌رسد که بر این اساس حداکثر پاسخ جریان در آینده مبتنی بر سناریو بدبینانه RCP8.5 افزایش قابل توجه خواهد داشت که باید شاهد رویدادهای سیلابی بیشتری به دلیل برهم خوردن نظم زمانی-مکانی بارش و افزایش رویدادهای رگباری بود.

RCP8.5 به دلیل کاهش بارش و افزایش دما بر اساس این دو سناریو حد واسط و بدبینانه مقدار شاخص کاهش خواهد بود. ثابت زمانی خشکی آبریز (tw) نیز تحت شرایط تغییرات آب و هوایی در حوضه افزایشی خواهد بود؛ به‌طوریکه بر اساس سناریو RCP4.5 شاخص ۰/۵ و بر اساس سناریو RCP8.5 شاخص ۱/۵ واحد افزایش خواهد داشت که به‌خوبی نشان‌دهنده خشک‌تر شدن حوضه تحت مدل منتخب (CanESM2) در دوره مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۵۰) است. میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE) در دوره مشاهداتی بر اساس داده‌های ایستگاهی ۰/۹۴۵ و بر اساس داده‌های ماهواره‌ای ۰/۹۵۲ محاسبه گردید این مقدار تحت شرایط مدل‌سازی شده آینده افزایشی است که نشان‌دهنده عدم قطعیت در داده‌های مدل‌سازی از یک‌سو و رفتار حدی بارش



شکل ۲. سری زمانی دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا (۱۳۹۴-۱۳۶۳): (ب) شبیه‌سازی جریان ماهانه ایستگاه آق‌قلا مبتنی بر برون‌داد مدل IHACRES بر اساس داده ایستگاهی (۲۰۱۵-۱۹۸۶): (ج) شبیه‌سازی جریان ماهانه ایستگاه آق‌قلا مبتنی بر برون‌داد مدل IHACRES بر اساس داده ماهواره‌ای CHIRPS (۲۰۱۵-۱۹۸۶): (د) شبیه‌سازی جریان ماهانه ایستگاه آق‌قلا مبتنی بر برون‌داد مدل IHACRES بر اساس داده‌های مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP (دوره مرجع مدل‌سازی شده ۲۰۱۵-۱۹۸۶)

جدول ۳. خروجی‌های خطی و غیرخطی مدل IHACRES طی دوره مشاهداتی و مدل‌سازی شده

مدل CanESM2 / دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰			دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۵		شاخص
RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	ماهواره‌ای	ایستگاهی	
۰/۰۰۱۹۳۷	۰/۰۰۱۷۳۴	۰/۰۰۲۱۰۲	۰/۰۰۴۴۳۷	۰/۰۰۴۸۳۶	ضریب تعادل حجم بارش (c)
۵/۵	۴/۵	۳	۴/۱	۴	ثابت زمانی خشکی آبریز (tw)
۳/۹	۳/۲	۲/۶	۴	۴	تابع تعدیل دما (f)
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	دمای مرجع ($Tref$)
۰	۰	۰	۰	۰	آستانه شاخص رطوبت خاک (1)
۱	۱	۱	۱	۱	فاکتور واکنش غیرخطی (p)
۱/۲۹۸	۱/۷۵۷	۳/۲۲۷	۲/۵۱	۲/۵۵۸	ثابت زمانی کاهش جریان (T(s))
۰/۵۳۷	۰/۴۳۴	۰/۲۶۷	۰/۳۳۵	۰/۳۲۴	حداکثر پاسخ جریان ($\beta(s)$)
۱	۱	۱	۱	۱	نسبت حجم (حجم جریان مؤثر) ($V(s)$)
۱/۵۷۱۰۱	۱/۷۵۹۳۵۵	۱/۱۵۱۳۷۵	۰/۹۵۲۲۱۲	۰/۹۴۵۳۹۲	میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE)

نتایج آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و Sen's برای رواناب برآورد شده طی دوره آماری ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 کاهش مقدار رواناب را نشان می‌دهد. اما بر اساس سناریو بدبینانه RCP8.5 مقدار رواناب افزایشی خواهد بود؛ اما این مقدار افزایشی همانند روند کاهش معنی‌دار نخواهد بود. هم‌چنین ارزیابی سری زمانی رواناب برای آق‌قلا نشان داد امکان رخداد سیلابی هم‌چون فروردین ۱۳۹۸ وجود دارد؛ چرا که با تشدید پدیده گرمایش جهانی بارش‌های حدی و ۲۴ ساعته افزایش خواهند یافت. مقایسه روند داده‌های بارش با داده‌های دبی نشان داد این دو پارامتر دارای روند همسو می‌باشند. به‌طوری که با افزایش روند بارش به‌خصوص برای بارش‌های رگباری بر روند رواناب در منطقه مورد مطالعه افزوده شد. تغییرات روند رواناب طی دوره مدل‌سازی شده، نشان‌دهنده بارش‌های رگباری با شدت بالا، تداوم نسبتاً طولانی و تکرار آن‌ها در سطوح وسیع است. نتیجه به‌دست آمده با پژوهش Farzin and Alizadeh sanami, (2017) که تغییرات رژیم هیدروژیکی رودخانه گرگان‌رود در ایستگاه تمر مورد مطالعه قرار دادند هم‌خوانی دارد.

از آنجایی که بارش نقش چشمگیری را در تولید رواناب دارد در ادامه به‌منظور کاهش حجم جداول تنها اطلاعات مربوط به روند بارش برای دوره مشاهداتی و مدل‌سازی شده ارائه گردید. روند افزایشی بارش در دوره آینده در فصول تابستان و پاییز بهبود شرایط آبی را نشان نمی‌دهد، بلکه افزایش بارش در دوره گرم سال به‌علت همراهی با افزایش دما در درجه نخست موجب افزایش تبخیر و تعرق و تلفات آب خواهد شد. هم‌چنین از آنجایی که رخداد بارش‌های حدی افزایشی خواهد بود بیش‌تر این بارش تبدیل به سیلاب شده و مشکلات بسیاری را به همراه خواهد داشت. (Fallah-Ghalhari et al., 2019) با استفاده از چندین مدل آماری و دینامیکی دمای کمینه و بیشینه ایران را تا سال ۲۱۰۰ مطالعه و ناهنجاری سراسر افزایشی دما را برای کل کشور پیش‌بینی کردند. آنها هم‌چنین ابراز داشته‌اند که این ناهنجاری برای مناطق کوهستانی عرض‌های جغرافیایی بالاتر بزرگ‌تر خواهد بود. افزایش دما به‌ویژه دمای کمینه از مقدار بارش‌های جامد می‌کاهد و موجب تشدید ذوب برف و یخ در مناطق مرتفع کوهستانی خواهد شد. هم‌چنین رخداد بارش‌های همرفتی توانایی بالقوه رخداد سیلاب را افزایش خواهد داد.

جدول ۴. نتایج آزمون ناپارامتریک من-کندال ایستگاه گرگان طی دوره مشاهداتی و مدل‌سازی شده

پارامتر	دوره/سناریو	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
رنگ	مشاهداتی	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۸	-۱/۶	-۱/۳	۰/۳	-۱/۳	-۰/۶	-۱/۲	-۰/۲	-۰/۱	-۰/۳
	RCP2.6	۱/۱۲	-۱/۷	-۱/۷	-۱/۹	-۲/۷	-۰/۹	-۰/۴	۲/۰۴	۱/۰۵	۱/۲	-۰/۴	۰/۳
	RCP4.5	۰/۸	-۱/۷	-۱/۳	-۲/۰	-۰/۸	-۰/۷	۱/۱	۰/۹	۰/۸	۰/۴	۱/۹	۱/۱
	RCP8.5	-۱/۳	-۰/۷	-۱/۱	-۱/۶	-۱/۵	-۲/۲	-۰/۵	۱/۱	۱/۴	۱/۰۹	۱/۱	۱/۷

سلول‌های پر رنگ در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار هستند.

جدول ۵. روند و شیب روند رواناب برآورد شده توسط مدل IHACRES با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و Sen's طی دوره آماری ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰

مبتنی بر سناریوهای RCP

آماره	6.RCP2	5.RCP4	5.RCP8
آزمون Q	-۱/۹۱	-۱/۳۱	۰/۲۴
آماو Z	-۱/۰۷	-۰/۸۶	۰/۰۴

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد ایستگاه آق‌قلا دارای دبی بیشینه بهاره است؛ به‌طوری‌که ماه‌های فروردین و اردیبهشت با ۱۱۸ و ۱۲۱ مترمکعب بر ثانیه بیشینه دبی ماهانه را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج روند دبی نشان داد در تمامی ماه‌های مورد مطالعه دبی در آق‌قلا کاهش یافته است بیشینه روند کاهش دبی در دوره سرد سال اتفاق افتاده است. مدل IHACRES از توانایی بالایی در شبیه‌سازی بارش رواناب در آق‌قلا داشته است. البته مدل در شبیه‌سازی دبی‌های بیشینه عملکرد قابل قبولی نشان نداده است که می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری اراضی، خشکی حوضه و هم‌چنین نقش سد و شمشیر به‌عنوان عامل کنترلی دبی‌های بیشینه باشد. داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS عملکرد قابل قبولی را در شبیه‌سازی بارش-رواناب داشته‌اند؛ به‌طوری که اختلاف میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE) مدل IHACRES

نتایج پژوهش نشان داد ایستگاه آق‌قلا دارای دبی بیشینه بهاره است؛ به‌طوری‌که ماه‌های فروردین و اردیبهشت با ۱۱۸ و ۱۲۱ مترمکعب بر ثانیه بیشینه دبی ماهانه را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج روند دبی نشان داد در تمامی ماه‌های مورد مطالعه دبی در آق‌قلا کاهش یافته است بیشینه روند کاهش دبی در دوره سرد سال اتفاق افتاده است. مدل IHACRES از توانایی بالایی در شبیه‌سازی بارش رواناب در آق‌قلا داشته است. البته مدل در شبیه‌سازی دبی‌های بیشینه عملکرد قابل قبولی نشان نداده است که می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری اراضی، خشکی حوضه و هم‌چنین نقش سد و شمشیر به‌عنوان عامل کنترلی دبی‌های بیشینه باشد. داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS عملکرد قابل قبولی را در شبیه‌سازی بارش-رواناب داشته‌اند؛ به‌طوری که اختلاف میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE) مدل IHACRES

گونگون GCM و گزینش بهترین مدل در درجه نخست و اصلاح اربیی این مدل‌ها در درجات بعدی است که این رویکرد نیز مشکلاتی به همراه خواهد داشت (Knutti *et al.*, 2010). همانند بیشتر مطالعات انجام‌شده که اثرات تغییرات آب و هوایی را بر بارش-رواناب مطالعه کردند، این پژوهش نیز تنها حساسیت تغییرات آب و هوایی به‌عنوان ورودی (پارامترهای بارش و دمای روزانه) را بر رواناب حوضه گرگانرود-منطقه آق‌قلا در نظر گرفته است. تفاوت در نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی ممکن است اختلاف بیشتری با مدل‌سازی آب و هوایی تحت GCM‌های ریزگردانی شده با مدل‌های آماری داشته باشد. همچنین تغییرات بالقوه در روابط آب و هوا-رواناب و بازخورد زمین-پوشش گیاهی-جو تحت شرایط گم‌تر و با مقادیر گونگون CO₂ نیز می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. با این وجود عدم اطمینان ذات هر مدل است و مطالعات بلندمدت از شرایط آب و هوایی به‌ویژه پارامترهای پیچیده همچون بارش-رواناب مبتنی بر GCMs بیش از آنکه نگاهی پیش‌بینی (Forecasting) داشته باشند، صرفاً چشم‌اندازها (Outlook) را مطالعه می‌کنند.

REFERENCES

Abushandi, E., & Merkel, B. (2013). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resources Management*, 27(7), 2391-2409.

Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyani, G. R. (2019). Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*.

Ahooghalandari, M., Khiadani, M., & Kothapalli, G. (2015). Assessment of Artificial Neural Networks and IHACRES models for simulating streamflow in Marillana catchment in the Pilbara, Western Australia. *Australasian Journal of Water Resources*, 19(2), 116-126.

Ashofteh, P. & Massah Bavani, A. (2009). Uncertainty of Climate Change Impact on the Flood Regime Case Study: Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan, Iran. *Iran Water Resources Research*, 5(2), 27-39. [In Farsi].

Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D. & Prat, O.P. (2015). *FARSIN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies*. Bulletin of the American Meteorological Society. 96(1), 69-83.

Borzi, I., Bonaccorso, B., & Fiori, A. (2018). A Modified IHACRES Rainfall-Runoff Model for Predicting Hydrologic Response of a River Basin System with a Relevant Groundwater Component. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 7, No. 1, p. 24).

برای داده ایستگاهی و ماهواره‌ای ۰/۰۰۶۸۲ محاسبه شد. بر این اساس در صورت فقدان داده‌های ایستگاهی مناسب می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS استفاده کرد که از عملکرد مناسبی نیز برخوردار است. مدل‌سازی شرایط آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) با استفاده از مدل CanESM2 نشان از کاهش رواناب تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 و افزایش آن بر اساس سناریو RCP8.5 است. این مقدار افزایشی و کاهشی از نظر آماری معنی‌دار نیست.

فرض اصلی رویکرد مدل‌سازی رواناب با استفاده از داده‌های GCMs، پایداری فرایندهای هیدرولوژیکی در شرایط تغییر آب‌وهوا است (Vaze *et al.*, 2010) و در این رویکرد مطالعاتی قطعاً عدم قطعیت نیز افزایش خواهد یافت. لذا تحقیقات بیشتری با استفاده از مدل‌های مختلف به دلیل ناپایداری احتمال رخدادهای بارشی به‌ویژه در مناطق پربارش و کوهستانی نیاز است. همچنین باید توجه داشت که عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی GCMs بسیار بیشتر از مدل‌های هیدرولوژیکی است (Teng *et al.*, 2012). راهکار برون‌رفت از این مشکل کاربست مدل‌های

Chen, C., Chen, Q., Duan, Z., Zhang, J., Mo, K., Li, Z., & Tang, G. (2018). Multiscale comparative evaluation of the GPM IMERG v5 and TRMM 3B42 v7 precipitation products from 2015 to 2017 over a climate transition area of China. *Remote Sensing*, 10(6), 944.

Chen, H., Xu, C. Y., & Guo, S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of hydrology*, 434, 36-45.

Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., ... & Hay, L. E. (2008). Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 44(12).

Croke, B.F. & Jakeman, A.J. (2008). Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions. *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*, 41-48.

Croke, B.F., & Jakeman, A.J. (2004). A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model. *Environmental Modelling & Software*, 19(1), 1-5.

Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Tramblay, Y., & Bargaoui, Z. (2017). Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of hydrology*, 550, 201-217.

Duhan, D., & Pandey, A. (2013). Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901-2002 at Madhya

- Pradesh, India. Atmospheric Research, 122, 136-149.
- Dye, P. J., & Croke, B. F. (2003). Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9), 705-712.
- Evans, J., & Schreider, S. (2002). Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth, Australia. *Climatic Change*, 55(3), 361-393.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-24.
- Farzin, S. & Alizadeh sanami, F., (2017). Modeling and analysis of Trend in the hydrological regime of rivers (Case Study: Gorganrood River, Tamar hydrometric stations). *jwmseir*. 11 (37):35-45.
- Fowler, K. J., Peel, M. C., Western, A. W., Zhang, L., & Peterson, T. J. (2016). Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 52(3), 1820-1846.
- Funes, I., Aranda, X., Biel, C., Carbó, J., Camps, F., Molina, A. J. & Savé, R. (2016). Future climate change impacts on apple flowering date in a Mediterranean subbasin. *Agricultural Water Management*, 164, 19-27.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S. & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2, 150066.
- Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Croke, B., Jakeman, A., Song, Y. & Liao, W. (2018). Applicability Assessment and Uncertainty Analysis of Multi-Precipitation Datasets for the Simulation of Hydrologic Models. *Water*, 10(11), 1611. <https://www.irna.ir/news/83386223>.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G. & Stocker, E.F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Jones, R. N., Chiew, F. H., Boughton, W. C., & Zhang, L. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1419-1429.
- Kavetski, D., Kuczera, G., & Franks, S.W. (2006). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water resources research*, 42(3).
- kayhanpanah, M., Zare Bidaki, R., Bazrafshan, J. (2017). Flow Modelling in Great Karun Sub-basins in terms of Future Climate. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(4), 1033-1047. [In Farsi].
- Khajeh, S., Paimozd, S., & Moghaddasi, M. (2017). Assessing the impact of climate changes on hydrological drought based on reservoir performance indices (case study: ZayandehRud River basin, Iran). *Water Resources Management*, 31(9), 2595-2610.
- Khazaei Moughani, S., Najafinejad, A., Azimmohseni, M., Sheikh, V.B., (2013). Spatial and Seasonal Variation of Suspended Sediment in Different Stations of Gorganroud River, Golestan Province. *Journal of Waters ed Management Research*. 4(7):1-15. (In Farsi).
- Kheirfam, H., Mostafazadeh, R., & Sadeghi, S. H. R. (2013). Daily Discharge Prediction by Using IHACRES Model in Some Watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*, 4(7), 114-126.
- Kim, K. B., Kwon, H. H., & Han, D. (2018). Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 556, 194-210.
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739-2758.
- Li, J., Carlson, B. E., Dubovik, O., & Laciš, A. A. (2014). Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(22), 12271-12289.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., & Van Niel, T. G. (2012). Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds. *Ecohydrology*, 5(4), 381-388.
- Mirdashtovan, M., Malekian, A., Mohseni Saravi, M. (2018). Stream flow simulation using statistical downscaling of climatic data: Urmia Lake Basin. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 419-431. [In Farsi].
- Nazaripouya, H., Kardavany, P., Farajy Rad, A. (2016). Assessing Climate Change Impacts on Hydro-Climatic Parameters in the Dam Basin of Ekbatan, Hamedan. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(2), 181-194. [In Farsi].
- Omrani, E., & Sharif, H. O. (2018). Evaluation of the global precipitation measurement (GPM) satellite rainfall products over the lower Colorado River basin, Texas. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), 882-898.
- Ouma, P. O., Odera, P. A., & Mukundi, J. B. (2016). Spatial Modelling of Weather Variables for Plant Disease Applications in Mwea Region. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4(05), 127.
- Oyerinde, G. T., Fademi, I. O., & Denton, O. A. (2017). Modeling runoff with satellite-based rainfall estimates in the Niger basin. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1363340.
- Panahi, E., Bafkar, A., Hafezparast, M. (2017). Assessment of management alternatives for maintaining watershed sustainability in the climate scenarios. *Iran Water Resources Research*, 13(1), 139-152. [In Farsi].
- Satgé, F., Xavier, A., Pillco Zolá, R., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., & Bonnet, M. P. (2017).

- Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main Bolivian watersheds. *Remote Sensing*, 9(4), 369.
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of *FARSIN* system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046.
- Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (2011). Estimation of the IHACRES model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping River basin. *Journal of Kasetsart (Natural Science)*, 45, 917-931.
- Teng, J., Vaze, J., Chiew, F. H., Wang, B., & Perraud, J. M. (2012). Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 122-139.
- Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity—validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 447-457.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157.
- Xu, Z. X., Takeuchi, K., Ishidaira, H., & Li, J. Y. (2005). Long-term trend analysis for precipitation in Asian Pacific FRIEND river basins. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(18), 3517-3532.
- Yaghobi, M. & Massah Bavani, A. (2016). Comparison and Evaluation of Different Sources of Uncertainty in the Study of Climate Change Impact on Runoff in Semi-arid Basins (Case study: Azam Harat River Basin). *Iran Water Resources Research*, 11(3), 113-130. [In *Farsi*].
- Yin, J., He, F., Xiong, Y. J., & Qiu, G. Y. (2017). Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 183-196.