



## تولید سناریوهای بلندمدت جریان تحت تاثیر تغییر اقلیم و تحلیل آن‌ها (بررسی موردی: حوضه آبریز سد کارون ۴)

اسداله اکبریان اقدم<sup>۱\*</sup>، علی محمد احمدوند<sup>۲</sup> و سعید علیمحمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه پیام نور، تهران  
<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران  
<sup>۳</sup> استادیار گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۵

### Long Term River Discharge Scenarios Estimation Under Climate Change Impacts. (Case Study: Karun4 Catchment Area)

Asadolah Akbarian Aghdam<sup>1\*</sup>, Alimohammad  
Ahmadvand<sup>2</sup> & Saeed Alimohammadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student of Industrial Engineering, Tehran Graduate Center,  
University of Payam Noor

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Technology and Engineering, University of  
Imam Hossein

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Water and Environmental  
Engineering, Shahid Beheshti University

#### Abstract

Climate change is likely to create considerable and often unfavorable impacts in Iran. Investigating and analyzing of the impacts of this phenomenon on the environment and on hydrological factors, including river flows as the basic factor in the provision of water resources, is a serious need. This study is in line with this objective and has conducted the production of long term scenarios of discharge and evaporation under the influence of climate change in Karun4 basin. In this study, long-term scenarios for predicting the future discharge under the effect of climate change have been established for the next 90 years. At first, 28 scenarios for monthly temperature and rainfall were generated using 11 AOGCM models under AR4 for different years were created. Discharges were estimated by an empirical multi-variable regression model which was obtained, calibrated and finalized by using historical data. Future discharge was then obtained and its behaviour and trend were analyzed for average, optimistic and pessimistic scenarios. The results show changes of rainfall (about 17% decrease) and temperature (22.6% increase) over the next 90 years will cause a significant change in river discharge from between 32% (the pessimistic condition) to 7.4% (the optimistic condition) and, under average conditions, a reduction of 18.6%. Bases on these results, climate change along with the increase of evapotranspiration and decrease in discharge will cause significant impacts on water resources. As a result it is shown that a reduction of about 20% will probably occur in hydropower plant production.

**Keywords:** Hydropower Plant, Empirical Regression Model, Discharge Scenario, Downscaling, Evapotranspiration.

#### چکیده

پدیده تغییر اقلیم در کشور اثرات محسوس و اغلب نامطلوبی را ایجاد خواهد کرد. آشکار سازی و بررسی اثرات این پدیده بر محیط زیست و عوامل هیدرولوژیکی از جمله جریان رودخانه‌ها، به عنوان عامل اساسی در تامین منابع آبی، یک ضرورت است. پژوهش حاضر در این راستا، سناریوهای بلندمدت جریان و تبخیر تحت تاثیر پدیده مذکور را در حوضه آبریز سد کارون ۴ طی مراحل تولید کرده است. ابتدا روابط محاسبات تبخیر و مدل‌های برآورد جریان تهیه شد. سپس بر اساس بارش و دمای ماهانه این حوضه که توسط مدل‌های گردش عمومی و تغییر اقلیم<sup>۱</sup> AOGCM تحت ۱۱ مدل از سری AR4<sup>۲</sup> بررسی و تعداد ۲۸ سناریو برای عوامل مذکور برای ۹۰ سال آینده ایجاد شده، جریان و آورد رودخانه محاسبه شده است. جریان از مدل رگرسیونی تجربی چند متغیره برآورد شده که به استناد داده‌های تاریخی ایجاد و کالیبره گردید. جریان آینده برای هر یک از سناریوها بطور جداگانه شبیه‌سازی و محاسبه گردیده است. رفتار و روند تغییرات جریان، در بدبین‌ترین و خوش‌بین‌ترین سناریوها مورد تحلیل قرار گرفته و تغییرات جریان در سه دوره ۳۰ ساله و تا انتهای قرن حاضر تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد در انتهای دوره سوم (۲۱۰۰)، افزایش دما ۲۲/۶٪ و کاهش بارش ۱۷/۲٪ خواهد بود که موجب تغییرات قابل توجهی در جریان رودخانه شده و مقدار آن را از ۷/۴٪ (خوش‌بین‌ترین سناریو) تا ۳۲٪ (بدبین‌ترین سناریو) و به طور متوسط ۱۸/۶٪ کاهش خواهد داد. کاهش جریان منابع آبی تنها در تولید ۱۰۰۰ مگاواتی نیروگاه کارون ۴ کاهش ۲۰ درصدی ایجاد خواهد کرد و حداکثر و حداقل متوسط تولید نیروگاه به ۹۷۱ و ۳۹۵ مگاوات می‌رسد.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه برقی، مدل رگرسیونی تجربی، سناریوی جریان، ریزمقیاس‌سازی، تبخیر و تعرق.

\* Corresponding Author. E-mail Address: a\_akbarian@sbu.ac.ir

## ۱- مقدمه

در بین ۱۰ عامل تهدید آمیزی که بشر را در قرن ۲۱ تهدید می‌کنند، اکنون پدیده تغییر اقلیم در رتبه نخست قرار دارد. مساله اصلی در بروز این پدیده پیامدهای آن برای طبیعت و زندگی بشر است که این تاثیرات در سه بخش مخاطرات، تولید و مصرف منابع طبیعی مشهود است. باید هر چه زودتر به فکر مقابله با عوارض تغییر اقلیم باشیم و برای آن چاره‌ای بیاندیشیم زیرا تحقیقات نشان می‌دهد تغییرات اقلیم در کشور ما بر منابع آبی تاثیرات ناخوشایند و محسوس دارد [۱]. امروزه پژوهش‌های بسیاری در سراسر جهان وجود تغییر در عوامل اقلیمی و هیدروکلیماتی را تایید می‌کند. توسعه شهرها و صنایع و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای از یک طرف و تغییر کاربری اراضی در سطح حوضه رودخانه‌ها از طرف دیگر می‌تواند موجب دگرگونی در رژیم منابع آبی و در مواردی تشدید سیلاب‌ها شود [۲].

رژیم جریان رودخانه‌ها به واسطه آثار دخالت‌های انسانی و تغییر اقلیم با مخاطرات دو چندان روبه‌رو است. افزایش دما، افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل کاهش پوشش برف و تغییر طرح‌های بارندگی آثار متفاوتی را در مناطق مختلف خواهد داشت. در نتیجه، در مناطق مختلف پیامدهای متفاوت برای تغییرات منابع آب، خطرات سیلاب، کیفیت آب و کنترل سیلاب وجود خواهد داشت [۳].

در تحلیلی پیش‌بینی شده که تغییر اقلیم باعث افزایش جریان در عرض‌های جغرافیایی بالا (به دلیل افزایش بارش و ذوب برف) و کاهش جریان در عرض‌های جغرافیایی پایین می‌شود [۴]. یک محقق بلژیکی در بلژیک مرکزی بوسیله شبیه‌سازی RCM<sup>۳</sup> نشان داد که جابه‌جایی خاصی در بارش منطقه در طول سال موجود است به طوری که افزایش بارش در زمستان و کاهش بارش در تابستان اتفاق می‌افتد [۵].

به‌عنوان یک نتیجه منطقی، انتظار می‌رود تغییر اقلیم تاثیر قابل توجهی بر پارامترهای هیدرولوژیکی از قبیل جریان، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، و آب‌های زیرزمینی بگذارد.

پیش‌بینی جریان ورودی رودخانه به مخزن سد در جهت روشن‌سازی وضعیت آینده منابع آبی منطقه، برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر آن با مد نظر قرار دادن محیط‌زیست، بهینه‌سازی استفاده از منابع از جمله در نیروگاه‌های برقی، کاملاً ضروری است. چون امکان ایجاد و دسترسی مستقیم به سناریوی جریان به کمک اطلاعات

ماهواره‌ای و مدل‌های AOGCM وجود ندارد، لازم است این سناریوها ساخته شوند. در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های تاریخی مدل برآورد جریان از روش‌های رگرسیون تجربی چند متغیره (EMR<sup>۴</sup>) ایجاد و از سناریوهای دما و بارش برای آینده، سناریوهای جریان بنا شده‌اند. مدل‌های تجربی رگرسیونی، از جمله روش‌های کاربردی برای پیش‌بینی جریان رودخانه است که از سال‌ها قبل مورد استفاده بوده‌اند. گرچه این مدل‌ها نمی‌توانند تمامی شرایط فیزیکی ایجاد رواناب را نشان دهند و هم‌چنین نیازمند داده‌های طولانی‌مدت تاریخی هستند، اما به دلیل داشتن ویژگی‌هایی از جمله سادگی استفاده و کالیبراسیون و دقت بالای پیش‌بینی، هنوز مورد توجه و استفاده هستند. به عنوان نمونه در مرکز ملی آب و اقلیم امریکا (NWCC<sup>۵</sup>) با استفاده از شکل‌های مختلف معادلات رگرسیون خطی و با در نظر گرفتن متغیرهای آب معادل برف، رواناب پیشین، باران و متوسط فصلی شاخص‌های اقلیمی به عنوان متغیرهای مستقل، حجم جریان را به‌عنوان متغیر تابع پیش‌بینی کرده‌اند. در پژوهشی که توسط مرادخانی و Meier برای پیش‌بینی جریان در غرب امریکا انجام شده از مدل‌های رگرسیون تجربی برای توسعه معادلات پیش‌بینی استفاده شده است [۶]. محمد عظیمی و همکاران در پیش‌بینی بلند مدت حجم آورد در حوضه آبریز دز از روش رگرسیون خطی چند متغیره استفاده کرده‌اند [۷].

در بسیاری از تحقیقات، استفاده از مدل‌های رگرسیونی در برآورد جریان رودخانه توصیه شده و بیشتر رگرسیون‌های غیر خطی ترجیح داده می‌شود [۸]. در پژوهش حاضر از ۱۱ مدل AOGCM از سری AR4 جزو مدل‌های ارزیابی شده در گزارش چهارم (IPCC<sup>۶</sup>) در سال ۲۰۰۷ استفاده شده و تحت سناریوهای انتشار A2، B1 و A1B در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۱۰۰ (سه دوره ۳۰ ساله ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱) تعداد ۲۸ سناریو برای هر یک از عوامل بارش و دمای ماهانه ساخته شده است. سناریوهای ایجاد شده حاصل از مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی گردش عمومی است که در مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا (CCCma<sup>۷</sup>) توسعه یافته‌اند. هر گروه از خانواده‌های انتشار غیر اقلیمی حاوی اطلاعاتی در طیف‌های مختلف از وضعیت اقتصادی، اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است (فرج زاده). از جمله آن‌ها می‌توان عوامل اقتصادی، اجتماعی، تکنولوژیکی،

در سال‌های اخیر در سطح جهان بررسی‌های مختلفی در زمینه‌های ریزمقیاس نمایی انجام شده است. این تحقیقات در مناطق مختلف نتایج متفاوتی داشته است. ققمایی ورکی و دیگران با استفاده از یک رهیافت ترکیبی که متشکل از دو روش ناپارامتری است، براساس خروجی مدل CGCM3T63 تحت سناریوی A1B در دو چشم انداز اقلیمی ۳۰ سال (۱۴۲۰-۱۳۹۱) و پنجاه سال (۱۴۴۰-۱۳۹۱) متغیرهای اقلیمی دما و بارندگی را در مقیاس مکانی منطقه‌ای و زمانی ماهانه برای حوضه آبریز کرخه شبیه‌سازی کرده‌اند [۲۳]. نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت مناسب رهیافت در زمینه شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی و ریزمقیاس نمایی تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای است. با توجه به پیش‌بینی افزایشی دما و کاهش بارندگی در مدل بزرگ مقیاس، این تغییرات با تعیین مناسب پارامتر شکل به روش کم‌ترین مربعات خطا به سری ریزمقیاس شده انتقال یافت. علاوه بر این، ساده و کم پارامتر بودن این رهیافت در کنار ناپارامتری بودن آن، در حکم دلایل برتری آن بر بسیاری از شیوه‌های پارامتری موجود، قابل ذکر است [۱۰].

زهرایی و همکاران در مقایسه با مدل ریزمقیاس نمایی SDSM<sup>۱۳</sup> مدل رگرسیونی جدیدی را ارائه داده و با تاکید بر اینکه SDSM از جمله نرم‌افزارهای کاهش مقیاس آماری است که توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و از طریق پردازش روابط رگرسیونی خطی چند متغیره به کاهش مقیاس متغیرهای جوی می‌پردازد، مدل DMDM<sup>۱۴</sup> با ساختاری مشابه SDSM، از میان ابزارهای ریاضی فراهم آورده شده در آن (رگرسیون خطی ساده و روش‌های داده‌کاوی MARS و Model tree)، بهترین را انتخاب نموده و کاهش مقیاس را بر مبنای آن انجام می‌دهد. جعبه ابزار DMDM به سفارش صندوق حمایت از پژوهشگران توسط زهرایی و همکاران (۱۳۹۱) توسعه داده شده و کاربردهای آن توسط توکل و همکاران (۲۰۱۲) نیز منتشر شده است [۱۱].

پورعلی حسینی و مساح بوانی داده‌ها را با روش‌های گوناگون درون‌یابی و انتخاب بهترین روش، برای سلول‌های ۰/۵ در ۰/۵ درجه در منطقه آذربایجان تولید کرده‌اند. آن‌ها توصیه می‌کنند بررسی مخاطره و تحلیل اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی برای تصمیم‌گیری بهتر در زمینه منابع آب و سایر بخش‌های منابع طبیعی کمک شایانی به مدیران

رشد جمعیتی و محیط‌زیستی را نام برد که سناریوها در مدل‌های پایه خود مد نظر قرار داده‌اند. از آنجائی که استفاده از تعداد محدود سناریو ممکن است در بر گیرنده همه واقعیت‌ها نباشد [۲] و نتایج غیرمنطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم در پی داشته باشد [۹]، تکیه بر یک یا چند سناریوی خاص این مخاطره را به همراه دارد که نتایج غیر واقعی و با خطای بالا ارائه نماید. توصیه اکید منابع از جمله (CCCSN<sup>۱۵</sup>) و CCCma بر این است که حداکثر سناریوهای جوابگو به نیازهای هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته و از برآورد آن‌ها پیش‌بینی‌ها انجام پذیرد از اینرو در این پژوهش تعداد ۲۸ سناریو از گروه‌های انتشار ذکر شده انتخاب شده‌اند و آشکارسازی میزان جریان رودخانه و تغییرات آن در طول ۹۰ سال آینده بر اساس همه آن‌ها انجام پذیرفته است. هر چند که بدبین‌ترین و خوش‌بین‌ترین سناریوها نیز برای روشن‌سازی موارد تا حدی قابل پیش‌بینی مورد تحلیل قرار گرفته است. قابل ذکر است هدف این مطالعه ارائه روش یا مدل برای برآورد عوامل هیدرولوژیکی نبوده و از این قبیل مدل‌ها به فراوانی در مطالعات و پژوهشات وجود دارد، بلکه هدف آشکارسازی وضعیت آینده جریان و عوامل آن در آینده به منظور شناسائی و استفاده در مدیریت و برنامه‌ریزی آینده منابع آب منطقه است. برای هر یک از سناریوها ارزش‌های آماری مختلف از جمله  $R^2$ ،  $RMSE^9$  و  $MAE^{10}$  محاسبه و مقایسه شده تا سناریوهای مناسب معلوم شود. اما همانطور که گفته شد برای ایجاد اطمینان بیشتر تلاش شده تا نتیجه‌گیری کلی متکی به یک یا چند سناریوی خاص نباشد. در گزارشات جهانی CCCma سطح کره زمین به تعدادی شبکه به ابعاد ۳/۷۵ در ۳/۷۵ درجه (حدود ۳۷۵ در ۳۷۵ کیلومتر) تقسیم‌بندی شده‌اند که در برخی مدل‌ها کمی کوچکتر یا بزرگتر نیز هست. محدوده مورد مطالعه دارای طول و عرض کمتر از ۱/۵ درجه است و مطابقت محدوده شبکه‌ها با محدوده حوضه نیز برقرار نیست. از این‌رو برای پوشش کامل سطح حوضه نیاز به استفاده از چند شبکه مجاور است. داده‌های عوامل بارش و دما در هر یک از شبکه‌ها قابل حصول هستند. از روش‌های کوچک مقیاس‌سازی<sup>۱۱</sup> برای سناریوها استفاده می‌شود تا اطلاعات آن‌ها برای منطقه محدود مورد مطالعه قابل استفاده باشند [۸]. در این پژوهش روش  $RGAM^{12}$  معرفی شده و داده‌های شبکه‌ها با آن روش تنظیم و ریزمقیاس‌سازی پوششی شده‌اند.

بارش، دما، تبخیر و جریان ماهانه تاریخی برای حصول به مدل رگرسیونی تجربی چند متغیره جریان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای دستیابی به بهترین مدل چند متغیره مذکور لازم بود چندین مدل با عوامل پیشگوی مختلف تهیه و بررسی شوند تا از نتایج آن‌ها و نیز پارامترهای آماری محاسبه شده برای آنان مناسب‌ترین مدل انتخاب و برای برآورد جریان مورد استفاده قرار بگیرد.

همچنین سناریوهای دما و بارش ماهانه آینده به مدت ۹۱ سال از سال ۲۰۱۰ لغایت ۲۱۰۰ از بانک اطلاعاتی CCCSN کانادا تهیه گردیدند. این داده‌ها به روش جدید RGAM ریزمقیاس تا بتوان از سناریوها در منطقه محدود مورد بررسی استفاده کرد. با کمک این داده‌ها و از طریق مدل برآورد جریان، جریان آینده سناریوسازی شد. در هر مرحله از مطالعه مدل ایجاد شده با داده‌های تاریخی مقایسه و کالیبره شد. تلاش گردیده عمدتاً نتایج بصورت نمودار و شکل ارائه شود.

## ۲-۱- معرفی مدل‌های بکار رفته یا ایجاد شده

در انجام مطالعه از روش‌هایی مانند رگرسیون تجربی چند متغیره برای انجام تحقیق استفاده شده است، که دارای سابقه طولانی و نتایج خوبی بوده‌اند. ابتدا در منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز سد کارون ۴ از زیر حوضه‌های رودخانه کارون) کلیه داده‌های تاریخی موجود برای بارش، دما، تبخیر و جریان ماهانه در ایستگاه‌ها گردآوری شده، نواقص آن‌ها با روش‌های هیدرولوژیکی و آماری تکمیل و پرپود آماری مشترک ۳۰ ساله برای تمامی آن‌ها جهت محاسبه مقادیر عوامل هیدرولوژیکی منطقه انتخاب شد (از سال ۵۸-۱۳۵۷ لغایت ۸۷-۱۳۸۶). برای همین دوره زمانی سناریوهای دما و بارش ماهانه از داده‌های حاصل از بانک اطلاعاتی CCCSN تولید شد. تعداد ۲۸ سناریوی تولید شده تحت مدل‌های مختلف مقادیر نسبتاً متفاوتی برای عوامل هیدرولوژیکی ارائه می‌دهند. داده‌های جریان ماهانه سه ایستگاه ارمنند، مرغک و لردگان (نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هیدرومتری به محل مخزن سد) در دوره آماری تاریخی مذکور گردآوری و کامل شدند.

## ۲-۲- مدل‌های رگرسیونی تبخیر

برای بدست آوردن مدل تبخیر ابتدا روش تورنت وایت بررسی و مقادیر تبخیر ماهانه با در اختیار داشتن دمای ماهانه بدست آمد. مقایسه این مقادیر با آمار تاریخی تبخیر اختلاف

می‌کند و انجام چنین پژوهش‌هایی در مناطق مختلف ضروری است [۹].

اثر تغییر اقلیم روی جریان رودخانه یکی از حوضه‌های آبریز اسپانیا مشخص کرده است که بیشترین کاهش در متوسط جریان در ماه آگوست اتفاق می‌افتد که با توجه به کمینه بودن میزان جریان در این ماه، وضعیت منابع آب در این ماه بحرانی خواهد بود [۱۲]. همچنین تغییرات بارش و جریان رودخانه در چین بررسی شده و ملاحظه کرده‌اند که کاهش شدید بارش در فصل بهار و افزایش آن در پاییز و زمستان رخ می‌دهد که موجب تغییرات شدید در جریان بهار، پاییز و زمستان می‌شود [۱۳]. بررسی‌های آقای Buvich (2011) در مورد جریان رودخانه نیل نیز مشخص کرد تغییر اقلیم با اثرگذاری بر روی دما، بارش و تبخیر و تعرق، به میزان قابل توجهی جریان رودخانه در آینده را تحت تاثیر قرار خواهد داد. در پژوهشی مخاطرات کلی جریان رودخانه در انتهای قرن جاری بر اساس خروجی ۱۱ مدل اقلیم ارائه شده است. تصویر کلی تحت تاثیر سناریوها افزایش قابل توجهی در فراوانی سیلاب‌ها را در جنوب شرقی آسیا نشان می‌دهد. شبه جزیره هندوستان، افریقای شرقی و نیمه شمالی رشته کوه‌های آند تغییرات اندکی خواهند داشت. در مناطقی از جهان نیز فراوانی سیلاب‌ها کاهش خواهد داشت. اثر بزرگ و کلی تحت چهار سناریو انتخابی ظهور اثرپذیری افزایشی جریان رودخانه با گرمایش جهانی را نشان می‌دهد اما تغییرات سالانه ظهور در داخل مناطق ممکن است قبل از گرمایش جهانی، برای بررسی سازگاری و انطباق ضرورت داشته باشد [۱۴].

## ۲- مواد و روش‌ها

داده‌های ماهانه دما، بارش، تبخیر و جریان در یک دوره زمانی مشترک باید گردآوری، بازبینی و تکمیل یا اصلاح می‌شدند. با استفاده از آمار تکمیل شده دمای ماهانه مدل‌های رگرسیونی دما - تبخیر (تعداد ۱۲ مدل) برای منطقه استخراج شد. علیرضا کمال و علیرضا مساح بوانی [۱۵] مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم - AOGCM-AR4 و AOGCM-TAR در تاثیر بر رواناب حوضه را بررسی کرده و بازه تفاوت برآورد رواناب با خروجی مدل SIMHYD را تحت دو گروه از مدل‌های AR4 و TAR مورد مقایسه قرارداد داده و نشان داده‌اند استفاده از مدل‌های AR4 ضمن مدیریت بیشتر عدم قطعیت نتایج کاربردی‌تری نسبت به مدل‌های TAR به همراه خواهد داشت. داده‌های

### ۳-۲- مدل‌های رگرسیونی چند متغیره تجربی جریان

مدل برآورد جریان رودخانه از روش رگرسیونی چند متغیره تجربی با به کارگیری داده‌های تاریخی ماهانه بارش، دما، تبخیر و جریان پیشین به عنوان متغیرهای پیشگو و جریان ماهانه به عنوان متغیر پاسخ تهیه گردیده است. اگر  $P$ ،  $T$ ،  $EVP$  و  $Q_{pre}$  به ترتیب بارش، دما، تبخیر و جریان پیشین (ماه قبل) ماهانه به عنوان متغیرهای پیشگو و  $Q$  جریان ماهانه به عنوان متغیر پاسخ باشند، قالب کلی رگرسیون چند متغیره تجربی به صورت روابط ۱ و ۲ خواهد بود.

(۱)

$$Q = a + b f_p(P) + c f_T(T) + e f_{Q_{pre}}(Q_{pre})$$

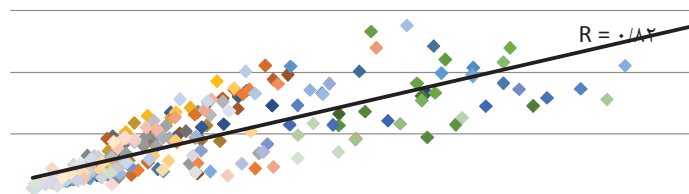
(۲)

$$Q = a + b f_p(P) + c f_T(T) + d f_{EVP}(EVP) + e f_{Q_{pre}}(Q_{pre})$$

در این روابط  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$ ،  $e$  ضرایب و  $f_p$ ،  $f_T$ ،  $f_{EVP}$  و  $f_{Q_{pre}}$  توابعی از  $P$ ،  $T$ ،  $EVP$  و  $Q_{pre}$  هستند. توابع در دو حالت خطی و لگاریتمی در نظر گرفته شده است. مقادیر  $P$ -value احتمال رد کردن شانس در هر یک از متغیرها با احتمال خطای برابر ۵٪ ( $\alpha = 0.05$ ) و یقین ۹۵٪ ( $1 - \alpha = 0.95$ ) محاسبه شده‌اند. در تهیه مدل‌ها نرم افزار SPSS به کار گرفته شده است. تعداد ۴ جفت مدل رگرسیونی چند متغیره (با و بدون مقدار ثابت  $a$ ) به شرح جدول ۲ ایجاد و مشخصات آماری و اعتباری آن‌ها محاسبه شد. در نهایت مناسب‌ترین مدل انتخاب و در دوره تاریخی جریان ماهانه بر اساس آن پیش‌بینی شده و با آمار واقعی همان دوره مقایسه و مدل صحت سنجی گردید. انطباق نتایج مدل با داده‌های تاریخی در شکل ۱ ارائه شده است. مدل ۸ با داشتن مربع ضریب همبستگی  $R^2$  برابر ۰/۹۹۵ و تعداد پارامترهای مناسب به عنوان مدل مناسب‌تر انتخاب شده است.

با استفاده از مقادیر عوامل در دوره تاریخی جریان در دوره مذکور برآورد و مقایسه جریان برآوردی مدل با داده‌های تاریخی در شکل ۱ ارائه شده است.

جریان محاسباتی



جریان واقعی


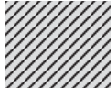






شکل ۱- صحت سنجی مدل با جریان ماهانه دوره تاریخی

زیادی نشان می‌داد و لازم بود روش تورنت وایت برای منطقه کالیبره و مطابقت داده شود. این کار انجام و نتایج حاصل شد. برای بالا بردن دقت برآوردها روش همبستگی بین تبخیر و عوامل دیگر هیدرولوژیکی بویژه دما و بارش در دوره تاریخی ثبت شده بررسی شدند. همانطوری که انتظار می‌رفت بارش تقریباً با تبخیر وابستگی نداشته و مستقل از آن بود. از اینرو مدل‌های رگرسیونی بین تبخیر و دمای ماهانه برای هر ماه بطور جداگانه با استفاده از ۲۴ سال آمار تاریخی ماهانه استخراج و آماره‌های آن‌ها محاسبه شد. از آمار ۶ سال دیگر برای صحت سنجی مدل‌ها استفاده شده است. ارتباط در تمام ماه‌ها خوب بوده و همبستگی‌های خوبی بین دما و تبخیر ماهانه وجود دارد. استفاده از مدل‌های رگرسیونی از روش تورنت وایت مناسب‌تر است. در این مدل‌ها از تمامی اطلاعات در دسترس برای برآورد دما و تبخیر ماهانه موجود استفاده شده و نقاط دورافتاده (پرت) تشخیص، بررسی و اصلاح یا حذف شده‌اند. خلاصه مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده بین تبخیر و تعرق ماهانه و دمای متوسط ماهانه در جدول ۱ آورده شده و از آن‌ها در تهیه سناریوهای آینده تبخیر و تعرق ماهانه استفاده شده است.

جدول ۱- ضرایب مدل‌های همبستگی دما- تبخیر

PET = a + bT			
ماه	b	a	R <sup>2</sup>
Jan	۱۵/۴۸۰	-۳۷/۴۹۶	۰/۹۲۷
Feb	۱۵/۵۹۰	-۴۰/۴۳۳	۰/۹۲۷
Mar	۱۵/۷۰۴	-۴۲/۸۴۷	۰/۹۲۹
Apr	۱۵/۷۶۸	-۴۴/۱۸۷	۰/۹۲۹
May	۱۵/۸۷۵	-۴۷/۳۳۴	۰/۹۳۳
Jun	۱۵/۹۷۵	-۴۷/۰۶۱	۰/۹۳۳
Jul	۱۶/۰۱۸	-۴۷/۵۲۷	۰/۹۲۹
Aug	۱۶/۳۱۰	-۵۰/۳۰۱	۰/۹۲۸
Sep	۱۶/۱۷۴	-۴۸/۸۸۹	۰/۹۲۷
Oct	۱۶/۰۵۰	-۴۷/۶۹۹	۰/۹۲۷
Nov	۱۶/۱۹۸	-۴۷/۷۹۳	۰/۹۴۲
Dec	۱۶/۲۴۵	-۴۶/۶۴۴	۰/۹۵۷

جدول ۲ - خلاصه مشخصات و ضرایب مدل‌های چند متغیره برآورد جریان

Adjusted R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	Multiple R	Qpre	EVP	T	P	Constant	predictor variable	مدل
			e	d	c	b	a	coefficient	
۰/۶۴۲	۰/۶۴۷	۰/۸۰۴	۰/۶۱	۰/۱۶۴	-۶/۷۱	۰/۲۷	۱۲۰/۲۲	Con , Evap , T , P , Qpre	۱
۰/۶۳۶	۰/۶۴۰	۰/۸۰۰	۰/۶۰		-۵/۱۶۰	۰/۲۴	۱۳۴/۷۰	Con , T , P , Qpre	۲
۰/۸۴۱	۰/۸۴۶	۰/۹۲۰	۰/۶۷	۰/۳۱۵	-۳/۷۸۲	۰/۸۳		Evap , T , P , Qpre	۳
۰/۸۳۱	۰/۸۳۶	۰/۹۱۴	۰/۶۸		۰/۳۴۷	۰/۹۰		T , P , Qpre	۴
۰/۷۹۶	۰/۷۹۹	۰/۸۹۴	۰/۶۸	۰/۰۵۵	-۰/۰۳۶	۰/۰۶	۱/۷۹	Con , Ln(Evap) , T , Ln(P) , Ln(Qpre)	۵
۰/۷۹۶	۰/۷۹۸	۰/۸۹۳	۰/۶۹		-۰/۰۳۴	۰/۰۰۳	۲/۰۱	Con , T , Ln(P) , Ln(Qpre)	۶
۰/۹۹۰	۰/۹۹۳	۰/۹۹۷	۱/۰۴		-۰/۰۱۵	۰/۰۱		T , Ln(P) , Ln(Qpre)	۷
۰/۹۹۱	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	۰/۸۰	۰/۲۹۴	-۰/۰۳۹	۰/۰۲		Ln(Evap) , T , Ln(P) , Ln(Qpre)	۸

وزنی معادل درصد اشغال مساحت اختصاص یابد. برای این منظور از آنجائی که مقادیر در رئوس شبکه‌های CCCSN معلوم هستند، ابتدا مقدار عامل در هر یک از شبکه‌ها با استفاده از چهار راس آن (گریدهای رئوس) محاسبه و سپس مقدار عامل در منطقه با استفاده از وزن شبکه‌ها محاسبه می‌شود. در شکل ۲ اگر فرض شود JKLM سطح منطقه مورد نظر و سطوح EDIH, EHG, ABEF, BCDE چهار شبکه‌ای باشند که منطقه را تحت پوشش قرار می‌دهند، در اینصورت مثلاً برای محاسبه دمای ماهانه منطقه در یک ماه معین از رابطه‌ای مانند رابطه ۳ استفاده می‌شود:

(۳)

$$T = \frac{T_{ABEF}A_1 + T_{FEHG}A_2 + T_{EDIH}A_3 + T_{BCDE}A_4}{Area}$$

در این رابطه به‌عنوان نمونه  $T_{ABEF}$  دمای سناریو در شبکه ABEF و  $A_i$  مساحت ناحیه  $i$  می‌باشد که به ترتیب از روابط ۴ و ۵ بدست می‌آیند.

(۴)

$$A_i = |(\lambda_B - \lambda_J)| |(\varphi_E - \varphi_J)|$$

(۵)

$$T_{ABEF} = \frac{T_A + T_B + T_E + T_F}{4}$$

در روابط ۴ و ۵ متغیرهای  $\varphi$  و  $\lambda$  عرض و طول جغرافیایی بوده و برای منطقه مورد مطالعه محدوده آن‌ها (مطابق نام‌گذاری در شکل ۲ راست) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \lambda_J &= 31.33 \text{ NorthLatitude} & \varphi_J &= 49.55 \text{ East Longitude} \\ \lambda_K &= 32.67 \text{ NorthLatitude} & \varphi_K &= 49.55 \text{ East Longitude} \\ \lambda_L &= 32.67 \text{ NorthLatitude} & \varphi_L &= 51.75 \text{ East Longitude} \\ \lambda_M &= 31.33 \text{ NorthLatitude} & \varphi_M &= 51.75 \text{ East Longitude} \end{aligned}$$

## ۲-۴- معرفی روش ریز مقیاس سازی RGAM

اگرچه پژوهشات گوناگونی در زمینه ارزیابی تاثیر اقلیم صورت گرفته، ولی در اکثر این پژوهشات فقط از یک روش کوچک مقیاس کردن و یا از خروجی یک مدل AOGCM استفاده شده است [۱۶]. یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی‌های مدل‌های AOGCM در ارزیابی تاثیر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها، و اغلب عدم مطابقت مختصات شبکه با مختصات منطقه است. در تحقیقات متعددی از روش درون‌یابی سلول‌های مجاور منطقه استفاده شده است [۱۷] و [۱۸]. برخی از پژوهشگران بکارگیری حداقل ۴ شبکه را در اطراف شبکه اصلی لازم دانسته‌اند و عده‌ای نیز روش کریجینگ را توصیه کرده و یا بکار برده‌اند [۲۲]. بررسی متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های AOGCM در سطوح منطقه‌ای نشان می‌دهد که این مدل‌ها به دلیل استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و نیز روش‌های متفاوت در پارامتر کردن<sup>۱۵</sup> فرآیندهای کوچک مقیاس (بارندگی و مانند آن)، نتایج یکسانی را از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشابه در منطقه مورد نظر به دست نمی‌دهند (Jones, 2001). لذا به منظور در نظر گرفتن تاثیر خروجی مدل‌های گوناگون در پژوهشات لازم است تا از خروجی تعداد زیادتری از این مدل‌ها استفاده کرد [۱۹].

در روش RGAM از این مفهوم که منطقه مورد نظر بر یک یا دو و یا چند شبکه از شبکه‌های تعیین شده در CCCSN منطبق بوده و وسعت آن قسمت‌هایی از چند شبکه را اشغال می‌کند، استفاده شده است. برای برآورد مقدار واقعی‌تر عوامل در سطح منطقه، نظیر بارش و دما، لازم است برای مقادیر عوامل اقلیم در هر یک از شبکه‌ها

شاخه بازفت به طول ۲۸ کیلومتر تشکیل شده است. هم‌چنین مساحت دریاچه در تراز عادی بهره‌برداری ۲۹/۲۳ کیلومتر مربع است. سد کارون ۴ بر روی رودخانه کارون و در فاصله ۶۷۰ کیلومتری ریزشگاه رودخانه کارون به خلیج فارس احداث شده و اهداف ساخت و منافع سد عبارتند از:

- تولید ۲۱/۷ میلیون کیلووات ساعت انرژی در سال (۱۰۰۰ مگاوات ساعت)

- کنترل آب‌های سطحی و سیلاب‌های مخرب فصلی  
- درآمدی معادل ۱۰۰ میلیون دلار در سال از تولید انرژی. (سایت رسمی شرکت توسعه منابع آب ایران ۱۳۹۲).  
شکل ۴ موقعیت حوضه آبریز و محل سد را نمایش می‌دهد.

## ۲-۶- سناریوهای بارش و دمای دوره آینده

تعداد ۲۸ سناریو از ۱۱ مدل مختلف AOGCM تحت سناریوهای انتشار A2, B1, A1B برای سال‌های ۲۰۱۰ لغایت ۲۱۰۰ ایجاد شده است. از این تعداد سناریو، تعداد ۴ سناریوی انتشار تک شبکه‌ای (در مجموع ۱۰ سناریو)، ۵ سناریوی انتشار دو شبکه‌ای (در مجموع ۱۴ سناریو) و دو سناریوی انتشار چهار شبکه‌ای (در مجموع ۴ سناریو) منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. در جدول ۳ لیست سناریوها به همراه سناریوی انتشار و سری استفاده شده که همگی سری AR4 هستند، ارائه شده است. وسعت و مختصات شبکه‌های هر یک از سناریوهای انتشار تفاوت دارد و در نتیجه باعث می‌شود پوشش منطقه در سناریوهای انتشار با تعداد شبکه متفاوتی امکان‌پذیر باشد. از طرفی سناریوها به دلیل استفاده از مدل‌های متفاوت و پارامتر کردن متفاوت عوامل اقلیم، مقادیر متفاوتی را برای بارش و دمای ماهانه پیش‌بینی می‌کنند. یکی از دلایل توصیه بر بکارگیری تعداد زیادی سناریو همین موضوع است. تمامی سناریوها روند افزایشی برای دمای ماهانه و روند کاهشی برای بارش نشان می‌دهند. هرچند برای بارش در سال‌های دهه‌های آخر برخی سناریوها روند نزولی ضعیف و نیز روند افزایشی نسبی دارند. در شکل ۴ (راست) نمونه‌ای از تغییرات دمای ماهانه سناریوها ارائه شده است. در این شکل متوسط بلند مدت سناریو نیز نشان داده شده است. در شکل ۴ (چپ) مقادیر ارائه شده با بدبین‌ترین و خوش‌بین‌ترین سناریوی برای دما در مقایسه با نرمال بلند مدت تاریخی ارائه شده است. سناریوی ۲۵ با ارائه بیشترین دمای ماهانه و کمترین بارش‌های ماهانه بدبین‌ترین سناریوهای موجود است.

برای صحت سنجی روش RGAM دماهای تاریخی در برابر مقادیر سناریوهای همزمان ریزمقیاس شده با این روش در شکل ۳ ارائه شده است. خوشه‌های دمای ماهانه در شکل ملاحظه می‌شوند.

## ۲-۵- منطقه مورد مطالعه و داده‌های تاریخی

حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴ (شکل ۲ چپ) در قسمت جنوب غربی ایران در محدوده جغرافیایی مذکور در منطقه سلسله جبال زاگرس واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری عمدتاً به استان‌های چهارمحال و بختیاری و اصفهان تعلق دارد.

اقلیم حوضه آبریز سد کارون ۴ در نقاط مختلف بین نیمه خشک سرد تا معتدل مرطوب طبقه‌بندی می‌شود. هم‌چنین توده‌های هوایی که در منطقه آبریز سد کارون ۴ موثرند عبارتند از توده هوای دریایی حاره که بیشتر در زمستان در حوضه آبریز سد کارون ۴ فعالند و توده هوای قاره‌ای حاره که عموماً در تابستان فعالیت دارد. هم‌چنین توده هوای دریایی قطبی که بیشتر قسمت‌های شمالی حوضه را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

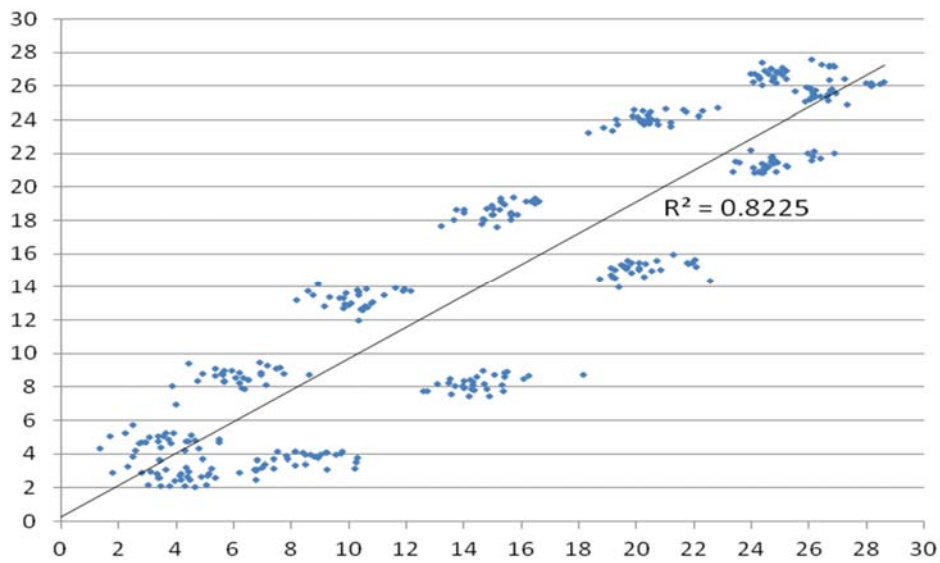
حوضه آبریز مذکور کوهستانی بوده، ارتفاع متوسط آن ۲۳۵۴ متر و ارتفاع بلندترین نقطه آن ۴۲۰۰ متر است. مساحت حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴/۱۲۸۱۳ کیلومتر مربع بوده و رشته کوه‌های مرتفع سلسله جبال زاگرس شرایط مناسبی را برای بارش در حوضه آبریز این رودخانه (بخصوص نواحی غربی و شمال غربی) بوجود آورده است، به گونه‌ای که ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه حدود ۶۸۰ میلی‌متر برآورد می‌شود. هم‌چنین متوسط تبخیر از سطح دریاچه برابر ۱۸۱۱/۲ میلی‌متر برآورد می‌شود. متوسط آورد سالانه رودخانه ۴۹۲۷/۴ میلیون مترمکعب بوده و دمای حداقل در محل سد برابر ۸ و دمای حداکثر برابر ۳۲/۴ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود.

مخزن سد کارون ۴ دارای عرض متوسط برابر ۵۰۰ متر، تراز عادی بهره‌برداری مخزن ۱۰۲۵، تراز حداقل بهره‌برداری ۹۹۶ و تراز آبگیر نیروگاه ۹۴۵ متر از سطح دریا است. مخزن ذکر شده دارای حجم ۲۱۹۰ میلیون متر مکعب بوده که ۷/۷۴۸ میلیون متر مکعب آن حجم مفید و ۱۰۹۷ میلیون متر مکعب آن حجم مرده مخزن است. هم‌چنین آب قابل تنظیم سالانه توسط مخزن سد کارون ۴ برابر ۳۱۵۶ میلیون متر مکعب است. دریاچه سد کارون ۴ از دو شاخه یکی در شاخه ارمند به طول ۴۰/۵ کیلومتر و دیگری در



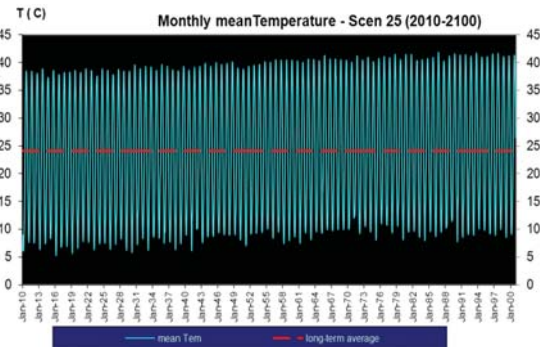
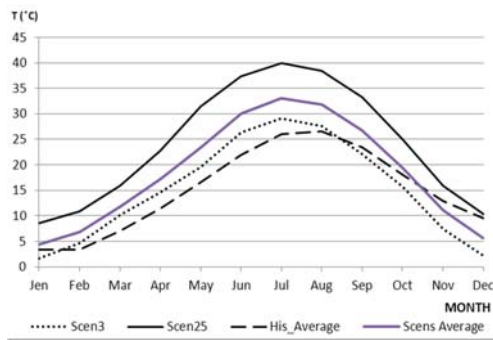
شکل ۲- (راست) موقعیت شماتیک منطقه و شبکه‌ها (چپ) حوضه آبریز و محل سد و نیروگاه سد کارون ۴

سناریو ریزمقیاس شده



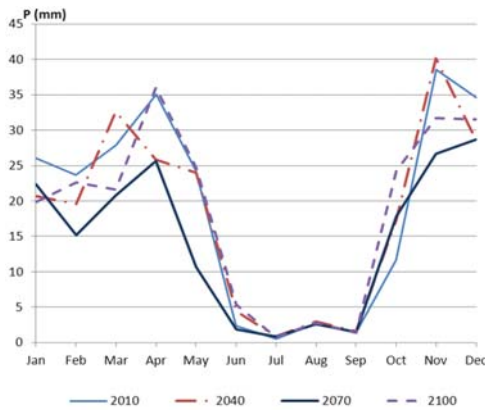
دمای ماهانه تاریخی (درجه سانتیگراد)

شکل ۳- دمای ماهانه سناریوهای ریزمقیاس شده و تاریخی

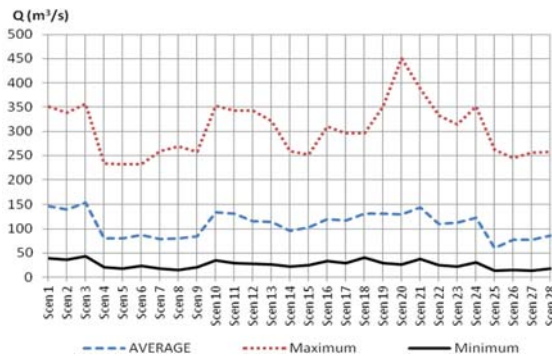
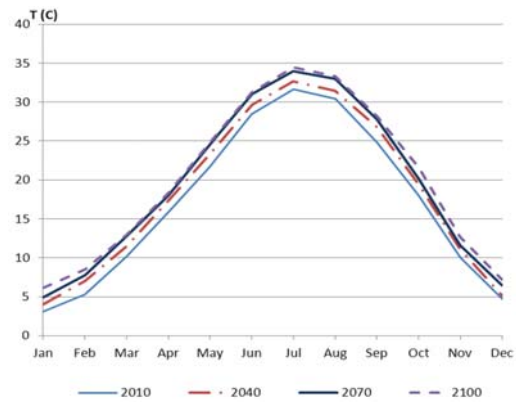


شکل ۴- (راست) روند تغییرات دمای ماهانه سناریو ۲۵ (چپ) متوسط دمای ماهانه خوش‌بین‌ترین و بدبین‌ترین سناریو در مقایسه با نرمال بلند مدت تاریخی

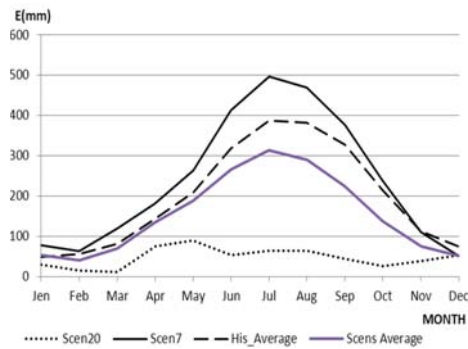




شکل ۵ - تغییرات ماهانه (متوسط ۲۸ سناریو در انتهای دوره‌های ۳۰ ساله). دما (راست) و بارش (چپ)



شکل ۶ - (راست) متوسط تبخیر خوش بین‌ترین و بدبین‌ترین سناریو در مقایسه با نرمال بلند مدت تاریخی. (چپ) متوسط، حداکثر و



شکل ۶ - (راست) متوسط تبخیر خوش بین‌ترین و بدبین‌ترین سناریو در مقایسه با نرمال بلند مدت تاریخی. (چپ) متوسط، حداکثر و حداقل جریان ماهانه کل سناریوها.

نرمال بلند مدت تاریخی در شکل ۶ (راست) نمایش داده شده است.

## ۲-۸- تولید سناریوهای جریان دوره‌های آینده

سناریوهای جریان آینده بر مبنای مدل رگرسیونی تجربی چند متغیره شماره ۸ از جدول ۲ ایجاد شده است. برای این سناریوها داده‌های متغیرهای پیشگو (شامل بارش، دما و تبخیر) از سناریوهای آینده استخراج شده و برای هر ماه جداگانه محاسبه می‌شوند. مقدار متغیر پیشگوی  $Q_{pre}$  (جریان پیشین) با مقدار  $Q$  به دست آمده در ماه قبل برابر است. بدین ترتیب برای ایجاد سناریوهای جریان بصورت گام به گام زمانی عمل شده و جریان در هر ماه علاوه بر مقدار دما، بارش و تبخیر آن ماه، نیازمند مقدار جریان در ماه قبل نیز هست. برای شروع محاسبات  $Q_{pre}$  اولیه به‌عنوان شرایط مرزی مدل باید معلوم فرض شود. در این تحقیق مقدار  $Q_{pre}$  اولیه مقدار واقعی آن از داده‌های ثبت شده تاریخی ( $181 \text{ m}^3/\text{s}$ ) در نظر گرفته شده است. تمامی سناریوهای جریان روند کاهشی را برای آن نشان می‌دهند. مقدار کاهش در سناریوها متفاوت است.

## ۲-۸-۱- تغییرات جریان ماهانه

تغییرات دما و بارش ماهانه متوسط سناریوها در ۲۰۱۰ و انتهای دوره‌های سی ساله منتهی به ۲۰۴۰، ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ در شکل ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود علیرغم روند افزایشی دما در تمامی دوره‌ها، بارش تا دوره دوم روند کاهشی داشته ولی در دوره سی ساله آخر مقداری روند افزایشی پیدا می‌کند. بطور کلی می‌توان گفت افزایش دما در ماه‌های گرم بیشتر از فصول سرد است به این معنی که ماه‌های گرم گرم‌تر خواهند شد که این خود به نحوی به مصرف آب و انرژی در فصول گرم می‌افزاید. این نوع تاثیرگذاری تغییر اقلیم در اکثر مناطق جهان خود را نشان می‌دهد. از جمله می‌توان به پژوهش [۲۰] اشاره کرد.

## ۲-۷- تولید سناریوهای تبخیر دوره‌های آینده

برای ایجاد سناریوهای تبخیر از سناریوهای دما در دوره‌های آینده استفاده شده و هر یک از مدل‌های ماهانه تبخیر (جدول ۱) برای ایجاد سناریوی ماه مربوطه به کار برده شده‌اند. بدیهی است در ماه‌های با دمای زیر صفر مقدار تبخیر صفر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر تبخیر حاصل از سناریوهای تبخیر بدبین و خوش‌بین در مقایسه با مقادیر

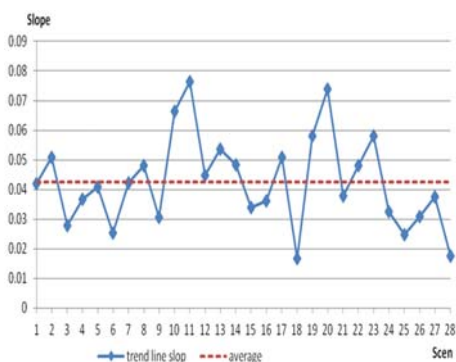
و متوسط جریان سالانه نیز بر حسب سناریوها به ترتیب ۱۱۷/۹۷، ۱۷۷/۹۴ و ۱۴۶/۸۷ مترمکعب در ثانیه است.

شکل ۸ (راست) تغییرات جریان سالانه متوسط کل سناریوها و روند کاهش آن را نشان می‌دهد. شیب خط کاهش حدود ۲۵٪ است. در سال ۲۰۳۲ جریان سالانه بیشترین کاهش از روند کلی کاهش را نشان می‌دهد که بالغ بر ۱۷ مترمکعب در ثانیه است.

میانگین مقادیر جریان سالانه سناریوها با توزیع نرمال مطابقت داده شده و هیستوگرام و منحنی نرمال آن در شکل ۸ (چپ) ارائه شده است. دبی سالانه بر توزیع نرمال با میانگین ۱۴۶/۸۷ و انحراف معیار ۱۴/۴۲۴ مترمکعب در ثانیه مطابقت داشته و داده‌ها از آن توزیع احتمالاتی تبعیت می‌کند. با استفاده از این توزیع جریان سالانه برای دوره‌های بازگشت ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ سال به ترتیب به ترتیب ۱۹۱/۴، ۱۸۷/۶، ۱۸۴/۱، ۱۸۰/۴ مترمکعب در ثانیه محاسبه شده است.

کلیه پیش‌بینی‌های جریان توسط مدل ایجاد شده برای برآورد جریان ماهانه (مدل شماره ۸) و بر اساس داده‌های ریزمقیاس شده سناریوهای مختلف برای دما، بارش و تبخیر ماهانه انجام گرفته است. این برآوردها از اعتبار و دقت هم‌تراز با صحت مدل و دقت پیش‌بینی سناریوها برخوردار خواهد بود.

جریان و آورد رودخانه در کنار تبخیر به‌عنوان تامین کننده اصلی منابع آبی برای مصارف مختلف شمرده می‌شود. از جمله برای تامین هد لازم در مخزن سد و ایجاد توان جریان خروجی آب از مخزن و ورود به نیروگاه برقابی اهمیت بسزایی دارد. کاهش قابل توجه جریان ورودی به مخزن سد و افزایش تبخیر در نهایت منجر به کاهش تولید نیروگاه در حدود متوسط ۲۰٪ خواهد شد [۲۱].



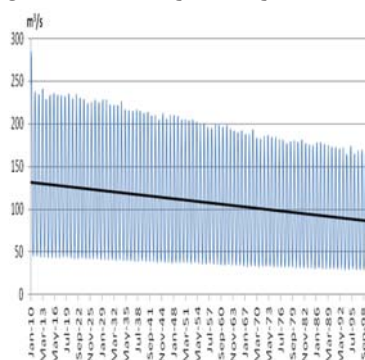
شکل ۷ - (راست) روند تغییرات متوسط جریان ماهانه سناریوها. (چپ) تغییرات گردان‌های کاهش جریان ماهانه سناریوها و گردان‌های متوسط کاهش

متوسط جریان ماهانه کل سناریوها و حداکثر و حداقل آنها در شکل ۶ (چپ) جمع‌بندی شده است.

مطابق نتایج سناریوها، جریان ماهانه ورودی به مخزن سد در طول ۹۱ سال آینده از ۷/۴٪ تا ۳۲٪ نسبت به جریان در ابتدای دوره کاهش خواهد یافت. که مقدار متوسط کاهش در این مدت ۱۸/۶٪ خواهد بود. در جدول ۳ لیست سناریوها که همگی از سری (2007) AR4 هستند به همراه مقدار و درصد کاهش جریان ماهانه در انتهای دوره‌های ۳۰ ساله منعکس شده است. بزرگترین کاهش ۳۰ ساله اول به مقدار ۲۶/۷۶ مترمکعب در ثانیه مربوط به سناریوی ۱۱ و در دوره‌های ۳۰ ساله بعدی به ترتیب ۲۰/۵۲ و ۱۸/۲۲ مترمکعب در ثانیه مربوط به سناریوهای ۷ و ۲۵ می‌باشد. مقادیر عددی حداقل، حداکثر و متوسط جریان به ترتیب ۶۱/۰۷، ۱۵۳/۸۹ و ۱۰۸/۷۸ مترمکعب در ثانیه است. شکل ۷ (راست) تغییرات متوسط جریان ماهانه سناریوها در طول ۹۱ سال را بیان می‌کند. شیب متوسط روند خطی تغییرات جریان ماهانه حدود ۳۰٪ است. تغییرات جریان ماهانه هر یک از سناریوها با محاسبه شیب خط کاهش مربوط به آن ماه قابل محاسبه است. روند کاهش خطی هر یک از سناریوها برای هر ماه مشخص و شیب گردان‌های آن‌ها تعیین و خلاصه محاسبات به همراه متوسط آن در شکل ۷ (چپ) ارائه شده است.

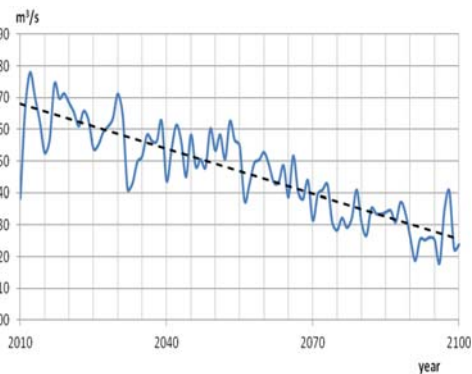
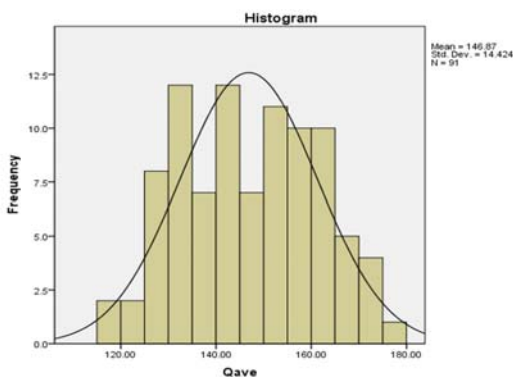
## ۲-۸-۲- تغییرات جریان سالانه

همه ۲۸ سناریو جریان در مقدار جریان سالانه روند کاهشی قابل توجهی را نشان می‌دهند که میزان آن در سناریوها مختلف متفاوت است. مقدار جریان سالانه در انتهای دوره‌های ۳۰ ساله اول (سال ۲۰۴۰)، دوم (سال ۲۰۷۰) و سوم (سال ۲۱۰۰) به ترتیب برابر ۱۴۳/۷۲، ۱۳۱/۴۷ و ۱۲۳/۸۰ مترمکعب در ثانیه است. حداکثر جریان سالانه در انتهای دوره‌های مذکور به ترتیب ۶۱/۸۳، ۱۵۸/۹۷ و ۱۳۷/۹۸ مترمکعب در ثانیه است. حداقل، حداکثر



جدول ۳ - لیست سناریوها، مقدار و درصد کاهش جریان ماهانه سناریوها در دوره‌های ۳۰ ساله

شماره سناریو	تعداد شبکه	نام سناریو و سناریوی انتشار		۲۰۱۱-۲۰۴۰		۲۰۴۱-۲۰۷۰		۲۰۷۱-۲۱۰۰	
		درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار	درصد	مقدار
۱	۱	GFDLCM2.0 (Run 1) - SR-A1B		۸/۳۲	۱۱/۳۸	۱۶/۴۱	۱۰/۴۲	۱۰/۵۴	۱۷/۸۵
۲	۱	GFDLCM2.0 (Run 1) - SR-A2		۱۷/۳۱	۲۲/۸۸	۲۴/۵۱	۱۵/۷۹	۳/۷۳	۵/۹۴
۳	۱	GFDLCM2.0 (Run 1) - SR-B1		۶/۱۳	۹/۱۵	۶/۵۲	۴/۱۶	۷/۳۲	۱۲/۴۲
۴	۱	GFDLCM2.1 (Run 1) - SR-A1B		۱۵/۸۶	۱۱/۷۶	۱۴/۴۴	۱۲/۲۵	۱۵/۱۴	۱۵/۴۵
۵	۱	GFDLCM2.1 (Run 1) - SR-A2		۱۷/۳۱	۱۲/۲۹	۱۶/۱۲	۱۴/۱۶	۱۰/۹۴	۱۰/۹۰
۶	۱	GFDLCM2.1 (Run 1) - SR-B1		۱/۸۵	۱/۴۶	۱۱/۱۲	۱۰/۱۱	۱۰/۵۷	۱۰/۷۸
۷	۱	GISS-EH (Mean) - SR-A1B		۳/۱۸۱	۹/۵۸	۲۰/۵۲	۱۷/۶۷	۱۴/۶۸	۱۴/۹۷
۸	۱	GISS-ER (Run 1) - SR-A1B		۲۳/۱۰	۱۶/۰۸	۱۸/۹۹	۱۶/۹۹	۱۲/۷۶	۱۳/۱۰
۹	۱	GISS-ER (Run 1) - SR-A2		۸/۲۸	۶/۳۷	۱۲/۱۵	۱۲/۱۵	۸/۰۰	۷/۹۶
۱۰	۱	GISS-ER (Run 1) - SR-B1		۱۳/۱۳	۱۵/۵۵	۱۶/۵۱	۱۳/۸۷	۱۳/۴۴	۲۲/۷۸
۱۱	۲	CSIROMk3.0 (Run 1) - SR-A1B		۲۶/۷۶	۳۱/۸۶	۱۸/۳۳	۲۶/۵۱	۱۱/۶۳	۹۱/۴۱
۱۲	۲	CSIROMk3.0 (Run 1) - SR-A2		۸/۳۵	۸/۸۰	۱۰/۸۷	۱۰/۸۷	۱۳/۲۳	۱۸/۷۷
۱۳	۲	CSIROMk3.0 (Run 1) - SR-B1		۱۸/۳۰	۹/۲۳	۱۴/۰۹	۱۷/۲۴	۱۳/۷۳	۱۹/۶۴
۱۴	۲	CSIROMk3.5 (Run 1) - SR-A1B		۱۸/۷۸	۱۶/۷۰	۱۷/۶۳	۱۸/۰۳	۱۷/۵۸	۲۲/۰۲
۱۵	۲	CSIROMk3.5 (Run 1) - SR-A2		۹/۹۰	۹/۵۵	۱۱/۵۱	۱۲/۲۲	۱۰/۶۸	۱۳/۰۱
۱۶	۲	CSIROMk3.5 (Run 1) - SR-B1		۵/۶۲	۶/۳۱	۹/۰۰	۱۱/۱۲	۱۱/۸۶	۱۶/۹۱
۱۷	۲	ECHAM5OM (Mean) - SR-A1B		۱۵/۷۱	۱۶/۸۲	۱۳/۴۹	۱۶/۹۲	۱۱/۳۱	۱۶/۱۵
۱۸	۲	ECHAM5OM (Mean) - SR-A2		-۰/۲۱	-۰/۲۷	۵/۱۱	۶/۸۱	۵/۹۵	۸/۴۴
۱۹	۲	ECHAM5OM (Mean) - SR-B1		۷/۱۴	۸/۳۳	۱۴/۷۲	۲۰/۳۱	۱۵/۳۳	۲۵/۵۵
۲۰	۲	HADGEM1 (Run 1) - SR-A1B		۱۳/۴۷	۱۴/۸۶	۱۵/۰۹	۲۱/۳۶	۱۶/۴۶	۲۸/۱۶
۲۱	۲	HADGEM1 (Run 1) - SR-A2		۷/۰۰	۱/۳۱	۷/۲۲	۱۰/۷۸	۱۱/۳۴	۱۸/۸۷
۲۲	۲	NCARCCSM3 (Mean) - SR-A1B		۱/۶۶	۱/۵۹	۱۱/۴۵	۱۲/۶۲	۱۷/۸۴	۲۵/۳۵
۲۳	۲	NCARCCSM3 (Mean) - SR-A2		۱۶/۹۸	۱۷/۰۴	۱۱/۸۹	۱۵/۲۶	۱۴/۶۲	۲۱/۰۴
۲۴	۲	NCARCCSM3 (Mean) - SR-B1		-۰/۵۵	-۰/۶۲	۱۲/۸۹	۱۸/۴۲	۱۳/۰۲	۱۸/۹۲
۲۵	۴	INGV-SXG (Run 1) - SR-A1B		۵/۱۸	۲/۸۲	۱۳/۳۱	۸/۵۱	۱۸/۲۲	۱۴/۲۰
۲۶	۴	INGV-SXG (Run 1) - SR-A2		۱۸/۰۶	۱۳/۵۰	۸/۶۹	۶/۹۴	۱۵/۶۳	۱۵/۱۲
۲۷	۴	MIROC3.2 hires (Run 1) - SR-A1B		۱۲/۷۷	۸/۵۷	۱۷/۸۷	۱۵/۶۹	۱۱/۴۶	۱۰/۹۶
۲۸	۴	MIROC3.2 hires (Run 1) - SR-B1		۶/۲۸	۵/۲۰	۲/۹۷	۲/۵۲	۱۱/۳۶	۱۱/۰۹



شکل ۸ - (راست) تغییرات جریان سالانه متوسط سناریوها و روند کاهش خطی آن. (چپ) هیستوگرام و منحنی نرمال جریان سالانه سناریوها

### ۳- نتایج و بحث

شرایط خاص اقلیمی و جغرافیایی در آینده نیز چالش بیشتری در این مورد وجود خواهد داشت. در راستای ارائه، آشکارسازی و تحلیل آثار این پدیده در وضعیت آینده منابع آبی و رواناب در ورودی مخزن سد کارون ۴، ضمن ایجاد سناریوهای تبخیر آینده منطقه، آثار تغییر اقلیم بر جریان

موضوع تغییر اقلیم و عوامل تشدیدکننده و رو به افزایش آن موجب ایجاد نگرانی‌هایی برای کشورها شده است. کشور ما نیز مستثنی نیست. در سال‌های اخیر آثار تغییر اقلیم در کشور کاملاً مشهود بوده و بویژه با وجود

رودخانه و منابع آبی بررسی شده است. برای کاهش خطا و بالا بردن اطمینان پیش‌بینی‌ها، ضمن استفاده از تعداد حداکثری سناریو، از معیارهای آماری و نتایج قیاس با داده‌های تاریخی استفاده شده تا از بین مدل‌های ایجاد شده، مدل مناسب‌تر برای برآورد سناریوهای جریان انتخاب شود. در تهیه تمامی روابط و مدل‌های مورد استفاده آمار ۳۰ ساله واقعی داده‌ها برای عوامل هیدرولوژیکی مبنای اصلی بوده است. بدون شک نتایج این پژوهش در روشنگری وضعیت منابع آب آینده و مدیریت مناسب‌تر در راستای پاسخگویی به نیاز و مصارف مختلف از قبیل شرب، کشاورزی و صنعت مفید واقع خواهد شد. بدیهی است عوامل متعدد دیگری نیز در این مدیریت دخالت دارند که در این پژوهش مد نظر نبوده‌اند و این تحقیق با فرض ثابت بودن وضعیت فعلی تقاضا و توزیع منابع و نیز ایجاد سازه‌های جدید یا عمر مفید سازه‌های موجود انجام شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی نشان می‌دهد در سال‌های آینده جریان ورودی به مخزن سد به مقدار قابل توجهی در زمان‌های مختلف کاهش خواهد یافت. حتی با استناد به خوش‌بین‌ترین سناریو این مقدار از ۷/۴٪ کمتر نخواهد بود در حالیکه سناریوهای بدبین آن‌را تا حدود ۳۲٪ نیز پیش‌بینی می‌کنند. مقدار متوسط کاهش جریان در طول قرن حاضر ۱۸/۶٪ خواهد بود. این مقدار کاهش آورد رودخانه در کنار افزایش تبخیر از حداقل ۸٪ (خوش‌بین‌ترین سناریو) تا حداکثر ۵۳٪ (بدبین‌ترین سناریو) و به میزان متوسط ۲۶/۱٪ موجب تغییرات قابل توجهی در منابع آبی خواهد شد. در ادامه پژوهش حاضر، تولید نیروگاه برقایی تحت تاثیر تغییر اقلیم (به‌عنوان یکی از آثار کاهش منابع آبی) با بکارگیری روش بهینه‌سازی متوالی بررسی شده و نشان داده شده است که با کاهش متوسط ۱۸/۶ درصدی جریان ورودی به مخزن سد، بیش از ۲۰ درصد کاهش متوسط در تولید انرژی الکتریکی نیروگاه به وجود خواهد آورد. بر اساس این مطالعه در ۱۰ سال انتهایی دوره (۲۰۹۰-۲۱۰۰) متوسط تولید ۷۲۰/۳ مگاوات، در ۳۰ سال آخر دوره ۷۳۵ و متوسط کل ۹۱ سال ۸۰۰/۶ مگاوات خواهد بود. در انتهای سال ۲۱۰۰ حدود ۷۰۰ مگاوات را به جای ۱۰۰۰ مگاوات فعلی تولید خواهد کرد. این موضوع اگر پیشاپیش به نحو مناسبی مدیریت نشود می‌تواند عاملی برای ایجاد چالش و بحران‌های بزرگتر در آینده شود. بویژه آنکه

احتمالا تقاضای بیشتری برای انرژی الکتریکی به دلیل گرم‌تر شدن هوا وجود خواهد داشت. با مدیریت مناسب مخزن در خیلی از موارد می‌توان آسیب تولید برقایی را کاهش داد. از طرفی کاهش بارش به مقدار متوسط ۱۷/۲ درصد و افزایش دمای حدود ۲۳ درصدی موضوع‌های نگران‌کننده‌ای برای کشاورزی کشور به حساب می‌آیند. مدل‌های تولید شده برای برآورد تبخیر ماهانه، می‌تواند سناریوهای تبخیر ماهانه را با به‌کارگیری داده‌های سناریوهای دما محاسبه و ایجاد نماید. برای دوره‌های آینده علاوه بر معلوم بودن جریان ورودی، یکی از الزامات روشن ساختن آب ذخیره در مخزن برای ایجاد هد لازم برای نیروگاه یک، معلوم بودن مقادیر تبخیر از مخزن سد است.

در این تحقیق برای ریزمقیاس نمایی، روش RGAM معرفی شده و داده‌های سناریوهای بارش و دما با این روش ریزمقیاس شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج RGAM برای دوره آماری تاریخی، ارزیابی و با داده‌های تاریخی مقایسه و انطباق آن‌ها تایید شده است.

هم‌چنین در تهیه مدل برآورد جریان از روش رگرسیون تجربی چندمتغیره استفاده شده و جهت دسترسی به مدل مناسب‌تر تعداد ۸ مدل با متغیرهای پیشگوی مختلف ایجاد و از بین آنها مدل مناسب به استناد معیارهای آماری و نیز صحت سنجی با داده‌های تاریخی، انتخاب شده است. نتایج مدل برای دوره تاریخی مطابقت خوبی با آمار تاریخی ارائه می‌کند.

#### پی‌نوشت‌ها

- <sup>1</sup> Atmospheric-Ocean General Circulation Models
- <sup>2</sup> Fourth Assessment Report of IPCC
- <sup>3</sup> Regional Climate Models
- <sup>4</sup> Empirical Multivariate Regression
- <sup>5</sup> National Water and Climate center
- <sup>6</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- <sup>7</sup> Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis
- <sup>8</sup> Canadian Climate Change Scenarios Network
- <sup>9</sup> Root Mean Square Error
- <sup>10</sup> Mean Absolute Error
- <sup>11</sup> Downscaling
- <sup>12</sup> Relative Grid Area Method
- <sup>13</sup> Statistical Downscaling Model
- <sup>14</sup> Data Mining Downscaling Model
- <sup>15</sup> Parameterization

#### منابع

- [1] Liagati H. New geography of climate change. Seminar on climate change and its impacts on natural ecosystems, <http://sbu.ac.ir/Lists/News/DispForm.aspx?ID=13463>, (assessed: April 2014). [In Persian]

- [13] Yates D, Gangopadhyay S, Rajagopalan B, Strzepek K. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research*; **2011** ; **39** (7); 7-14.
- [14] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, Konoshima L, Yamazaki D, Watanabe S, Kim H, Kanae S. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*; **2013**; **3**; 816–821.
- [15] Kamal A, Massah Bavani A. Comparison of future uncertainty of AOGCM-TAR and AOGCM-AR4 models in the projection of runoff basin. *Journal of the Earth and Space Physics*; **2012**; **38**(3): 175-188. [In Persian]
- [16] Wilby R L, Harris I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*; **2013**; **42**; (W02419).
- [17] Barrow E, Hulme M, Semenov M. Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*; **1996**; **7**(5); 1295-2110.
- [18] Storch V, Zorita E, Cubasch U. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in intertime. *Journal of Climate*; **1993**; **6**; 1161-1171.
- [19] Seyyed Kaboli H, AkhodAli A, Masah Bavani A, Radmanesh F. A Downscaling Model Based on K-nearest neighbor (K-NN) Non-parametric Method. *Journal of Water and Soil*; **2012**; **26**(4); 779-808. [In Persian]
- [20] Guegan M, Uvo B, Madani K. Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California . *Journal of Hydrology*; **2014**; **42**; 261-271.
- [21] Akbarian Aghdam A, Ahmadvand A, Alimohammadi S. Future Surface Water Resources Sensitivity to Climate Changes Impacts. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering*; **2014**; **18**(2); 1-10.
- [22] Massah Bavani A, Morid S, Mohammadzadeh M. Evaluating different AOGCMs and downscaling procedures in climate change local impact assessment studies. *Journal of the Earth and Space Physics*; **2010**; **36**(4); 99-110. [In Persian]
- [23] Ghamghami M, Ghahreman N. Downscaling of climatic change using a non-parametric statistical approach in Karkheh basin. *Iranian Journal of Geophysics.s*; **2012**; **7**(2); 142-157. [In Persian]
- [2] Farajzadeh M. Climate Change Effects on River Discharge-Case Study Sheshpir River. *Geography and Environmental Planning Journal*; <http://uijs.ui.ac.ir/gep>; **2013**; 49(1). [In Persian]
- [3] Schneider C, Laiz'e C L R, Acreman M C, Florke M. How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences*; **2013**; **17**; 325–339
- [4] Lane M E, Kirshenand P H, Vogel R M. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. *ASCE; Journal of Water resource Planning and Management*; **1999**; **125**(4); 194-204
- [5] Bagus P, Roulin E, Willems P, Ntegeka V. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer; **2010**; **99**; 273-286.
- [6] Najafi M R, Moradkhani H, Jung I W. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrology Process. Wiley Online Library*; **2011**; **25**; 2814–2826. [In Persian]
- [7] Abrishamchi A, Alizadeh M, Tajrishy M. Water Resources Management Scenario Analysis in Karkheh River Basin, Iran, Using WEAP Model. *Hydrological Science and Technology*; **2007**; **23**(1-4): 1-12. [In Persian]
- [8] Tisseuil C, Vrac M, Lek S, Andrew J. Wade. Statistical downscaling of river flows. *Journal of Hydrology*; **2010**; **385**; 279-291.
- [9] Pooralihosein S H, Massah Bavani A. Risk analysis and assessment of impacts of climate change on temperature and precipitation of East Azerbaijan in 2013-2022. *Journal of the Earth and Space Physics*; **2013**; **30**(4):191-208. [In Persian]
- [10] Ghamghami M, Ghahreman N. Downscaling of climatic change using a non-parametric statistical approach in Karkheh basin; *Iranian Journal of Geophysics*; **2012**; **7**(2); 157-142. [In Persian]
- [11] Forouhar L, Zahraie B, Nassery M. Evaluate the performance of DMDM in climate change impact assessment. 16<sup>th</sup> Iranian Geophysics conference; **2014**; 166-179. [In Persian]
- [12] Velazquez D, Garrote L, Andreu J, Javier F, Carrasco M, Iglesias A. A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive use systems at basin scale. *Journal of Hydrology*; **2011**; **405**; 110-122.

