

اثر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی (مطالعه موردی: سپیددشت سزار)

ملیحه مزین^{۱*}، علی محمد آخوند علی^۲، علیرضا مساح بوانی^۳، فریدون رادمنش^۴ و نرگس ظهراپی^۵

^{۱*} - نویسنده مسئول، استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان mmozayyan80@yahoo.com

^۲ - استاد، گروه هیدرولوژی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ - دانشیار، گروه منابع آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

^۴ - استادیار، گروه هیدرولوژی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۵ - استادیار، گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۲۸

چکیده

جریان کم آبی یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار هیدرولوژیکی بر وضعیت اکوسیستم‌های آبی، تولید نیروی برق-آبی، مدیریت مخازن و صنعت است. لذا ضروری است تغییرات این پارامتر در دوره‌های آتی تحت عوامل مؤثر از جمله تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا تأثیر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی حوضه آبریز سپید دشت سزار در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا توانائی مدل بارش-رواناب IHACRES برای شبیه‌سازی جریان کم آبی این حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از واسنجی و صحت-سنجی مدل مشاهده شد که مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی میانگین جریان روزانه ($R^2 - \log > 0.7$)، همچنین جریان کم آبی ($R^2 - \log > 0.6$) دارد. علاوه بر این، توانائی مدل در برابر شاخص‌های کم آبی (شامل Q_{95} ، $AM7Q$ با دوره برگشت‌های مختلف و $Q_{def S}$) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه از خروجی‌های دما و بارش ۱۰ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوی انتشار A_2 ، به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم طی دوره ۲۰۴۴-۲۰۱۵ میلادی استفاده شد. مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی این ۱۰ مدل به کار گرفته شد. در نهایت مقادیر ریزمقیاس شده دما و بارش منطقه به مدل بارش-رواناب IHACRES معرفی و جریان کم آبی در آینده بر اساس شاخص‌های کم آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییرات دو شاخص Q_{95} و $AM7Q$ در دوره آتی نسبت به گذشته، بر اساس میانه نتایج ۱۰ مدل AOGCM کاهش بود (Q_{95} -۴۰ درصد و $AM7Q$ برای دوره بازگشت‌های مختلف از ۵۲- درصد تا ۷۹- درصد). همچنین شاخص $Q_{def S}$ تغییرات افزایشی نشان داد (۳۰ درصد بر مبنای میانه نتایج مدل‌های AOGCM). هر سه شاخص نتایج همدیگر را تایید می‌نمایند و نشان می‌دهند که تغییر اقلیم مورد انتظار در آینده، تا حد زیادی جریان کم آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، جریان کم آبی، شاخص‌های جریان کم آبی، مدل بارش-رواناب، سپید دشت سزار.

The Impact of Climate Change on Low Flows (Case Study: Sepid Dasht Sesar)

M. Mozayyan^{1*}, A. M. Akhoond Ali², A. R. Massah Bavani³, F. Radmanesh⁴ and N. Zohrabi⁵

1* - Assistant professor, Department of range and watershed management, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

2- Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor, Abourraihan Pardis, Tehran University.

4- Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

5- Assistant professor, Department of range and watershed management, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

Received: 17 April 2013

Accepted: 8 September 2013

Abstract

Low flow is one of the very effectual hydrologic parameters on the state of aquatic ecosystems as well as power production, reservoir management and industry. Therefore, it is necessary to investigate the changes in this parameter in the future periods under affecting factors such as climate change. In this regard, the impacts of climate change on low flows of Sepid dasht sezar catchment were evaluated, in this research. First, the ability of IHACRES rainfall-runoff model for simulation of low flows of this catchment was evaluated. After calibration and verification of model, in this study observed that the model has a good ability for simulating of mean daily flow ($R^2\text{-log}>0.7$), also low flow ($R^2\text{-inv}>0.6$). In addition, the ability of model to low flow indices (including Q_{95} , AM7Q with different return period and Q_{defS}) was evaluated. Then, The outputs of the temperature and precipitation of 10 general circulation models of the atmosphere under A_2 emission scenario was used in order to assess the effects of climate change over the period 2015-2044. LARS-WG model was applied for downscaling of the output of these 10 models. Finally, downscaled values of temperature and precipitation were introduced to the IHACRES rainfall - runoff model and the low flow in the future was assessed based on the low flow indices. Changes of two indices Q_{95} and AM7Q in the future period to the past, based on the median of 10 AOGCM model results is decreasing (-40% for Q_{95} and from -52% to -79% for AM7Q with different return period). Also, the Q_{defS} index show the increasing change (30% based on the median of AOGCM model results). All three indices have confirmed each other's results and show that the expected climate change in the future, greatly affect the low flows.

Keywords: Climate change, Low flow, Low flow indices, Rainfall - runoff model, Sepid dasht sezar.

مهم محدودکننده در بهره برداری از منابع آب است. جریان های کم آبی در صورت ادامه، می توانند باعث ایجاد خشکسالی شوند و از طرف دیگر می توانند بر عملکردهای رودخانه ای در یک منطقه مانند کیفیت آب، تامین آب آشامیدنی، تامین آب برای کشاورزی، تولید نیروی برق - آبی، صنعت، کشتیرانی، همچنین بر عملکرد اکولوژیکی و توریسم یک منطقه اثر گذارد، لذا جریان کم آبی یکی از پارامترهای هیدرولوژیکی مهم به شمار می آید.

گزارش ها و مطالعات علمی اخیر در مورد جریان کم آبی عمدتاً بیانگر تأثیر تغییر اقلیم بر جریان های کم آبی هستند. بر اساس گزارش هیأت بین الدول تغییر اقلیم^۳، به نظر می رسد که بزرگی سیلاب ها و فراوانی آنها در اغلب مناطق در حال افزایش و مقدار جریانات کم آبی در حال کاهش است (بی نام آ، ۲۰۰۸). به طور کلی بررسی رژیم و ویژگی های جریان های کم آبی منابع آب یک منطقه از جنبه های برنامه ریزی، طراحی، ساخت، نگهداری، استفاده و مدیریت مربوط به ساختارها و سیستم های مختلف مدیریتی دارای اهمیت حیاتی است (اسونتینوویک و ماریسک^۴، ۲۰۰۸). گرچه مطالعات زیادی در زمینه اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه های مختلف انجام شده است ولی در زمینه اثر تغییر اقلیم بر جریانات کم

مقدمه

تغییر آب و هوا یکی از پیچیده ترین مشکلاتی است که بشر در حال حاضر و آینده با آن مواجه خواهد بود. تاکنون محققان بسیاری کوشیده اند تا در تحلیل های خود به تبیین دقیق تأثیر تغییرات اقلیم در زمینه های مختلف بپردازند. از جمله می توان به اثر تغییر اقلیم بر کشاورزی، جنگل، هیدرولوژی، منابع آب و ... اشاره نمود. تأثیر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی مهمتر از سایر زمینه ها است. با در نظر گرفتن سیکل هیدرولوژیکی، اولین اثر تغییر اقلیم را می توان در این بخش مشاهده نمود و از طرفی، هر گونه تغییر در سیستم هیدرولوژیکی و به تبع آن منابع آب، خود بر سایر جنبه های زندگی انسان تأثیر گذار است. در میان پدیده های هیدرولوژیکی، وقایع حدی مانند سیل، خشکسالی و جریانات کم آبی از اهمیت فوق العاده ای برخوردارند. تا جایی که کاواس و همکاران^۱ (۲۰۰۶) معتقدند که فراوانی وقوع و بزرگی پدیده هایی مانند سیل و خشکسالی، دارای اثر عمیقی بر قابلیت سکنی گزینی در یک منطقه، همچنین فعالیتهای اقتصادی - اجتماعی مردمان آن منطقه می باشد. در هیدرولوژی بررسی جریان های کم آبی از چند جهت حائز اهمیت است. مازر و همکاران^۲ (۲۰۰۸) معتقدند که وضعیت جریان های کم آبی، یکی از فاکتورهای

3- Intergovernmental Panel on Climate Change
4- Sventinovic and Maricic

1- Kavvas *et al.*
2- Mauser *et al.*

برای دوره زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۳ برای داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده همچنین برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۶۰ و برای مدل‌ها و سناریوهای مختلف به‌دست آمد. نتایج نشان داد که برای سناریوی با فرض صفر (هیچ افزایش دمایی در دوره آتی نخواهیم داشت) تغییرات معنی‌داری در جریان کم‌آبی سالانه شبیه‌سازی شده در آینده نخواهیم داشت. این در حالی است که با افزایش دما در بقیه سناریوها، کاهش قابل‌توجهی در جریان کم‌آبی سالانه شبیه‌سازی شده در آینده پیش‌بینی می‌شود. همچنین مشاهده شد که پراکندگی و نوسانات سالانه زیادی در روند جریان کم‌آبی مشاهده می‌شود. اما در همه سناریوها یک روند کاهشی در مقدار جریان کم‌آبی از سال ۲۰۱۱ به سمت سال ۲۰۶۰ دیده می‌شود. همچنین آنها به بررسی شاخص جریان کم‌آبی با دوره بازگشت ۵۰ سال (NM7Q50) برای داده‌های مشاهداتی، داده‌های شبیه‌سازی با فرض صفر و داده‌های شبیه‌سازی تحت مابقی سناریوها و مقایسه آنها پرداختند و برای به دست آوردن شاخص NM7Q50، توزیع لوگ-نرمال را به داده‌های کم‌آبی سالانه برازش داده و کمترین دبی متوسط هفت روزه با احتمال وقوع ۹۸ درصد را به دست آوردند. نتایج مربوط به این بخش نشان دهنده تغییر در NM7Q50 برای فرض صفر، و کاهش شدید NM7Q50 در بقیه سناریوها بود. به طور کلی نتایج نشان داد که تغییرات شدیدی در فراوانی وقوع جریان‌های کم‌آبی حوضه در مقطع زمانی ۲۰۱۱-۲۰۶۰ رخ خواهد داد. همچنین آنها پی بردند که دبی کم‌آبی به ۵۰ درصد مقدار کنونی خود در ۲۰۳۰ و به یک سوم مقدار کنونی خود در ۲۰۶۰ می‌رسد که مجموعه این شرایط نشان‌دهنده تغییرات شدیدی است که در وضعیت جریان‌های کم‌آبی رخ خواهد داد. هوانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۳) وضعیت جریان‌های کم‌آبی را در آینده با استفاده از سه مدل RCM به تصویر کشیدند. این مطالعه در پنج رودخانه بزرگ کشور آلمان و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود انجام شد. مدل اکوهیدرولوژیکی SWIM که از سه مدل اقلیمی منطقه‌ای (REMO, CCLM, Wettreg) گرفته شده است به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه در هر یک از حوضه‌های مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. جریان کم‌آبی ۵۰ ساله برای دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۰ برآورد شد و دوره بازگشت آن برای دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۶۰ و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ با استفاده از توزیع مقادیر حدی تعمیم داده شده^۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. جریان کم‌آبی ۵۰ ساله در بخش‌های غربی، جنوبی و بخش‌هایی از آلمان مرکزی بعد از سال ۲۰۶۱ احتمالاً با فراوانی بیشتری رخ خواهد داد (این نتیجه توسط ۸۰ درصد مدل‌ها نشان داده شد). دوره کم‌آبی در شرایط کنونی (از آگوست تا سپتامبر) در اواخر قرن ۲۱ ممکن است تا اواخر پاییز ادامه یابد. در این مطالعه علاوه بر شاخص جریان کم

آبی و بررسی شاخص‌های کم‌آبی تحت اثر تغییر اقلیم در دنیا، مطالعات محدود تری صورت گرفته است.

دی‌ویت و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در مطالعه خود اثر تغییر اقلیم را بر جریان کم‌آبی در رودخانه میوز مورد بررسی قرار دادند. آنها به منظور بررسی جریان کم‌آبی از شاخص میانگین دبی تابستانی (Q_{aveS}) و حجم تجمعی کمبود جریان فصلی (Q_{def}) استفاده کردند و معتقدند که این شاخص‌های فصلی کمتر به نوسانات ناشی از عوامل انسانی حساس‌اند. نتایج نشان داد که میانگین تابستانی دبی (Q_{aveS}) در دوره آتی به نصف مقدار خود در دوره پایه و حجم تجمعی کمبود جریان فصلی (Q_{def}) به چهار برابر مقدار خود در دوره پایه خواهد رسید.

باشر و همکاران^۲ (۲۰۱۰) در چین و در حوزه آبریز رودخانه کایدو به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر وقایع حدی هیدرولوژیکی (جریان پرابی، جریان کم‌آبی) پرداختند. آنها متغیرهای اقلیمی دما، بارندگی و پتانسیل تبخیر و تعرق را به کمک مدل‌های گردش عمومی جو و با استفاده از دو سناریوی انتشار A_2 و B_1 تخمین زدند. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که شدت سیلاب و خشکسالی در اثر تغییر اقلیم افزایش معنی‌دار خواهد داشت. باجیوس و همکاران^۳ (۲۰۱۰) نیز در حوزه‌های آبریز بلژیک اثر هیدرولوژیکی تغییر اقلیم را از جنبه وقایع حدی آن مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از مدل‌های اقلیمی (۱۱ مدل اقلیمی منطقه‌ای، RCMs) و با اعمال دو سناریوی انتشار A_2 و B_2 دو متغیر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل را برای اواخر قرن بیستم شبیه‌سازی کردند. آنها در مطالعه خود به بررسی و تحلیل میانگین جریان و وقایع حدی شامل جریان کم‌آبی و جریان پرآبی پرداختند. اگر نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی (کاهش بارندگی در تابستان و افزایش آن در زمستان، افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در کل سال) به صورت ترکیبی بررسی شود می‌توان نتایج حاصل از بررسی فراوانی وقوع جریان کم‌آبی و جریان پرآبی را تحلیل کرد که نشان از افزایش فراوانی کم‌آبی در تابستان دارد. از سوی دیگر در زمستان یعنی هنگامی که جریان‌های پرآبی رخ می‌دهند، اثر افزایش بارندگی پیش‌بینی شده ناشی از تغییر اقلیم با افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل کاهش می‌یابد که این‌ها همه در نتایج مربوط به تحلیل فراوانی وقایع حدی مشاهده شده بود. مازر و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقدار و فراوانی وقوع جریان‌های کم‌آبی در حوزه آبریزی در اروپای مرکزی پرداختند. در این مطالعه، پس از به کارگیری مدل‌های اقلیمی و استفاده از نتایج پردازش شده آنها در مدل هیدرولوژیکی، جریان آب برای سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۶۰ شبیه‌سازی شد. به منظور بررسی کم‌آبی از شاخص کمترین دبی متوسط هفت روزه در سال استفاده شد (NM7Q). این شاخص

1- Wit *et al.*2- Basher *et al.*3- Baguis *et al.*4- Huang *et al.*

5- Generalized extreme value distribution

ترتیب می توان به نهایی ترین حد تأثیر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی پی برد) مربوط به چهارمین گزارش ارزیابی IPCC (AR4) استفاده شد، که مشخصات آنها در جدول (۲) ارائه شده است. در این مقاله برای هر مدل شماره‌ای تعیین شده که در جدول در کنار نام مدل آورده شده است.

ریز مقیاس نمایی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های GCMs در مطالعات ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها، نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد (مساح بوانی، ۱۳۸۵). به طور کلی دو روش برای ریزمقیاس نمایی وجود دارد: آماری و دینامیکی (فوولر و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه از روش آماری (مدل LARS-WG) استفاده شد. یکی از مزیت‌های مهم روش آماری ارزانی و ساده بودن آنها است. مزیت دیگر این روش‌ها این است که می‌توانند اطلاعات مربوط به یک منطقه خاص را تهیه کنند که در بسیاری از مطالعات تغییر اقلیم مهم و اساسی است. مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوا است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود. به طور کلی مطابق تحقیقات مختلف ثابت شده است که مدل LARS-WG در شبیه‌سازی مقادیر روزانه و مقادیر حدی متغیرهای هواشناسی در اقلیم‌های مختلف به شکل مناسبی عمل کرده است (کیان و همکاران، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸؛ سمنوف و همکاران، ۱۹۹۸؛ سمنوف، ۲۰۰۸). در همین راستا کارایی دو مدل LARS-WG و WGEN (دو مدل معروف مولد آب و هوا با استفاده از زنجیره مارکف) در ۱۸ ایستگاه در آمریکا، اروپا و آسیا توسط سمنوف و همکاران (۱۹۹۸) بررسی شد و عملکرد بهتر مدل LARS-WG نسبت به WGEN در بازسازی میانگین ماهانه بارندگی و دما به دلیل داشتن تعداد پارامترهای بیشتر و استفاده از توزیع‌های پیچیده‌تر ارائه گردید. در آسیا نیز تاکنون چندین مطالعه مبتنی بر مدل LARS-WG انجام و کارایی مدل مذکور در تولید داده‌های اقلیمی به اثبات رسیده است (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۴؛ بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۶؛ بذرافشان و همکاران، ۱۳۸۸). این مدل سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند و از سه بخش اصلی تشکیل شده است: واسنجی مدل، ارزیابی مدل، ایجاد داده‌های هواشناسی. ابتدا توانمندی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی دمای روزانه ایستگاه خرم آباد و بارش

آبی با دوره بازگشت ۵۰ سال، حجم کمبود جریان ۵۰ ساله نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج مربوط به این شاخص حاکی از الگوی تغییرات زمانی و مکانی مشابه با کم آبی است (با شدت کمتر و اعتماد کمتر).

در ایران نیز گرچه مطالعات متعددی روی خشکسالی، جریان‌های حداقل و موارد مربوط به آن صورت گرفته، اما مرور منابع نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تأثیر تغییرات اقلیم بر جریانات کم آبی انجام نشده است. تحقیق حاضر درصدد بررسی وضعیت جریانات کم آبی از جنبه‌های مختلف آن، تحت تأثیر تغییر اقلیم احتمالی در آینده نزدیک در حوضه سپید دشت سزار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی این تحقیق، حوضه آبریز سپید دشت سزار، یکی از زیرحوضه‌های بزرگ رودخانه سزار با مساحت ۷۱۷۴ کیلومتر مربع می‌باشد. ایستگاه آبسنجی این زیرحوضه در شهرسپیددشت و در فاصله حدود ۱۰۰ متری بالادست محل تلاقی دو شاخه زاز و سزار، در مختصات جغرافیایی ۲۰° ۵۳' ۴۸" طول شرقی و ۳۳° ۱۲' ۴۹" عرض شمالی در ارتفاع ۹۷۰ متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه حوضه ۴۶۷ میلی‌متر، ارتفاع از سطح دریای حداکثر، حداقل و متوسط حوضه به ترتیب ۴۰۱۵، ۹۷۰ و ۲۰۳۹ متر از سطح دریا است. داده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در این مطالعه شامل جریان روزانه مشاهداتی در دوره ۲۰۰۸-۱۹۶۶ است که از ایستگاه آبسنجی سپید دشت سزار به دست آمد. همچنین داده‌های مشاهداتی دمای روزانه از ایستگاه سینوپتیک خرم آباد در دوره ۲۰۰۷-۱۹۶۱ و داده‌های مشاهداتی باران روزانه از ایستگاه باران سنجی رحیم آباد در دوره ۲۰۰۷-۱۹۸۵ تهیه شد. داده‌های دما و باران به منظور واسنجی مدل بارش-رواناب و همچنین مدل ریزمقیاس نمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و داده‌های جریان، علاوه بر واسنجی مدل بارش-رواناب، برای استخراج شاخص‌های کم آبی مورد استفاده هستند. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را به همراه ایستگاه‌های مربوط نشان می‌دهد. مشخصات مربوط به این ایستگاه‌ها در جدول (۱) آمده است.

تولید سناریوهای اقلیمی منطقه در دوره آتی

به منظور بررسی تغییرات اقلیم در آینده، دو متغیر بارندگی و دما با مقیاس زمانی ماهانه، با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو برای دو دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) و دوره آتی (۲۰۴۴-۲۰۱۵) تولید شد. در حال حاضر ۲۱ مدل اقلیمی عمومی در نقاط مختلف جهان مورد استفاده یا در حال توسعه است. در این تحقیق، از خروجی ۱۰ مدل GCMs تحت سناریوی انتشار A2 (در سناریوی انتشار A2 بیشترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای پیش‌بینی شده است. به این

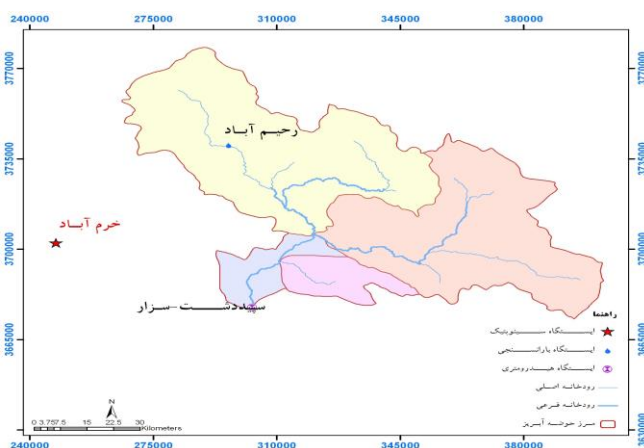
1-Fowler et al.

2- Qian et al.

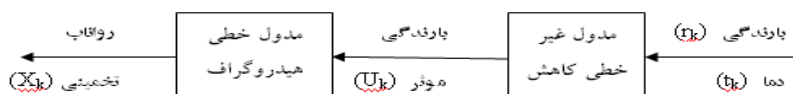
3- Semenov et al.

فایل اول از داده‌های روزانه مشاهداتی و فایل دوم از خروجی داده‌های GCMs به دست می‌آید. در این تحقیق ده فایل سناریو با استفاده از خروجی ده مدل GCMs در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) تهیه و آینده (۲۰۴۴-۲۰۱۵) برای معرفی به مدل LARS-WG تهیه و به مدل معرفی گردید. به این ترتیب داده‌های دما و بارش روزانه منطقه برای دوره ۲۰۴۴-۲۰۱۵ توسط ده مدل GCM تولید شد.

مشاهداتی روزانه ایستگاه رحیم آباد در دوره ۲۰۰۷-۱۹۸۵ (شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفته و سپس ارزیابی مدل از طریق مقایسه پارامترهای آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های مصنوعی تولید شده توسط مدل انجام می‌گیرد. در نهایت، به منظور تولید داده‌های هواشناسی، مدل LARS-WG نیاز به دو فایل اساسی مشخص‌کننده رفتار اقلیم در گذشته (*WG) و سناریوی تغییر اقلیم (*Sce) دارد.



شکل ۱- حوزه سپید دشت سزار به همراه ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق



شکل ۲- چگونگی شبیه‌سازی بارش رواناب مدل IHACRES همراه با مدول‌های خطی و غیر خطی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	داده مورد استفاده	طول دوره آماری ایستگاه
سپید دشت سزار	آب سنجی	۴۸/۵۳	۳۳/۱۲	دبی روزانه	۱۹۶۶-۲۰۰۸
رحیم آباد	باران سنجی	۴۸/۴۸	۳۳/۴۷	باران روزانه	۱۹۸۵-۲۰۰۷
خرم آباد	سینوپتیک	۴۸/۱۷	۳۳/۲۶	دمای روزانه	۱۹۶۱-۲۰۰۷

جدول ۲- مشخصات ۱۰ مدل گردش عمومی اتمسفر- اقیانوس مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	مخفف مدل	گروه موسس	قدرت تفکیک درجه (طول × عرض)	سناریوهای انتشار
BCM2.1 (1)	BCM2	BCCR(Norway)	۲/۸ × ۲/۸	A ₂ , B ₁
CNRM-CM3 (2)	CNRM3	CNRM(France)	۱/۹ × ۱/۹	A2,B1,A1B
CSIRO-MK3.0 (3)	CSMK3	ABM(Australia)	۱/۹ × ۱/۹	A2,B1,A1B
GFDL-CM2.1 (4)	GFCM2.1	NOAA/GFDL(USA)	۲/۵ × ۲/۰	A2,B1,A1B
HADCM3 (5)	HADCM3	UKMO(UK)	۳/۷۵ × ۲/۷۵	A2,B1,A1B
HADGEM1 (6)	HADGEM	HCCPR(UK)	۱/۷۵۸ × ۱/۲۵	A ₂ , A ₁ B
INMCM3 (7)	INCM3	INM(Russia)	۵ × ۴	A ₁ B, A ₂ , B ₁
IPSL-CM4 (8)	IPCM4	IPSL(France)	۲/۵ × ۳/۷۵	A2,B1,A1B
NCARCCSM3 (9)	NCCCSM	NCAR (USA)	۱/۴ × ۱/۴	A1B, A2, B1
NCARPCM-Mean (10)	NCPCM	NCAR (USA)	۲/۸ × ۲/۸	A1B, A2, B1

مدل بارش-رواناب IHACRES

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی در آینده نیاز به یک مدل هیدرولوژیکی است که با استفاده از سناریوهای اقلیمی بتواند جریان روزانه را برای دوره آتی (۲۰۴۴-۲۰۱۵) شبیه سازی کند. مدل بارش رواناب IHACRES یک مدل پیوسته دینامیکی در مقیاس حوزه آبریز^۱ است که برای حوزه های آبریز با مساحت ۴۹۰ مترمربع در چین تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع در انگلیس با موفقیت به کار گرفته شده است (کروک و همکاران^۲، ۲۰۰۵). مدل بارش رواناب IHACRES توسط جکمن و هورمبرگر^۳ (۱۹۹۳) ارائه شد. اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش^۴ و مدول خطی هیدروگراف^۵ تشکیل می شود. برای این منظور در ابتدا بارندگی rk و دما tk در هر گام زمانی k توسط مدول غیر خطی، به بارندگی موثر uk تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می شود (شکل ۲). جزییات مربوط به چگونگی عملکرد مدل در جکمن و هورمبرگر (۱۹۹۳) قابل دسترسی است.

واسنجی مدل دارای دو مرحله اصلی است: تعیین دوره واسنجی و ساخت مدل. در مرحله اول از طریق سعی و خطا بهترین دوره واسنجی از میان سال های آماری موجود تعیین می شود. ساخت مدل نیز خود شامل دو مدول خطی و غیر خطی است. در مدول خطی ابتدا، میزان تأخیر میان بارندگی و پاسخ رواناب مربوط به آن تعیین می شود. سپس تابع متغیر ابزاری^۶ به منظور کنترل مدول خطی از میان توابع موجود انتخاب می شود. در مدول غیر خطی نیز امکان تعیین مقادیر بهینه پارامتر های مدل از طریق سعی و خطا و با بررسی معیارهای خطا و همبستگی مربوط به هر یک از وضعیت های ممکن، در نرم افزار مربوطه تعبیه شده است. این پارامترها شامل سرعت خشک شدن در دمای مرجع^۷ (tw)، وابستگی دمایی سرعت خشک شدن^۸ (f)، دمای مرجع^۹ ($tref$)، آستانه رطوبتی برای تولید جریان^{۱۰} (I)، قدرت رطوبتی خاک^{۱۱} (p) هستند.

برای واسنجی مدل IHACRES داده های مشاهداتی جریان روزانه ایستگاه هیدرومتری سپید دشت سزار به عنوان خروجی حوضه مد نظر قرار گرفت. همچنین از بارندگی ایستگاه رحیم

آباد و دمای ایستگاه سینوپتیک خرم آباد در مقیاس روزانه به عنوان ورودی مدل، برای دوره ۲۰۰۷-۱۹۸۵ استفاده شد. دو دوره آماری ۱۹۹۶-۱۹۹۳ و ۱۹۹۱-۱۹۹۰ به ترتیب برای واسنجی و صحت سنجی مدل تعیین گردید. استفاده از ایستگاه سینوپتیک خرم آباد در خارج از منطقه مورد مطالعه، به دلیل داشتن آمار طولانی و کامل دما است و سایر ایستگاه های موجود در منطقه دارای دوره آماری کوتاه با نواقص زیاد می باشند. شکل ۳ مقایسه دمای ماهانه ایستگاه خرم آباد را با ایستگاه سپید دشت سزار نشان می دهد. همانطور که از شکل بر می آید تفاوت چندانی میان دمای دو ایستگاه مذکور وجود ندارد. چندین ایستگاه باران سنج در منطقه مطالعاتی وجود دارند که به دلیل آمار ناکافی حذف شدند و فقط دو ایستگاه رحیم آباد و تیره درود دارای آمار نسبتاً طولانی تر باران هستند. به لحاظ میزان همبستگی با مقدار دبی در خروجی حوضه، هر دو ایستگاه رحیم آباد و تیره درود دارای مقدار یکسانی هستند (۰/۳۲۴ و ۰/۳۵۷) به ترتیب برای تیره درود و رحیم آباد. در مرحله واسنجی مدل، هر دو ایستگاه مورد آزمون قرار گرفت. گرچه ایستگاه باران سنجی تیره درود دارای عملکرد بهتری نسبت به باران سنج رحیم آباد می باشد اما به دلیل دوره آماری کوتاه مد نظر قرار نگرفت (دوره کوتاه آماری ایستگاه تیره درود در مرحله سناریو سازی برای مدل LARS-WG ایجاد مشکل می کرد). در نهایت ایستگاه باران سنجی رحیم آباد به منظور واسنجی مدل و استفاده در مراحل بعدی تحقیق انتخاب گردید.

برای بررسی کمی عملکرد مدل در مرحله واسنجی و صحت سنجی، از معیارهای عملکرد خطای اریب (خطای کلی در حجم جریان بر حسب میلی متر در سال) (رابطه ۱)، تغییرات الگوی جریان با دادن وزن مساوی به همه دبی ها (R^2_{log}) (رابطه ۲) و تغییرات الگوی جریان با دادن وزن بیشتری به جریان کم آبی (R^2_{inv}) (رابطه ۳) استفاده شد. روابط مربوط به این معیارها به شرح زیر است:

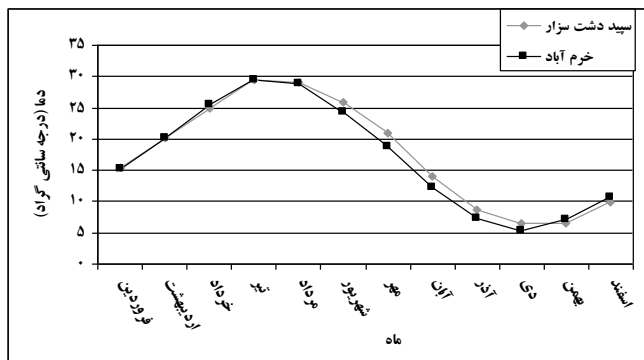
$$Bias = \frac{\sum (Q_o - Q_M)}{n} \quad (1)$$

$$R^2_{log} = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_o + \epsilon) - \ln(Q_M + \epsilon))^2}{\sum (\ln(Q_o + \epsilon) - \ln(Q_o + \epsilon))^2} \quad (2)$$

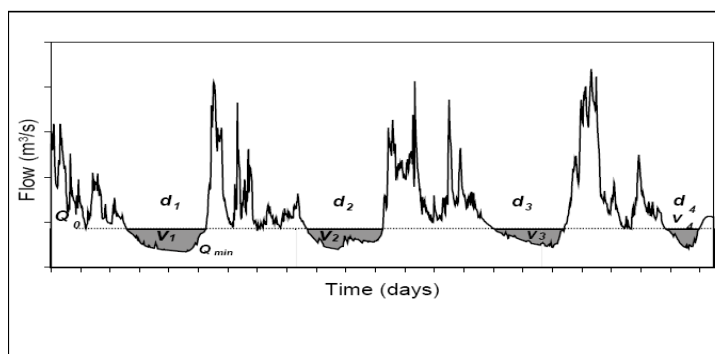
$$R^2_{inv} = 1 - \frac{\sum \left(\frac{1}{Q_o + \epsilon} - \frac{1}{Q_M + \epsilon} \right)^2}{\sum \left(\frac{1}{Q_o + \epsilon} - \frac{1}{Q_o + \epsilon} \right)^2} \quad (3)$$

در روابط (۱)، (۲) و (۳)، Q_M و Q_o به ترتیب دبی جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده است، همچنین n و ϵ به ترتیب تعداد داده ها و خطا را نشان می دهند.

- 1- Dynamic lumped parameters with catchment-scale
- 2- Croke *et al.*
- 3- Jakeman and Hornberger
- 4- Non - linear loss module
- 5- Linear unit hydrograph module
- 6- Instrumental Variable
- 7- Drying rate at reference temperature
- 8- Temperature dependence of drying rate
- 9- Reference temperature
- 10- Moisture threshold for producing flow
- 11- Power on soil moisture



شکل ۳- مقایسه دمای ماهانه ایستگاه خرم آباد (۸۵-۱۳۳۹) با ایستگاه سپید دشت سزار مربوط به دوره حداکثر نه ساله (۸۶-۱۳۷۷)



شکل ۴- تعیین ویژگیهای کمبود به روش سطح آستانه (منبع: سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۰۸)

ترتیب نزولی مرتب و رتبه دهی می شوند. فراوانی تجاوز $(EFQi)$ از یک مقدار معین دبی از رابطه $EFQi = i/N$ به دست می آید که i رتبه دبی و N تعداد کل داده ها است. همچنین این شاخص را می توان از منحنی تداوم جریان حوضه به دست آورد.

میانگین کمترین دبی سالانه^۲، $MAM (n \text{ day})$: کمترین دبی سالانه^۳، را می توان از یک سری روزانه جریان با انتخاب کمترین دبی در سال استخراج و میانگین آن را به عنوان MAM در نظر گرفت. کمترین دبی را از تداوم های مختلفی می توان گرفت که معمولاً ۱، ۷، ۱۰، ۳۰ و ۹۰ روز مورد استفاده است. به این ترتیب که یک میانگین متحرک چند روزه (۷، ۱۰، ۳۰ و ...) از داده ها به دست می آید و سپس کمترین عدد مربوط به هر سال را به عنوان جریان کم آبی در آن سال در نظر می گیرند. میانگین کمترین دبی سالانه با تداوم هفت روز به عنوان جریان مربوط به هوای خشک^۵ (هیندلی،

شاخص های جریان کم آبی

اسماختین^۱ (۲۰۰۱) در مطالعه خود، به مروری بر شاخص های جریان کم آبی پرداخت. اگر چه شاخص های مختلف جریان کم آبی جنبه های مختلف رژیم کم آبی یک رودخانه را بیان می کنند، به طور قطع، با هم همبستگی بالایی دارند. در این مطالعه جریان ۹۵ درصد $(Q95)$ ، کمترین میانگین هفت روزه دبی در سال با دوره بازگشت های مختلف $(AM7Q)$ و حجم کمبود دبی فصلی $(Qdef)$ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. قابل ذکر است که این شاخص ها از داده های دبی روزانه مشاهداتی برای دوره ۲۰۰۸-۱۹۶۶ و از دبی شبیه سازی شده توسط مدل بارش- رواناب برای دوره آتی ۲۰۴۴-۲۰۱۵ استخراج گردید.

جریان ۹۵ درصد $(Q95)$: این شاخص یکی از معمول ترین شاخص های جریان کم آبی مؤثر است و به عنوان جریانی که در ۹۵ درصد از موارد، جریان متجاوز از آن است، تعریف می شود (دبی نام ب، ۲۰۰۸). برای محاسبه این شاخص، داده های دبی روزانه به

2- exceedance frequency
3- Mean Annual Minima
4- Annual Minima
5- Dry Weather Flow

1- Smakhtin

این شاخص برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان کم آبی، این است که این شاخص نسبت به نوسانات انسان-عامل کمتر حساس است (دی ویت و همکاران^۶، ۲۰۰۷).

در این تحقیق داده های دبی روزانه در دوره مشاهداتی و آتی مبنای محاسبه این شاخص قرار گرفت. حجم کمبود برابر است با مجموع حجم مربوط به (دبی روزانه - دبی آستانه) برای کلیه روزهایی که دبی روزانه کمتر از دبی آستانه باشد. انتخاب سطح آستانه تحت تأثیر هدف، منطقه مورد مطالعه و دسترسی به داده ها می باشد (بی نام ب، ۲۰۰۸). برای داده های روزانه، درصدی از منحنی تداوم جریان را می توان به عنوان سطح آستانه تعیین کرد. برای رودخانه های دائمی می توان از درصدهای نسبتاً پایین در منحنی تداوم جریان از دبی ۷۰ درصد تا دبی ۹۰ درصد استفاده کرد (بی نام ب، ۲۰۰۸). در این مطالعه دبی ۷۰ درصد به عنوان سطح آستانه مد نظر قرار گرفت.

نتایج و بحث

دما و بارش منطقه در دوره های آتی

روند تغییرات دما و بارش سالانه در دوره مشاهداتی به منظور مشخص ساختن وضعیت متغیرهای مذکور در گذشته، با استفاده از شکل های (۵) و (۶) نشان داده می شود. آزمون من-کندال برای تعیین معنی دار بودن روند احتمالی داده های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. روند معنی دار بودن در سری داده های باران مشاهداتی با توجه به نتایج آزمون من-کندال در سطح معنی داری پنج درصد دیده نشد ($t_{0.05} = 0.081$, $p = 0.734$) در حالی که سری داده های متوسط دمای سالانه، با توجه به آزمون مذکور روند معنی دار افزایشی در سطح ۵ درصد نشان می دهند ($t_{0.05} = 0.59$, $p = 0.004$). همان-طور که بیان شد، سناریوهای دما و بارش در دوره آتی توسط مدل-های گردش عمومی جو شبیه سازی می شوند. شکل های (۷) و (۸) مقدار تغییرات بارش و دما در دوره آتی ۲۰۴۴-۲۰۱۵ مربوط به مدل های مختلف AOGCM را در مقایسه با مقدار مشاهداتی آن نشان می دهند. با توجه به شکل (۷) در اغلب ماهها، کاهش مقدار بارش نسبت به گذشته پیش بینی می شود. شکل (۸) نشان از افزایش دما (حدود ۱ تا ۲ درجه سلسیوس) در تمامی ماهها دارد. در شکل (۷) برای سه ماه میلادی جولای، اگوست و سپتامبر مقدار باران مشاهداتی صفر و یا ناچیز است، لذا از آوردن نمودار جعبه ای مربوطه صرف نظر شده است.

(۱۹۷۳) شناخته می شود. سری کمترین دبی سالانه را می توان برای تعیین یک تابع توزیع به منظور تخمین فراوانی یا دوره بازگشت جریان کم آبی استفاده کرد (بی نام ب، ۲۰۰۸). در این مطالعه، کمترین دبی سالانه با تداوم هفت روز (AM7Q)، به منظور تحلیل فراوانی جریان های کم آبی، مد نظر قرار گرفت. استفاده از تداوم هفت روزه باعث حذف تغییرات روز به روز جریان می شود. علاوه بر این تحلیل بر اساس میانگین هفت روزه، کمتر به خطاهای اندازه گیری حساس است و در اغلب موارد اختلاف زیادی بین جریان های کم آبی یک روزه و هفت روزه وجود ندارد (اسماختین، ۲۰۰۱).

به منظور محاسبه این شاخص، ابتدا یک میانگین متحرک هفت روزه از داده های روزانه جریان به دست می آید و سپس کمترین میانگین متحرک هفت روزه در هر سال به عنوان جریان کم آبی در آن سال معرفی می گردد. حال با در دست داشتن سری جریان های کم آبی برای دوره آماری از توزیع های مختلف آماری شامل؛ لوگ نرمال دو متغیره، لوگ نرمال سه متغیره، پیرسون تیپ سه و گامبل استفاده و به این داده ها برازش داده می شود. پارامترهای توزیع نیز با دو روش گشتاورها و بیشینه درست نمایی به دست آمد و در نهایت با توجه به مقدار خطا و آزمون کای اسکور بهترین توزیع معین شد. در نهایت با استفاده از آن توزیع، دبی کم آبی با احتمال وقوع های ۵۰ درصد، ۹۰ درصد، ۹۵ درصد و ۹۹ درصد (به ترتیب متناظر با دوره بازگشت های ۲، ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ سال) به دست آمد.

حجم کمبود دبی فصلی^۱، (Q_{det}): کمبود جریان، به

دوره هایی گفته می شود که رودخانه به زیر یک آستانه معین می رسد که تحت عنوان خشکی یا کمبود های بحرانی اطلاق می شود (هیسدال و همکاران^۲، ۲۰۰۴). جهت انتخاب و تعیین کمبود جریان دو روش اصلی وجود دارد، روش سطح آستانه^۳ و الگوریتم پیک دنباله ای^۴ (بی نام ب، ۲۰۰۸). در این تحقیق از روش سطح آستانه استفاده شد. این روش برای تخمین فراوانی دوره های کم آبی و طراحی و اجرای مخازن تنظیمی جریان استفاده می شود (بی نام ب، ۲۰۰۸). شکل (۴) نحوه تعیین زمان وقوع، تداوم دوره خشک و حجم کمبود به ازای حد آستانه را نشان می دهد. حد آستانه (Q_0) یک سطح جدا کننده است که زمانی که مقدار جریان به کمتر از این مقدار برسد (شکل ۴)، رودخانه در شرایط کمبود قرار می گیرد. تداوم خشکی (d_i) و حجم کمبود (V_i) به عنوان مشخصه های خشکی نقطه ای توصیه شده اند (هیسدال و تالاکسن^۵، ۲۰۰۰). در مطالعات تغییر اقلیم اغلب حجم کمبود تعیین و مورد مقایسه قرار می گیرد. یکی از برتری های

1- Season Discharge Deficit Volume

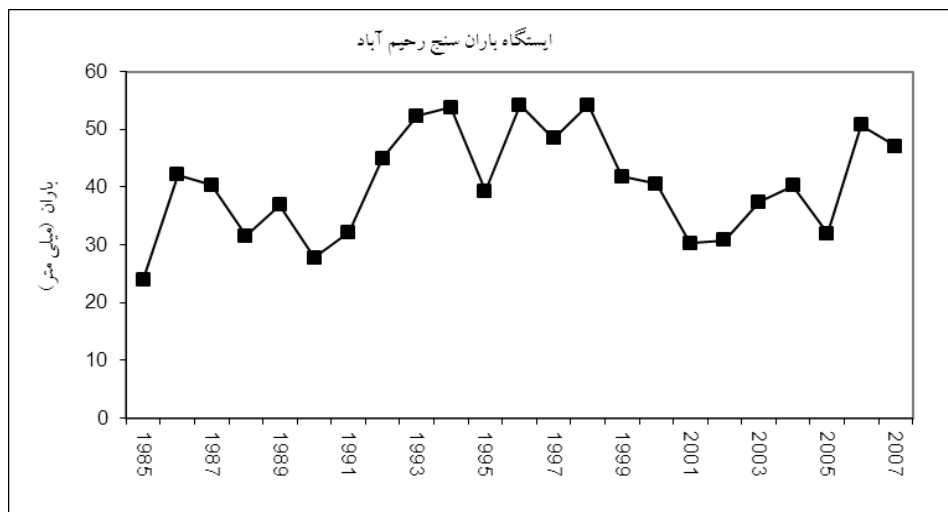
2- Hisdal *et al.*

3- Threshold-Level method

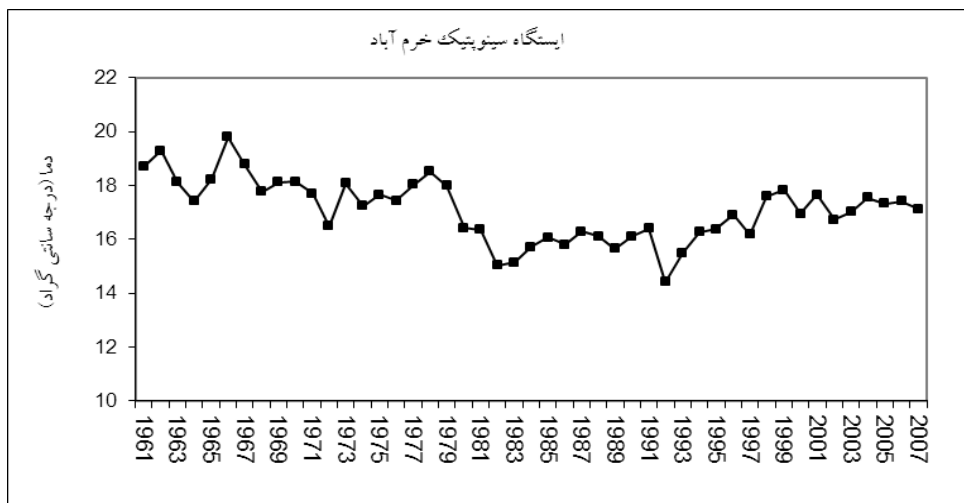
4- Sequent Peak algorithm

5- Hisdal and Tallaksen

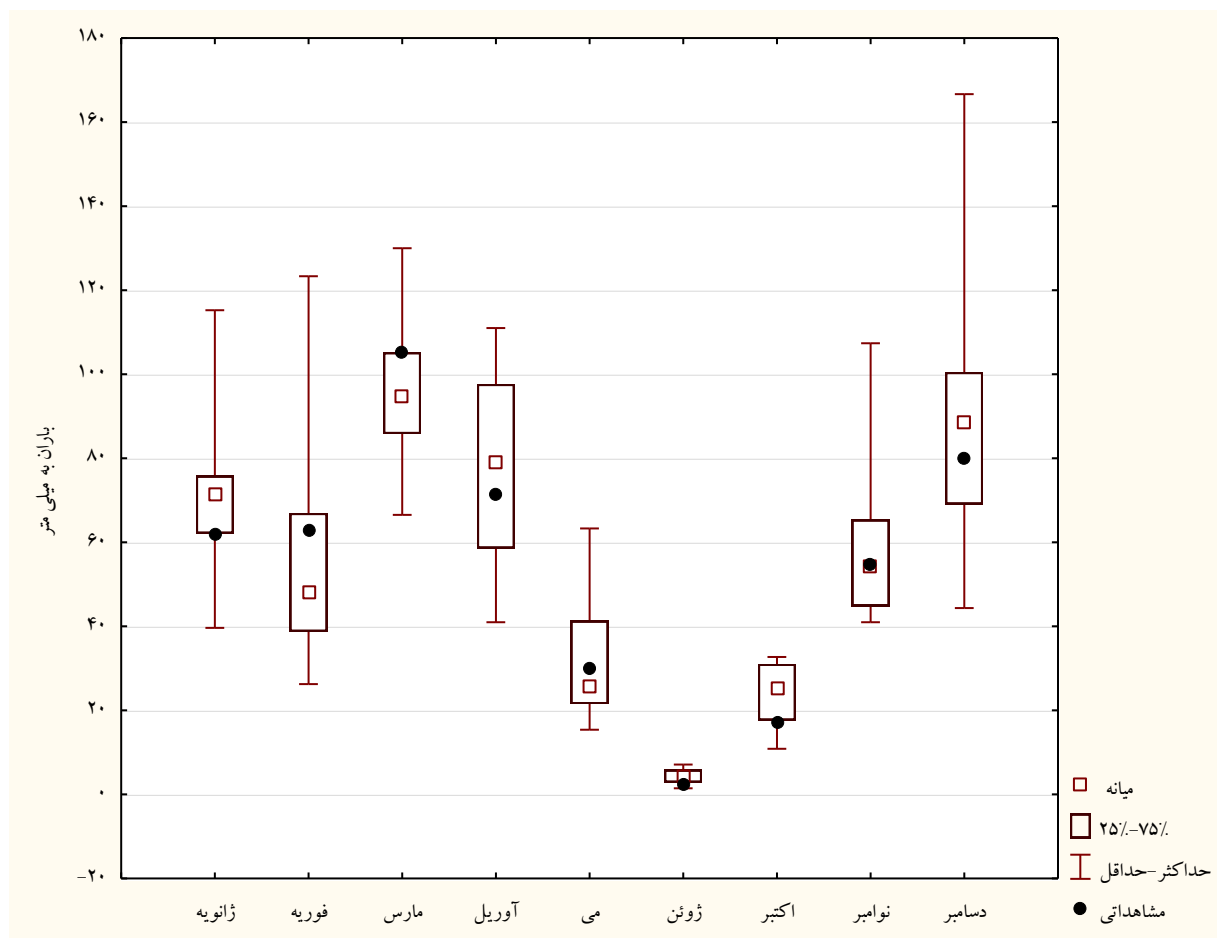
6- De Wit *et al.*



شکل ۵- روند تغییرات مقدار بارش سالانه در دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۰۷



شکل ۶- روند تغییرات متوسط سالانه دمای ایستگاه خرم آباد در دوره مشاهداتی ۱۹۶۱-۲۰۰۷

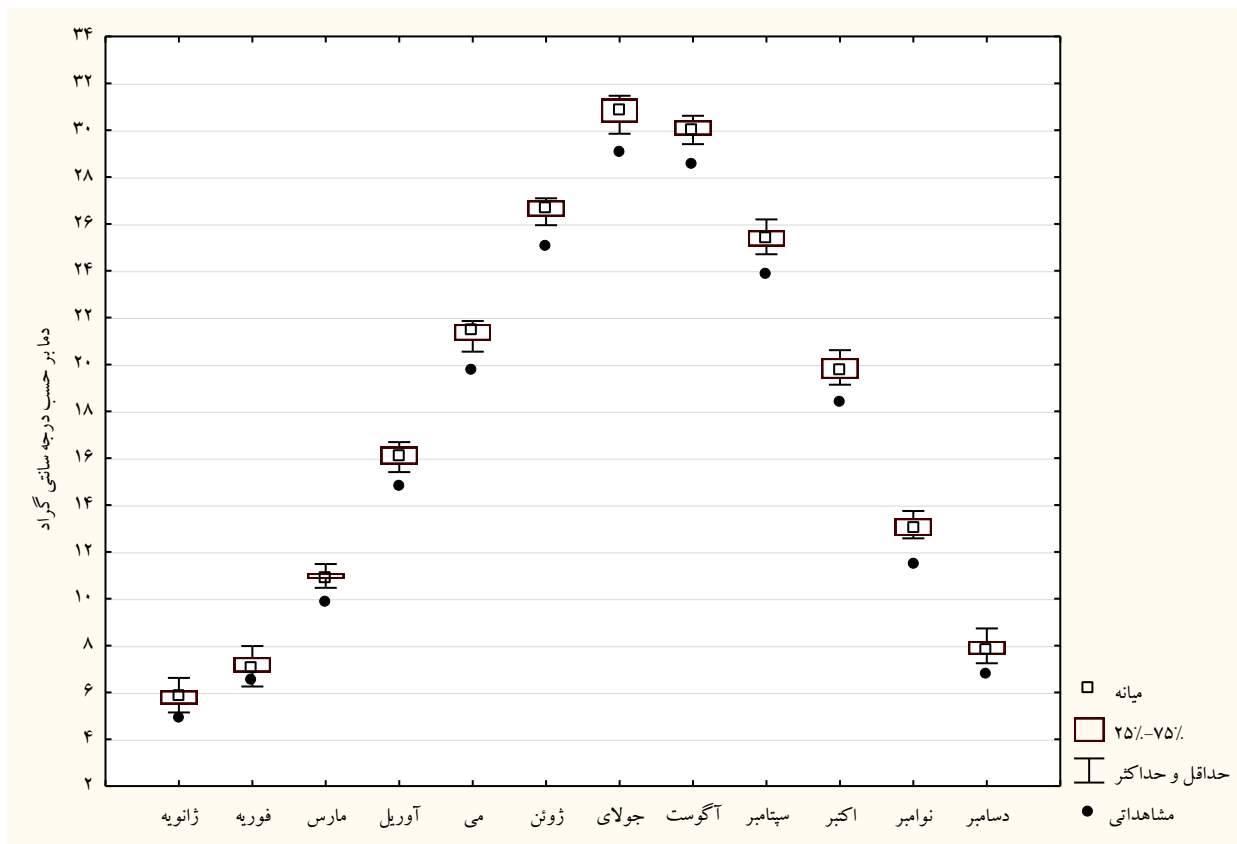


شکل ۷- دامنه تغییرات مقدار باران شبیه سازی شده توسط ۱۰ مدل AOGCM در دوره آبی ۲۰۱۵-۲۰۴۴ و مقایسه آن با مقدار باران در دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۰۷

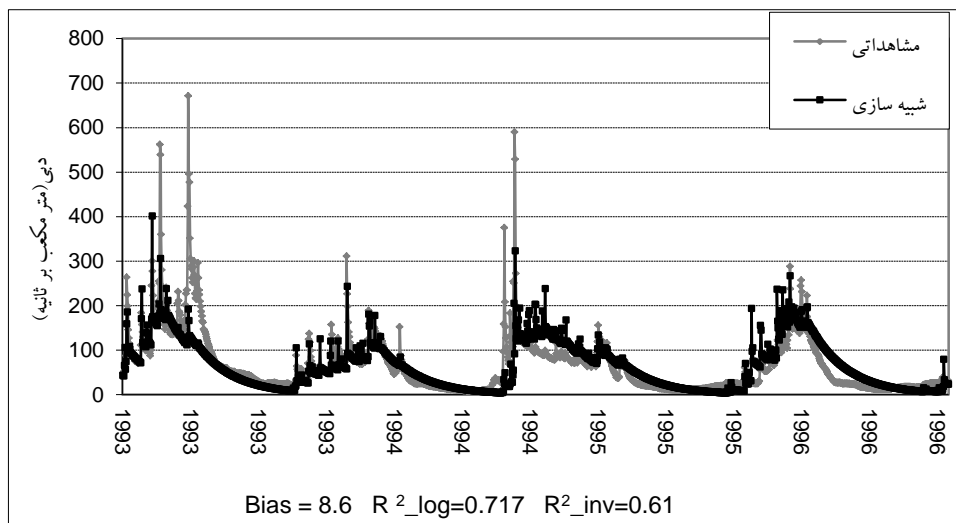
واسنجی مدل بارش-رواناب

سزار با استفاده از مدل IHACRES برای شاخص های کم آبی در دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۷ مورد صحت سنجی قرار گرفتند. به این ترتیب که دبی ۵۰ درصد، ۹۰ درصد و ۹۵ درصد از منحنی تداوم جریان مربوط به داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده جریان روزانه توسط مدل IHACRES برای دوره مذکور استخراج و مورد مقایسه قرار گرفتند. شاخص های مذکور را نمی توان با استفاده از داده های مربوط به یک سال معین محاسبه کرد، لذا کل دوره آماری مبنای محاسبه قرار گرفت. علاوه بر اینها شاخص حجم کمبود نیز به همین ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به این شاخص ها در جدول های (۳) و (۴) آمده است.

شکل های (۹) و (۱۰) مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل IHACRES را برای دو دوره واسنجی و صحت سنجی نشان می دهند. استفاده از معیار R^2_{inv} ، مربوط به عملکرد مدل IHACRES در شبیه سازی جریان های کم آبی است که در این مطالعه مد نظر قرار گرفت. اغلب، واسنجی و صحت سنجی مدل های هیدرولوژیکی بر اساس شباهت جریان شبیه سازی و مشاهداتی از لحاظ حجم جریان، اوج سیلاب و شکل کلی هیدروگراف متمرکز است و هیچ کدام از شاخص های کم آبی برای واسنجی یا صحت سنجی مورد استفاده قرار نمی گیرد (دی ویت و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه نتایج شبیه سازی هیدرولوژیکی جریان حوزه سپیددشت

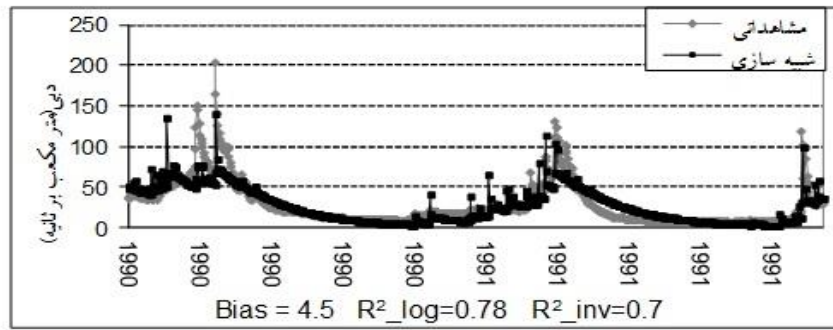


شکل ۸- دامنه تغییرات مقدار دمای شبیه سازی شده توسط مدل AOGCM در دوره آتی ۲۰۱۵-۲۰۴۴ و مقایسه آن با مقدار دما در دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۰۷

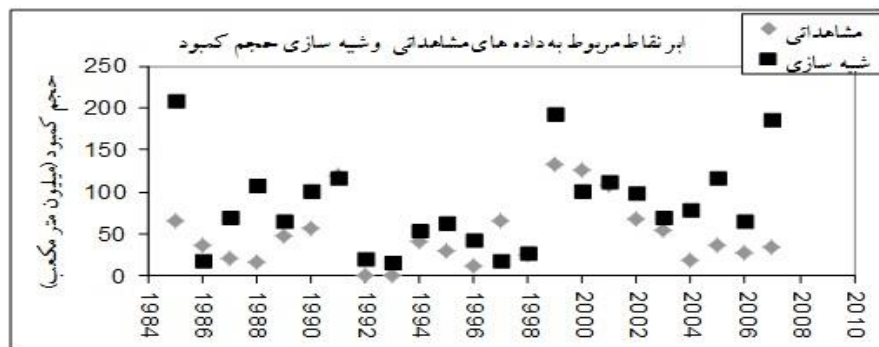


شکل ۹- جریان روزانه مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره واسنجی ۱۹۹۳-۱۹۹۶

مزین و همکاران: اثر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی ...



شکل ۱۰- جریان روزانه مشاهداتی و شبه سازی شده در دوره صحت سنجی ۱۹۹۰-۱۹۹۱

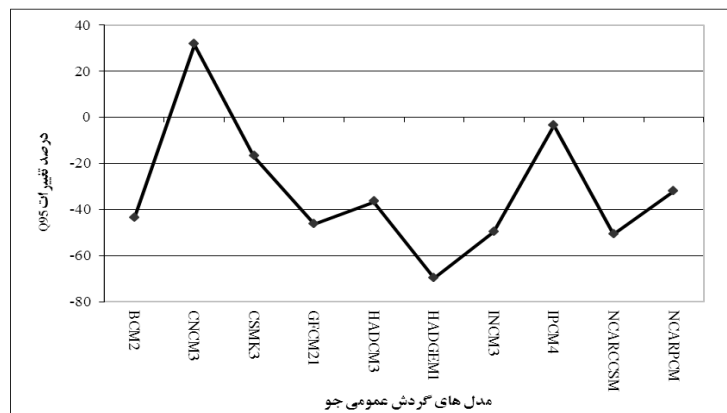


شکل ۱۱- ابر نقاط داده های مشاهداتی و شبه سازی حجم کمبود جریان در حوزه آبریز سپید دشت سزار

جدول ۳- مقایسه Q_{50} ، Q_{90} و Q_{95} مشاهداتی و شبه سازی شده با مدل IHACRES برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۷

درصد تفاوت دبی شبه سازی و مشاهداتی نسبت به

شاخص کم آبی (متر مکعب بر ثانیه)	مشاهداتی	شبه سازی	مشاهداتی
Q_{50}	۲۷/۱	۲۸/۴	۵
Q_{90}	۹/۴	۳/۹	-۵۸
Q_{95}	۷/۲	۳/۸	-۴۷



شکل شماره ۱۲- درصد تغییرات Q_{95} در آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۴) نسبت به گذشته (۲۰۰۸-۱۹۶۶)

جدول ۴- مقایسه شاخص حجم کمبود (میلیون متر مکعب) برای داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی با مدل IHACRES برای دوره ۲۰۰۷-۱۹۸۵

دوره	سال	مشاهداتی	شبیه‌سازی	درصد تغییرات نسبت به مشاهداتی	
دوره صحت سنجی	۱۹۹۰	۵۷/۸	۱۰۲/۱	۷۷	
	۱۹۹۱	۱۱۹/۹	۱۱۸/۵	-۱	
	۱۹۸۵	۶۶/۶	۲۰۸/۴	۲۱۳	
	۱۹۸۶	۳۵/۸	۱۸	-۵۰	
	۱۹۸۷	۲۰/۸	۷۰/۳	۲۳۹	
	۱۹۸۸	۱۶/۸	۱۰۹	۵۵۰	
	۱۹۸۹	۴۷/۶	۶۵/۱	۳۷	
	۱۹۹۲	۰	۲۱/۲	-	
	۱۹۹۳	۰	۱۶/۶	-	
	۱۹۹۴	۴۱/۵	۵۳/۹	۳۰	
	۱۹۹۵	۲۹/۱	۶۴/۶	۱۲۲	
	۱۹۹۶	۱۱/۷	۴۳/۹	۲۷۵	
	بقیه سال‌ها	۱۹۹۷	۶۵/۱	۱۸/۸	-۷۱
		۱۹۹۸	۲۴/۶	۲۷	۱۰
۱۹۹۹		۱۳۴	۱۹۲/۷	۴۴	
۲۰۰۰		۱۲۶/۶	۱۰۱/۶	-۲۰	
۲۰۰۱		۱۰۷/۴	۱۱۴	۶	
۲۰۰۲		۶۷/۸	۱۰۰/۶	۴۸	
۲۰۰۳		۵۴/۷	۶۹/۴	۲۷	
۲۰۰۴		۱۹/۶	۷۹/۳	۳۰۴	
۲۰۰۵		۳۵/۷	۱۱۸/۴	۲۳۱	
۲۰۰۶		۲۶/۸	۶۶/۱	۱۴۷	
۲۰۰۷		۳۵/۵	۱۸۷	۴۲۶	

جدول ۵- تعداد روزهای با دبی بحرانی کمتر از ۱۵/۹۴ متر مکعب بر ثانیه برای سال‌های ۸۷-۱۳۴۵

ماه میلادی	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تعداد روز خشک	۹	۰	۰	۰	۴۶	۲۹۹	۶۲۵	۱۰۲۰	۱۱۸۶	۱۰۶	۴۶۲	۴۹

سال‌ها حجم کمبود دارای تغییرات افزایشی است و این به علت شبیه‌سازی جریان‌های کم، کمتر از مقدار مشاهداتی است (جدول ۳). برخی از سال‌ها مدل با دقت خوبی توانسته دبی روزانه را شبیه‌سازی نماید، در صورتی‌که برخی از سال‌ها اختلاف زیادی را نشان می‌دهند. اختلاف زیاد میان شاخص کم آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در بعضی از سال‌ها می‌تواند ناشی از دخالت‌های انسانی در منطقه مانند برداشت آب و ... باشد. در چنین مواردی مدل بارش-رواناب نمی‌تواند مقدار جریان را به درستی شبیه‌سازی نماید (قابل ذکر است، اختلاف‌های زیاد میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در هر دو جدول (۳) و (۴) تا حدود زیادی مربوط به استفاده از داده‌های

همان‌طور که از جدول (۳) قابل استنتاج است مدل بارش-رواناب IHACRES مقادیر پایین جریان (Q_{90} و Q_{95}) را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است (تقریباً ۵۰ تا ۶۰ درصد). در جدول (۴) نیز شاخص حجم کمبود جریان برای دوره صحت‌سنجی مورد مقایسه قرار گرفته است. درصد تفاوت شاخص مذکور برای داده‌های شبیه‌سازی نسبت به مشاهداتی محاسبه گردید. در دوره صحت‌سنجی مقدار حجم کمبود بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است (البته در سال ۱۹۹۱ مقدار تغییرات ۱ درصد و کاهش می‌باشد). در صورتی‌که شاخص حجم کمبود برای کل دوره آماری موجود بررسی گردد، روندی مشابه مشاهده خواهد شد، به این صورت که در اغلب

می‌دهد. آزمون من-کندال به منظور بررسی تغییرات معنی‌دار احتمالی در داده‌های کم آبی مذکور مورد استفاده قرار گرفت و نشان داد که روند معنی‌داری در دوره مشاهداتی در سری داده‌های سالانه AMQ7 وجود ندارد ($t_{0.05} = -0.014$, $p = 0.901$). شکل (۱۴) تغییرات مقدار دبی با دوره بازگشت‌های مختلف را در دوره مشاهداتی با دوره آبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴) مقدار دبی در دوره آبی نسبت به دوره گذشته، برای تمامی مدل‌ها روند کاهشی دارد. کمترین و بیشترین مقدار تغییر برای این شاخص به ازای دوره بازگشت‌های مختلف متفاوت است. میانه مقدار درصد تغییرات دبی (میانگین ۱۰ مدل گردش عمومی جو) با احتمال وقوع ۵۰ درصد، ۹۰ درصد، ۹۵ درصد و ۹۹ درصد به ترتیب ۵۲ درصد، ۶۷ درصد، ۷۳ درصد و ۷۹ درصد می‌باشد که این تغییرات کاهشی است. قابل ذکر است که نتایج مربوط به این شاخص و شاخص قبل با هم مطابقت دارند.

نتایج مربوط به حجم کمبود دبی فصلی، $Q_{def s}$: یکی از شاخص‌های مهم در جریانات کم آبی، حجم کمبود است. انتخاب سطح آستانه برای منطقه تحقیق باید به دقت انجام شود. برای تعیین حد آستانه پس از ترسیم منحنی تداوم جریان برای داده‌های روزانه، مقادیر Q_{90} و Q_{70} انتخاب شدند. بر اساس این منحنی مقادیر Q_{90} و Q_{70} به ترتیب برابر با ۹ و ۱۶ متر مکعب بر ثانیه به دست می‌آید. با اعمال این سطوح بر دبی روزانه، دوره‌های خشک در منطقه مشخص شد. با استفاده از سطح آستانه Q_{90} ، دوره‌های خشک خارج از ماه‌های خشک سال قرار می‌گرفت، به همین دلیل Q_{70} به عنوان سطح آستانه مد نظر قرار گرفت و شاخص کمبود حجم جریان برای فصل مورد نظر استخراج گردید.

بازبینی و همکاران (۱۳۸۹) نیز در مطالعه خود بر خشکسالی دو حد آستانه Q_{90} و Q_{70} را برای ایستگاه پل شالو در خوزستان انتخاب کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که انتخاب Q_{90} منجر به پیدایش سال‌های بدون خشکسالی متوالی می‌گردد و ادعان می‌کنند که معیار مناسبی برای تحلیل خشکسالی نبوده و نتایج آن قابل توصیه نمی‌باشد. لذا تحلیل‌های نهایی خود را فقط بر اساس Q_{70} به انجام رسانیدند. جدول (۶)، نتایج مربوط به حجم کمبود را برای دوره مشاهداتی و دوره آبی نشان می‌دهد. هفتاد درصد مدل‌های GCM افزایش حجم کمبود فصلی جریان در آینده را نشان می‌دهند. میانه نتایج مدل‌های مختلف GCM، ۳۰ درصد افزایشی می‌باشد که افزایش حجم کمبود با نتایج مربوط به دو شاخص قبل همسو می‌باشد (همان‌طور که بیان شد حجم کمبود فقط برای شش ماه خشک سال مورد محاسبه قرار گرفت).

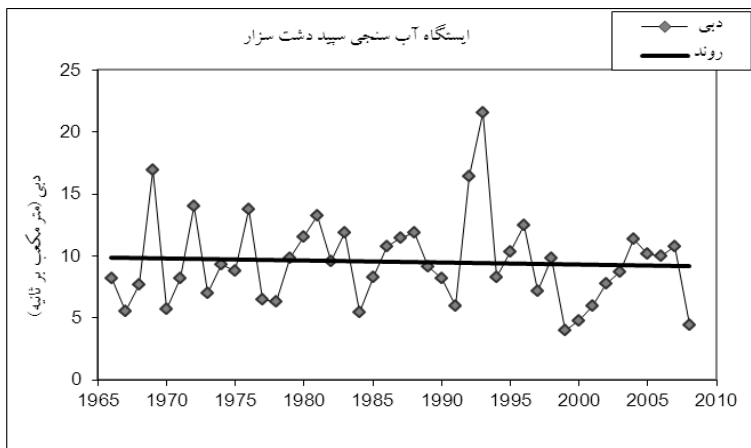
باران سنجی ایستگاه رحیم آباد برای واسنجی مدل بارش- رواناب است. ایستگاه مذکور به علت داشتن آمار طولانی تر باران نسبت به ایستگاه تیره درود انتخاب گردید در حالی که استفاده از داده‌های ایستگاه باران سنجی تیره درود برای واسنجی مدل بارش- رواناب نتایج بهتری به لحاظ شبیه‌سازی جریان روزانه ایجاد می‌کند. میزان همبستگی بین حجم کمبود جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی برای دوره ۲۰۰۷-۱۹۸۵، ۰/۶ به دست آمد ($P < 0.01$) که همبستگی نسبتاً خوبی نشان می‌دهند. در شکل (۱۱) ابر نقاط داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی حجم کمبود جریان ترسیم شده است.

به منظور محاسبه شاخص حجم کمبود ابتدا می‌بایست سطح آستانه انتخاب شود. در این مطالعه از دبی ۷۰ درصد (۱۶ متر مکعب بر ثانیه) در منحنی تداوم جریان به عنوان سطح آستانه استفاده گردید. استفاده از دبی با درصد‌های بیشتر از ۷۰ باعث می‌شد که دوره‌های خشک در ماه‌هایی بیفتند که واقعاً خشک نیستند. لذا دبی ۷۰ درصد به عنوان مناسب‌ترین دبی، برای سطح آستانه انتخاب و بر داده‌های روزانه جریان اعمال گردید. همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود برای هر ماه تعداد روزهایی که جریان به کمتر از مقدار بحرانی ۱۵/۹۴ متر مکعب بر ثانیه (Q_{70}) می‌رسد برای دوره ۱۳۸۷-۱۳۴۵ آورده شده است. بیشتر روزهای خشک در فصل تابستان و پاییز رخ می‌دهند. بنابراین شش ماه از سال (از ژوئن تا نوامبر) به عنوان دوره خشک معین شد که حجم کمبود دبی در این شش ماه محاسبه گردید.

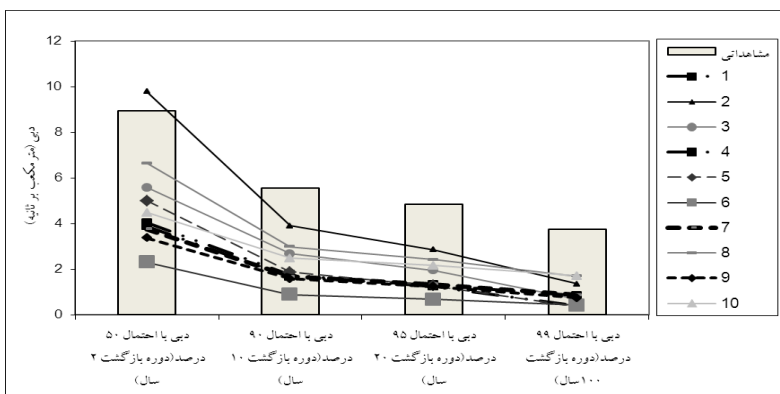
بررسی تغییرات شاخص‌های کم آبی منطقه در دوره‌های آبی

نتایج مربوط به دبی ۹۵ درصد (Q_{95}): همان‌طور که بیان شد این شاخص برای داده‌های مشاهداتی روزانه جریان (۲۰۰۸-۱۹۶۶) و داده‌های شبیه‌سازی شده روزانه جریان با استفاده از مدل بارش- رواناب در دوره ۲۰۴۴-۲۰۱۵ محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این مقایسه در شکل (۱۲) آمده است. با توجه به شکل مذکور، ۹۰ درصد مدل‌ها نشان می‌دهند که مقدار Q_{95} در آینده نسبت به دوره گذشته کاهش می‌یابد. میانه نتایج تغییرات مقدار Q_{95} برای مدل‌های مختلف GCM، ۴۰- درصد می‌باشد.

نتایج مربوط به $AMQ_{(7)}$: دومین شاخص کم آبی، کمترین میانگین سالانه دبی هفت روزه است که برای دوره بازگشت‌های مختلف به دست آمد. این شاخص هم برای سری داده‌های کم آبی مشاهداتی در دوره (۲۰۰۸-۱۹۶۶) و هم برای سری داده‌های کم آبی در دوره آبی (۲۰۴۴-۲۰۱۵) به دست آمد. ابتدا به منظور بررسی بهتر، روند تغییرات سری داده‌های AMQ_7 مشاهداتی مد نظر قرار گرفت. شکل (۱۳) روند تغییرات سالانه متغیر کم آبی مذکور را نشان



شکل ۱۳- روند تغییرات سری سالانه کمترین متوسط هفت روزه دبی در دوره مشاهداتی ۱۹۶۶-۲۰۰۸



شکل ۱۴- دبی با دوره بازگشت های مختلف در دوره مشاهداتی (۱۹۶۶-۲۰۰۸) و دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۴) (اعداد ۱ تا ۱۰ مربوط به ۱۰ مدل گردش عمومی جو است)

جدول ۶- تغییرات شاخص حجم کمبود فصلی (میلیون متر مکعب) در آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۴) نسبت به مشاهداتی (۱۹۶۶-۲۰۰۸)

دوره	حجم کمبود فصلی در سال	درصد تغییرات $Q_{def S}$ در آینده نسبت به گذشته
مشاهداتی	۵۴/۳۸۴۱۹	-
۱	۷۷/۸۶۸۱۴	۴۳
۲	۳۲/۹۴۵۲۵	-۳۹
۳	۵۳/۲۶۴۵۱	-۲
۴	۷۹/۶۹۶۳۱	۴۷
۵	۶۷/۱۸۵۰۱	۲۴
۶	۱۱۳/۲۷۴	۱۰۸
۷	۷۴/۰۶۸۳۹	۳۶
۸	۴۷/۴۱۳۳	-۱۳
۹	۸۸/۵۸۴۰۶	۶۳
۱۰	۶۶/۰۳۶۷	۲۱

نتیجه‌گیری

اغلب نواحی اقلیمی ایران دارای بالاترین میزان بارش در فصل زمستان هستند و به استثنای شمال غرب، جنوب شرق و نواحی ساحلی، تابستان‌های این کشور بدون باران است (بی نام، ۲۰۱۰). حوضه سپید دشت سزار نیز از این روال تبعیت می‌نماید. معمولاً، رودخانه‌ها تحت تاثیر رژیم بارش-تبخیر دارای جریان‌های بالا در زمستان و جریان‌های کم آبی در تابستان هستند. در این مطالعه به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر جریانات کم آبی حوضه سپید دشت سزار در دوره ۲۰۴۴-۲۰۱۵ پرداخته شد. در ابتدا وضعیت دما و بارش حوضه در دوره آتی توسط ۱۰ مدل AOGCM شبیه سازی گردید. نتایج نشان داد که مدل های گردش عمومی جو آینده ای با ماه‌های گرم‌تر و خشک‌تر را پیش بینی می‌کنند (شکل های ۷ و ۸). با نگاهی دقیق‌تر به تغییرات دما و باران برای دوره آتی (۲۰۴۴-۲۰۱۵) نسبت به دوره گذشته (۲۰۰۷-۱۹۸۵) مشاهده می‌شود (شکل های ۷ و ۸) که در شش ماه زمستانی (اول دی تا آخر خرداد) کاهش مقدار باران بیشتر از افزایش آن به چشم می‌خورد (کاهش مقدار باران در چهار ماه دسامبر، فوریه، آوریل و می و افزایش مقدار باران فقط در دو ماه ژانویه و مارس). به عبارتی در آینده حوضه شاهد وقوع زمستان های خشک تر خواهد بود که باعث کاهش آب ورودی به آبخوان‌ها، کاهش سطح آب زیر زمینی و کاهش مقدار جریان در فصل تابستان (اول تیر تا آخر آذر) می‌شود. بررسی تغییرات مقدار باران در شش ماه خشک سال نیز نشان از کاهش مقدار باران دارد. از طرفی افزایش دما در آینده، برای تمامی ماه های سال باعث گرم تر شدن هوا و افزایش تبخیر از سطح آب رودخانه خصوصاً در ماه های گرم یعنی زمانی که جریان های کم آبی رخ می دهند، می‌شود. با توجه به تغییرات پیش بینی شده برای بارندگی و دما، انتظار می‌رود که تغییرات شاخص های کم آبی به گونه‌ای باشد که کاهش مقدار جریان در فصل خشک سال در دوره آتی به وقوع به پیوندد. در ادامه وضعیت جریان‌های کم آبی حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره آتی با در نظر گرفتن سه شاخص Q_{95} ، $AM7Q$ و Q_{defS} مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که از نتایج بر می‌آید در دوره آتی (۲۰۴۴-۲۰۱۵)، هر سه شاخص (Q_{95} ، $AM7Q$ و Q_{defS}) روند همسویی را نشان می‌دهند و آن کم شدن مقدار جریان در فصل کم آب سال (شش ماه، از اول تیر تا آخر آذر) می‌باشد (کاهش Q_{95} و $AM7Q$ و افزایش Q_{defS} در دوره آتی). مقدار تغییرات Q_{95} در آینده بر مبنای میانه نتایج مدل های AOGCM ۴۰ درصد کاهش می‌باشد. خطای برآورد دبی توسط مدل IHACRES برای این شاخص ۴۷- درصد است (جدول ۴). بالا بودن درصد تفاوت دبی مشاهداتی و شبیه سازی، همان‌طور که بیان شد تا حد زیادی مربوط به انتخاب باران سنخ رحیم آباد می‌باشد. لذا تفاوت ۴۷- درصد بیان شده فقط به لحاظ کاهش یا افزایش بودن باید مورد نظر قرار بگیرد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان کاهش مقدار شاخص Q_{95} در دوره آتی نسبت به دوره گذشته را مورد پذیرش قرار

داد. مقدار تغییرات شاخص $AM7Q$ نیز برای دوره بازگشت های مختلف ۲، ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب برابر با ۵۲ درصد، ۶۷ درصد، ۷۳ درصد و ۷۹ درصد می‌باشد، این در حالی است که مقدار خطای برآورد شاخص های کم آبی مربوط به منحنی تداوم جریان، توسط مدل بارش-رواناب حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کمتر است و باید به لحاظ جهت تغییرات مورد نظر قرار گیرد (جدول ۴). لذا، تغییرات کاهش در آینده برای شاخص $AM7Q$ با دوره بازگشت های مختلف مورد انتظار است. مازر و همکاران (۲۰۰۸) نیز در تحقیق خود مشاهده کردند که مقدار $AM7Q_{50}$ (کمترین دبی سالانه هفت روزه با دوره بازگشت ۵۰ سال) به نصف مقدار کنونی خود تا سال ۲۰۳۰ و به یک سوم مقدار کنونی خود تا سال ۲۰۶۰ کاهش خواهد یافت. در مورد شاخص Q_{defS} در این مطالعه همان‌طور که از جدول (۶) پیداست، مقدار تغییرات به ازای مدل های مختلف جوی تقریباً بین ۴۰- درصد تا ۱۱۰+ درصد است. میانه تغییرات مذکور ۳۰ درصد افزایشی است. مقدار خطای برآورد مدل بارش-رواناب برای شاخص حجم کمبود متغیر است و بین ۷۱- درصد تا ۵۵۰+ درصد در سال های مختلف تغییر می‌کند. دامنه زیاد تغییرات، خصوصاً در سال‌هایی که مقدار حجم کمبود بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد شده است، می‌تواند مربوط به دخالت‌های انسانی مانند برداشت آب، تغییرات موقتی در جریان رودخانه و ... باشد که چنین مواردی در مدل سازی لحاظ نمی‌شوند (همچنین می‌تواند مربوط به انتخاب باران سنخ باشد که قبلاً توضیح داده شد). میانه درصد تفاوت حجم کمبود دبی مشاهداتی و شبیه سازی ۵۰+ درصد می‌باشد که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که مدل بارش-رواناب، حجم کمبود را بیشتر از مقدار مشاهداتی آن برآورد می‌کند. با توجه به تمامی موارد مطرح شده، در دوره آتی حجم کمبود دارای تغییرات افزایشی خواهد بود. ویت و همکاران (۲۰۰۷) نیز در مطالعه خود از شاخص حجم کمبود دبی فصلی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار این شاخص در دوره آتی به چهار برابر مقدار خود در دوره پایه می‌رسد.

باید توجه داشت که در این زیرحوضه، با وجود خطای مربوط به مدل بارش-رواناب در شبیه سازی جریان روزانه، هر سه شاخص مورد استفاده برای جریان کم آبی نتایج همدیگر را تأیید می‌نمایند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که، وضعیت آب در آینده نسبت به گذشته، بدتر خواهد شد. دلایلی که در این رابطه می‌توان ارائه کرد متعدد و پیچیده هستند اما چند دلیل اصلی می‌توان بیان کرد. اولین مورد کاهش پوشش برفی به دلیل افزایش دما و عدم ذخیره ذوب برف در حوزه در زمستان می‌باشد. هانسن و همکاران^۱ (۲۰۰۸) در گزارشی عنوان کردند که تغییر فقط ۴-۲ درجه سانتی گراد در دمای هوا می‌تواند تأثیر معنی دار روی انباشتگی برف و سرعت ذوب آن داشته باشد. افزایش دما در شش ماه زمستانی باعث تغییر در زمان ذوب برف شده، همچنین

و این نیازمند تجربه کافی در این زمینه می‌باشد. مسلماً دسترسی به داده‌های هیدرو-کلیماتولوژی (تاریخی) مناسب به این موضوع کمک می‌نمایند. اگر چه در این مطالعه سعی شد تا دقت بالایی بر روی عملکرد مدل هیدرولوژیکی صورت گیرد، تحقیقات و بررسی‌های هیدرولوژیکی بیشتری در زمینه اثر تغییر اقلیم بر جریان کم آبی مورد نیاز است. از طرف دیگر استفاده از مدل‌های مختلف GCMs باعث تولید دامنه‌ای از نتایج مربوط به کم آبی می‌شوند. یکی از بزرگ‌ترین منابع تولید عدم قطعیت در مطالعات اثر تغییر اقلیم در هیدرولوژی، انتخاب مدل GCMs می‌باشد (مازر و همکاران، ۲۰۰۸)، لذا انجام تحقیق با استفاده از فقط یک مدل GCM، می‌بایست با دقت بالایی انجام گیرد. البته در این مطالعه از ۱۰ مدل GCMs استفاده شد تا بتوان نتایج را با دامنه‌ای از اعداد نشان داد. از دیگر عدم قطعیت‌های موجود در این مطالعه روش ریز مقیاس‌نمایی است که می‌تواند بر نتایج تحقیق اثر گذارد.

سرعت ذوب را تغییر می‌دهد. چنین شرایطی منجر به کاهش ذخیره آب در حوضه آبریز شده و کاهش جریان رودخانه در فصل خشک را در پی خواهد داشت (افزایش دما در شش ماه تر از اول دی تا آخر خرداد در شکل (۸) مشخص است)، همچنین کاهش ریزش‌های جوی مایع در شش ماه زمستانی که در شکل (۷) نمایان است. دومین مورد کاهش باران در تابستان می‌باشد (در شکل ۷، چهار ماه ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر دارای تغییرات ناچیز مقدار باران و در دو ماه باقیمانده نیز کاهش مقدار باران در نوامبر بیشتر از افزایش آن در اکتبر است). سومین مورد افزایش تبخیر و تعرق به دلیل افزایش دما است که در تمامی ماه‌های سال دیده شده است. قابل ذکر است که ترکیب این عوامل اثر یکدیگر را تشدید می‌نمایند.

در کنار تحلیل‌های بیان شده در بالا، باید توجه داشت که برای شبیه‌سازی جریان کم آبی در مطالعات اثر تغییر اقلیم، احتیاج به مدل‌هایی است که بتوانند جریان‌های کم را با دقت بالایی برآورد کنند

منابع

- ۱- باباییان، ا. و ز. نجفی نیک. ۱۳۸۶. معرفی و ارزیابی مدل LARS-WG برای مدل سازی پارامترهای هواشناسی استان خراسان، دوره آماری ۲۰۳۹-۱۹۶۱. کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران.
- ۲- بایزیدی، م.، ثقفیان، ب.، صدقی، ح. و ف. کاوه. ۱۳۸۹. تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی حوزه کارون بر اساس داده‌های روزانه. مجله پژوهش‌های آب‌خیزداری، ۸۶: ۶۳-۵۲.
- ۳- بذرافشان، ج.، خلیلی، ع.، هورفر، ع.، ترابی، ص. و س. حجام. ۱۳۸۸. بررسی و مقایسه عملکرد دو مدل LARS-WG و ClimGen در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در شرایط مختلف اقلیمی ایران، مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳: ۵۷-۴۴.
- ۴- مساح بوانی، ع. ر. ۱۳۸۵. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تاثیر آن بر منابع آب مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود اصفهان. پایان نامه دکتری، رشته منابع آب، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- 5- Anonymous. 2008a. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change and Water*. Bates, Bryson, Kundzewicz, Zbigniew, W., Wu, Shaohong and Palutikof, Jean. Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 200, Geneva, Switzerland, IPCC Secretariat.
- 6- Anonymous. 2008b. Manual on low flow estimation and prediction. Operational hydrology report, No.50.
- 7- Anonymous. 2010. Iran Second National Communication to UNFCCC. Tehran, Iran.
- 8- Babaeian, I., Kwon, W. T., and E. S. Im. 2004. Application of weather generator technique for climate change assessment over Korea. Korea Meteorological Research Institute, Climate Research Lab.
- 9- Baguis, P., Roulin, E., Willems, P. and V. Ntegeka. 2010. Climate change and hydrological extremes in Belgian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 5033-5078.
- 10- Basher, Md. A., Liu, T., Kabir, Md. A., Ntegeka, V. and P. Willems. 2010. Climate change impact on the hydrological extremes in the Kaidu river basin, China. *Journal of Flood Engineering*, 1(2): 93-108.

- 11- Croke, B. F. W., Andrews, F., Spate, J. and S. M. Cuddy. 2005. IHACRES user guide. Technical Report 2005/19. Second Edition. iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra. <http://www.toolkit.net.au/ihacres>
- 12- De Wit, M. J. M., Van den Hurk, B., Warmerdam, P. M. M., Torfs, P. J. J. F., Roulin, E. and Van Deursen, W. P. A. 2007. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, 82:351–372.
- 13- Fowler, H. J., Blenkinsop, S. and C. Tebaldi. 2007. Linking climate change modelling to impact studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*, 27(12): 1547–1578.
- 14- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D. L. and J. C. Zachos. 2008. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmospheric Science Journal*, 2: 217-231.
- 15- Hindley, D. R. 1973. The definition of dry weather flow in river flow measurement. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientist*, 27: 438–440.
- 16- Hisdal, H. and L. M. Tallaksen. 2000. Drought event definition. ARIDE Technical Report 6, University of Oslo, Oslo, Norway.
- 17- Hisdal, H., Clausen, B., Gustard, A., Peters, E. and L. M. Tallaksen. 2004. Event definitions and indices. In: *Hydrological drought processes and estimation methods for streamflow and groundwater* (L.M. Tallaksen and H.A.J. van Lanen eds). *Developments in Water Science*, 48, Elsevier, Science B.V., Amsterdam: 139-198.
- 18- Huang, Sh., Krysanova, V. and F. Hattermann. 2013. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model. *Acta Geophysica*, 61(1): 151-193.
- 19- Jakeman, A. J. and G. M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29(8): 2637-2649.
- 20- Kavvas, M. L., Chen, Z. Q., Ohara, N., Bin Shaaban, A. J. and M. Z. M. Amin. 2006. Impact of climate change on the hydrology and water resources of Peninsular Malaysia *International Congress on River Management*, 2a.
- 21- Mauser, W., Marke, T. and S. Stoeber. 2008. Climate change and water resources: Scenarios of low-flow conditions in the upper Danube river basin. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 4.
- 22- Qian, B., Gameda, S. and H. Hayhoe. 2008. Performance of stochastic weather generators LARSWG and AAFC-WG for reproducing daily extremes of diverse Canadian climates. *Climate Research*, 37: 17–33.
- 23- Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., De Jong, R. and A. Bootsma. 2004. Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. *Climate Research*, 26: 175–191.
- 24- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M. and C. W. Richardson. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10: 95–107.
- 25- Semenov, M. A. 2008. Simulation of weather extreme events by stochastic weather generator. *Climate Research*, 35: 203–212.
- 26- Smakhtin, V. U. 2001. Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 240:147–186.

- 27- Sventinovic, T. M. and S. Maricic. 2008. Low flow analysis of the lower Drava River. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.