

بررسی تغییرات رواناب حوضه آبریز تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی حوضه آبریز

کارون در محل پل شالو)

زهره رامک^{۱*}، جهانگیر پرهمت^۲، حسین صدقی^۳، ابراهیم فتاحی^۴ و مهران لشنی زند^۵

(۱) دکتری مهندسی منابع آب، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

(۳) استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۴) دانشیار پژوهشکده هواشناسی.

(۵) عضو هیئت علمی سازمان تحقیقات کشاورزی.

*نویسنده مسئول: z_ramak@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۷

چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که رژیم رواناب رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. شرایط اقلیمی گرم‌تر باعث تشدید چرخه آب، تغییر بارش و تغییر در مقدار و زمان ظهور رواناب می‌گردد. در رابطه با این موضوع، مطالعات بسیاری در نقاط مختلف جهان صورت گرفته که نتایج متفاوتی حاصل شده است. با توجه به اهمیت حوضه آبریز کارون از نظر منابع آبی و عدم مطالعات کافی تحت سناریوهای مختلف در این حوضه، در تحقیق حاضر تلاش شده است تا تأثیر این پدیده بر رواناب حوضه مذکور مورد بررسی قرار گیرد. در ابتدا مقادیر دما و بارش ماهانه مدل HadCM3 تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 با استفاده از مدل LARS-WG به لحاظ مکانی و سپس با استفاده از روش عامل تغییر به لحاظ زمانی کوچک مقیاس گردیدند. در مرحله بعد برای شبیه‌سازی رواناب حوضه از مدل SRM استفاده گردید که پس از واسنجی، با معرفی مقادیر دما و بارش کوچک مقیاس شده دوره آبی به مدل، رواناب حوضه مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان از افزایش دما و تغییر در بارندگی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ نسبت به دوره پایه را دارد. همچنین مقایسه رواناب دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ با دوره پایه نشان می‌دهد که تغییر اقلیم باعث تغییر در رژیم رودخانه خواهد شد و در آینده، دبی رودخانه در ماه‌های خشک و کم‌آب، کمتر و در ماه‌های با جریان سیلابی، بیشتر خواهد شد. همچنین، بیشترین کاهش دبی رودخانه در ماه سپتامبر رخ خواهد داد و این ماه به لحاظ منابع آبی بحرانی خواهد بود. علاوه بر این، بیشترین افزایش دبی رودخانه مربوط به فصل ذوب برف خواهد بود که این موضوع لزوم برنامه‌ریزی در زمینه مدیریت منابع آب این حوضه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رواناب، سناریوی انتشار، مدل SRM و مدل LARS-WG.

مقدمه

گرمایش جهانی در چند دهه اخیر در مقیاس وسیع منجر به تغییر در چرخه آب شده است که از آن جمله می‌توان به افزایش بخار آب در اتمسفر، تغییر الگوی بارش، شدت و حد نهایی آن، تاثیر بر نوارهای ساحلی، کاهش پوشش برف و در سطح وسیع ذوب یخ‌ها و تغییر در رطوبت خاک و رواناب را نام برد. شواهد زیادی بر مبنای داده‌های مشاهداتی و پیش-بینی‌های صورت گرفته از وضعیت اقلیمی وجود دارد که نشان می‌دهد منابع آب شیرین به شدت تحت تاثیر تغییر اقلیم، آسیب‌پذیر است. به دلیل ارتباط نزدیک بین گرمایش جهانی و هیدرولوژی، در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه و منابع آب در سراسر جهان صورت گرفته است. شدت و خصوصیات اثرات منفی تغییر اقلیم بر منابع آب، از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال، تغییر در خصوصیات جریان که ناشی از تغییر اقلیم است به ویژگی‌های هر آبخیز مرتبط می‌باشد. به طور خاص، زمین‌شناسی و ارتفاع حوضه، اولین عوامل کنترل‌کننده زمان و مقدار رواناب در مواجهه با تغییر اقلیم می‌باشند (Ficklin *et al.*, 2009 ; Hamlet *et al.*, 2007; Jones and Velazquez, 1996). همکاران (۲۰۱۱) اثر تغییرات اقلیمی را بر روی جریان رودخانه یکی از حوضه‌های آبریز کشور اسپانیا مورد بررسی قرار دادند و از یک روش سیستماتیک برای شناسایی مشکلات استفاده کردند و راهکارهایی برای چگونگی سازگاری با تغییرات آبی منابع آب در سطح حوضه آبریز ارائه نمودند. در این مطالعه مشخص گردید بیشترین کاهش در متوسط جریان رودخانه در ماه آگوست اتفاق خواهد افتاد و وضعیت منابع آب در این ماه بحرانی خواهد بود. Zhang و همکاران (۲۰۱۱) تغییرات بارش و جریان رودخانه‌ای و علل آن را بر اساس آنالیز مجموعه اطلاعات NCAR/NCEP^۱ برای کشور چین مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه کاهش شدید بارندگی در فصل بهار و افزایش بارش در پاییز و زمستان مشاهده شد. بر اساس این تغییرات، تغییرات شدیدی در رواناب فصول بهار و پاییز و زمستان ملاحظه شد. Booi *et al.* (۲۰۱۱) بر اساس وضعیت فعلی و تحت شرایط تغییر اقلیم تحت دو سناریوی انتشار با استفاده از دو مدل GCM، دبی رودخانه نیل را پیش‌بینی نموده و با استفاده از مدل تخصیص RIBASIM^۲، مدیریت منابع آب آبی را برای نقاط مختلف مصرف شبیه‌سازی نمودند. دوره مشاهده‌ای در این تحقیق ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و دوره پیش-بینی ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مشخص شد که تغییر اقلیم با اثرگذاری بر روی دما، بارش و تبخیر و تعرق، به میزان قابل توجهی جریان رودخانه را در آینده تغییر خواهد داد. Hoang و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی با استفاده از سناریوهای اقلیمی CMIP5 و مدل هیدرولوژیکی Vmod اثر تغییر اقلیم را روی حوضه رودخانه Mekong واقع در جنوب آسیا در شرایط پرابی و کم آبی بررسی کردند. دوره پایه در این تحقیق ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و

¹ National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR)

² River Basin Simulation Model

دوره آتی ۲۰۳۶-۲۰۶۵ در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که در دوره آتی، فراوانی وقوع و بزرگی جریان‌های با دبی بالا افزایش می‌یابد در حالیکه جریان‌های با دبی کم، کمتر تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند. Nohara و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود دبی ۲۴ رودخانه را در دنیا با استفاده از ۱۹ مدل گردش عمومی جو بر اساس سناریوی A1B مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد در رودخانه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا، افزایش در دبی رودخانه‌ها وجود خواهد داشت و زمان پیک جریان بدلیل ذوب سریعتر برف زودتر اتفاق خواهد افتاد. همچنین پیش‌بینی شده است که رودخانه‌های واقع در اروپا تا منطقه مدیترانه و امریکای جنوبی با کاهش جریان مواجه گردند. حجاری زاده و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی با استفاده از مدل گردش عمومی جو (AOGCM) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب در حوضه آبریز بختیاری پرداختند. برای اینکار از شبیه‌سازی دما و بارش برای دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) با استفاده از مدل CGCM3 بر اساس سناریوی انتشار A2 و مدل بارش-رواناب HEC-HMS استفاده کردند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد با وجود کاهش بارش‌ها در سال‌های آینده، بارش‌های حدی در حوضه با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهند داد که این امر نشان‌دهنده افزایش وقوع سیلاب‌ها در دوره آتی خواهد بود. دودانگه و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و اسپیرمن، روند متغیرهای اقلیمی و تاثیر آنها بر منابع آب را در حوضه آبخیز سد سفیدرود بررسی کردند و نشان دادند که روند مجموع بارش سالانه و بارش حداکثر ۲۴ ساعته در تعداد کمی از ایستگاه‌ها معنی‌دار است، در حالیکه در مورد جریان‌های حداقل و سیل این نسبت بالاتر است. آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۹) تاثیر پدیده تغییر اقلیم را بر رژیم سیلاب (شدت و فراوانی) حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق حاکی از افزایش دما و تغییرات در بارندگی دوره مذکور نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) است. قربانی زاده خرازی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل ذوب برف SRM^۳ و همچنین مدل جهانی تغییر اقلیم ECHAM4 با فرض دو سناریوی تغییر اقلیم A و B، توزیع زمانی جریان رواناب ناشی از ذوب برف را در حوضه کارون برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۵۰ بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که زمان بیشینه جریان از بهار به زمستان انتقال خواهد یافت. حوضه آبریز کارون یکی از مهم‌ترین حوضه‌های ایران از نظر منابع آب بوده و شواهد گسترده‌ای مبنی بر وجود تغییر اقلیم در این حوضه وجود دارد. با توجه به اهمیت رواناب این حوضه در برنامه‌ریزی‌های منابع آبی کشور و نیز با توجه به کمبود مطالعات و وجود کاستی‌هایی از جمله عدم لحاظ ریزمقیاس سازی داده‌ها ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل-های AOGCM و نیز عدم لحاظ تاثیر سناریوهای مختلف اقلیمی بر رواناب حوضه، اهمیت انجام تحقیق حاضر احساس می‌شود. در تحقیق حاضر ابتدا توانایی مدل LARS-WG برای تولید داده‌های هواشناسی در دوره آتی برای ایستگاه

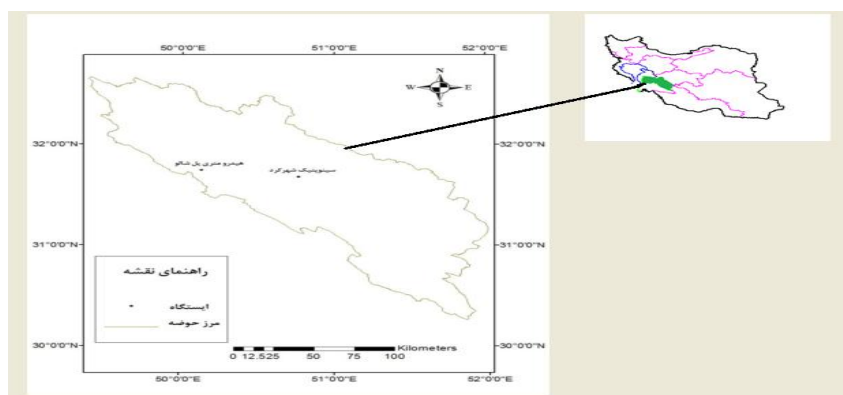
^۳ Snowmelt Runoff Model

شهرکرد بعنوان ایستگاه سینوپتیک مبنا مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکار، مطابق پیشنهاد IPCC دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۰ بعنوان دوره پایه در نظر گرفته شد و مدل LARS-WG برای این دوره کالیبره گردید. همچنین از دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۰ بعنوان دوره ارزیابی استفاده گردید. پس از اطمینان از عملکرد مدل، از آن، جهت تولید داده‌های هواشناسی در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت سه سناریوی اقلیمی A1B، A2 و B1 استفاده شد. همچنین با توجه به اینکه در بیشتر نقاط مرتفع حوضه چه در بخش شمالی در حوضه کارون علیا و بازفت و چه در بخش جنوبی حوضه خرسان مقدار قابل توجهی از بارش‌ها بصورت بارش برف است برای شبیه‌سازی رواناب از مدل ذوب برف SRM استفاده شده است که پس از کالیبراسیون و واسنجی مدل، با معرفی داده‌های هواشناسی کوچک مقیاس شده به این مدل، جریان رواناب برای دوره آتی پیش‌بینی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه کارون از مرتفع‌ترین قله سلسله جبال زاگرس سرچشمه می‌گیرد و به خلیج فارس می‌ریزد. شاخه کارون متشکل از سه شعبه عمده کارون علیا، بازفت و خرسان مساحتی در حدود ۲۴ هزار کیلومتر مربع را در محل پل شالو زهکشی می‌کند. شکل زیر موقعیت این حوضه و جانمایی آن را در نقشه کشور نمایش می‌دهد. داده‌های مورد نیاز برای انجام این تحقیق شامل دما، بارش، ساعات آفتابی، سطح پوشیده از برف و داده‌های هیدرومتری می‌باشد که داده‌های دما، بارش و ساعات آفتابی از سازمان هواشناسی و نیز داده‌های هیدرومتری و سطح پوشیده از برف از سازمان آب و برق خوزستان تهیه گردیدند. لازم به ذکر است ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در تحقیق به ترتیب، ایستگاه شهرکرد و ایستگاه هیدرومتری پل شالو می‌باشند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول زیر ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده

ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه	نام ایستگاه
۲۰۴۸/۹	۳۲-۱۷-۰۰	۵۰-۵۱-۰۰	هواشناسی	شهرکرد
۱۵۶۵	۳۱-۴۵-۰۰	۵۰-۰۸-۰۰	هیدرومتری	پل شالو

تولید سناریوی اقلیمی برای دوره آتی

در این پژوهش برای تولید سناریوی اقلیمی دوره آتی، از خروجی مدل HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان استفاده شده است. بمنظور حذف اغتشاشات در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های، بجای استفاده مستقیم از داده‌های مدل در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای ۳۰ ساله این داده‌ها استفاده شده است (روابط ۱ و ۲) (Jones and Hulme, 1996).

$$\Delta T = \left(\bar{T}_{GCM, fut} - \bar{T}_{GCM, base} \right) \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$\Delta P = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut}}{\bar{P}_{GCM, base}} \right) \quad \text{رابطه ۲:}$$

در (رابطه ۱) $\bar{T}_{GCM, fut}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی (مانند ۲۰۳۹-۲۰۱۱)، \bar{T}_{base} میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) می‌باشد. (رابطه ۲) مربوط به بارندگی (P) بوده و در آن تمامی زیرنویس‌ها شبیه به (رابطه ۱) معرفی می‌شود.

کوچک مقیاس کردن مکانی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در این تحقیق به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌ها به لحاظ مکانی، از مدل آماری LARS-WG استفاده شده است. مدل LARS-WG مولد مصنوعی داده‌های آب و هوایی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده بکار رود. خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره آماری بوده اما انحراف معیار آنها به نسبت اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره آینده و گذشته پریشیده می‌شود (خلیلی اقدم و همکاران، ۱۳۹۱). داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه برای یک سری متغیرهای اقلیمی مناسب برای مثال بارش، دمای کمینه و بیشینه و تابش (مگاژول بر متر مربع) ایجاد می‌شوند. مدل مولد اقلیمی LARS-WG برای شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک و مرطوب، از یک توزیع نیمه‌تجربی استفاده می‌کند که

دارای ۲۳ بازه است. برای یک روز مرطوب، مقدار بارش از روی یک توزیع نیمه تجربی برای هر ماه تعیین می‌شود و این انتخاب، مستقل از طول سری روزهای مرطوب و یا مقدار بارش در روزهای گذشته است (Semenov and Brooks, 1998)

کوچک مقیاس کردن زمانی

در تحقیق حاضر به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌های طرح به لحاظ زمانی از روش عامل تغییر (change factor) استفاده شده است. در این روش برای بدست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی افزوده می‌شود (Barrow et al., 1996; Diaz-Nieto and Wilby, 2005).

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad \text{رابطه ۴:}$$

در (رابطه ۳) $\bar{T}_{GCM, fut}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی (مانند ۲۰۳۹-۲۰۱۱)، \bar{T}_{base} میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) می‌باشد. رابطه ۴ مربوط به بارندگی (P) بوده و در آن تمامی زیرنویس‌ها شبیه به (رابطه ۴) معرفی می‌شود.

شبیه‌سازی رواناب

همانطور که ذکر گردید اغلب بارش‌های حوضه بصورت برف می‌باشد، لذا برای شبیه‌سازی رواناب حوضه از مدل ذوب برف SRM استفاده شده است. مدل SRM برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط Martinec به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب روزانه حاصل از ذوب برف حوضه‌های کوچک کوهستانی اروپا ارائه گردید. این مدل، مدلی فیزیکی و مفهومی می‌باشد که بر اساس روش درجه-روز استوار است. در این مدل، رواناب ناشی از ذوب برف و باران بطور روزانه محاسبه و به دبی جریان فروکش (دبی پایه) اضافه و سپس با لحاظ نمودن ضریب انتقال، به دبی خروجی از حوضه تبدیل می‌گردد. ساختار اصلی مدل به صورت رابطه ریاضی زیر می‌باشد:

$$Q_{n+1} = [C_{Sn} a_n (T_n + \Delta T_n) S_n + C_{Rn} P_n] \frac{10000}{86400} (1 - K_{n+1}) A + Q_n K_{n+1} \quad \text{رابطه ۵:}$$

در رابطه بالا: Q: دبی روزانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، C_S : ضریب رواناب برف، C_R : ضریب رواناب باران، a: فاکتور درجه-روز (سانتیمتر بر درجه سانتیگراد بر روز)، T: درجه حرارت ایستگاه مبنا (درجه سانتیگراد)، ΔT : تفاضل درجه حرارت در ایستگاه مبنا با درجه حرارت در محل متناظر متوسط ارتفاع هیپسومتریک حوضه، S: نسبت مساحت پوشش برف به مساحت کل حوضه، P: بارشی که در تولید رواناب شرکت می‌کند (سانتی‌متر)، A: مساحت حوضه یا ناحیه انتخابی

(کیلومتر مربع)، n : توالی روزها در طی دوره پیش‌بینی یا شبیه‌سازی و K : ضریب فروکش جریان (نشان دهنده نرخ کاهش دبی در یک دوره زمانی بدون تاثیر ذوب برف و باران) می باشد. متغیرهای دما، بارندگی متوسط حوضه و درصد سطح پوشش برف برای هر روز اندازه‌گیری و یا تعیین می‌شوند. پارامترهای K و C_R و C_S به خصوصیات حوضه بستگی دارند و T و ΔT به خصوصیات هواشناختی منطقه مربوط می‌شوند. در یک حوضه آبریز با تقسیم بندی آن به سه ناحیه ارتفاعی، رابطه زیر را می‌توان با فرض زمان تاخیر ۱۸ ساعت بصورت زیر نوشت:

$$Q_{n+1} = \{ [C_{SA_n} a_{A_n} (T_n + \Delta T_{A_n}) \cdot S_{A_n} + C_{RA_n} P_{A_n}] A_A + [C_{SB_n} \cdot a_{B_n} (T_n + \Delta T_{B_n}) \cdot S_{B_n} + C_{RB_n} \cdot P_{B_n}] A_B + [C_{SC_n} \cdot a_{C_n} (T_n + \Delta T_{C_n}) \cdot S_{C_n} + C_{RC_n} \cdot P_{C_n}] A_C \} \times \frac{10000}{86400} (1 - K_{n+1}) + Q_n \cdot K_{n+1}$$

رابطه ۶:

اندیس‌های A و B و C در پارامترهای AA و AB و AC و سایر پارامترها نشانه نواحی ارتفاعی می باشند (قربانی‌زاده خرازی و همکاران، ۱۳۸۸).

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های واقعی دوره پایه یا واسنجی (۲۰۰۰-۱۹۷۰) و دوره ارزیابی یا صحت‌سنجی (۲۰۱۲-۲۰۰۰) برای ایستگاه شهرکرد (ایستگاه مبنا) در (جدول ۲) تا (جدول ۵) آورده شده است. با توجه به اینکه اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در طی بازه زمانی ۱۹۷۰-۲۰۰۰ و ۲۰۱۲-۲۰۰۱ مشاهده نمی‌شود و نیز بدلیل بالا بودن ضریب تبیین همه متغیرها، توانایی مدل در شبیه‌سازی و تولید داده‌های اقلیمی برای آینده مورد تائید قرار گرفت و از آن جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در آینده استفاده گردید. شکل-های ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب نتایج حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش را در ایستگاه مبنا برای دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۹) نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود انتظار می‌رود دمای حداقل حوضه در محل ایستگاه مبنا در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ برای سناریوی $A1B$ بین ۰/۴ تا ۱/۴ و برای سناریوی $A2$ بین ۰/۶۸ تا ۱/۱۶ و برای سناریوی $B1$ بین ۰/۴ تا ۱/۰۸ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. همچنین انتظار می‌رود دمای حداکثر حوضه در محل ایستگاه مبنا برای سناریوی $A1B$ بین ۰/۳ تا ۱/۳۶ و برای سناریوی $A2$ بین ۰/۶۷ تا ۱/۲۷ و برای سناریوی $B1$ بین ۰/۴ تا ۱/۲۱ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش داشته باشد. این در حالی است که محدوده تغییرات بارش حوضه در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ تحت سناریوی $A1B$ بین ۴۴-(-۴) درصد، تحت سناریوی $A2$ بین ۲۲-۱۰ درصد و تحت سناریوی $B1$ بین ۳۴-(-۸) درصد می‌باشد.

جدول ۲: میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهده شده و مدل‌سازی شده متغیرهای اقلیمی در دوره پایه (مرحله

واسنجی)

ایستگاه		پارامتر							
		دمای حداکثر		دمای حداقل		بارندگی		تابش	
		دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده
میانگین		۲۰	۲۰/۱۶	۳/۳۹	۳/۵	۳۳۹	۳۲۷	۷/۴۲	۷/۵۲
شهرکرد									
انحراف معیار		۲/۱۶	۰/۷۱	۱/۵۷	۰/۷۲	۲۱/۸	۲۰	۳/۱۱	۰/۷۲

جدول ۳: ضریب همبستگی بین پارامترهای مدل‌سازی و مشاهده‌ای در دوره پایه (مرحله واسنجی)

ضریب همبستگی (R^2)				
پارامتر نام ایستگاه	متوسط دمای حداقل ماهانه	متوسط دمای حداکثر ماهانه	متوسط بارندگی ماهانه	متوسط ساعت آفتابی ماهانه
شهرکرد	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۹

جدول ۴: میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۰ (مرحله

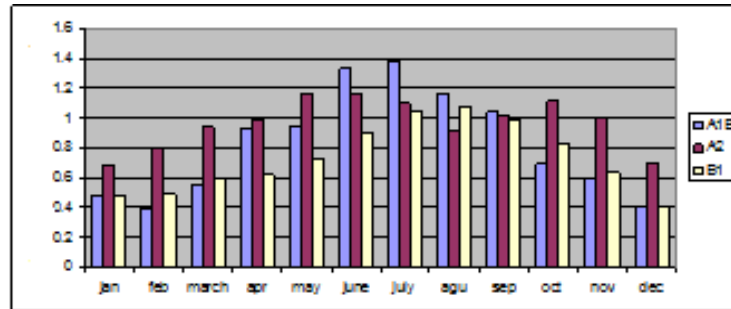
صحت‌سنجی)

ایستگاه		پارامتر							
		دمای حداکثر		دمای حداقل		بارندگی		تابش	
		دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده	دوره پایه	مدلسازی شده
میانگین		۱۳	۱۳/۰۴	۵/۲	۵/۴	۶۹۳	۷۲۳/۴۴	۹/۱۱	۸/۹۶
شهرکرد									
انحراف معیار		۱/۶۳	۰/۶	۱/۲	۰/۵	۳۷۵	۲۷۸/۶۳	۱/۲۷	۰/۸۷

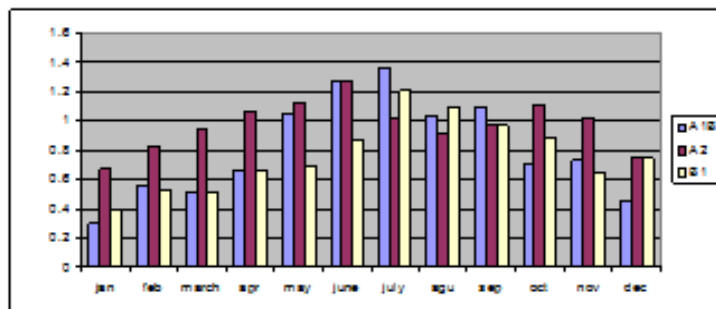
جدول ۵: ضریب همبستگی بین پارامترهای مدل‌سازی و مشاهده‌ای (مرحله صحت‌سنجی)

ضریب همبستگی (R^2)				
پارامتر نام ایستگاه	متوسط دمای حداقل ماهانه	متوسط دمای حداکثر ماهانه	متوسط بارندگی ماهانه	متوسط ساعت آفتابی ماهانه
شهرکرد	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹	۰/۹۹

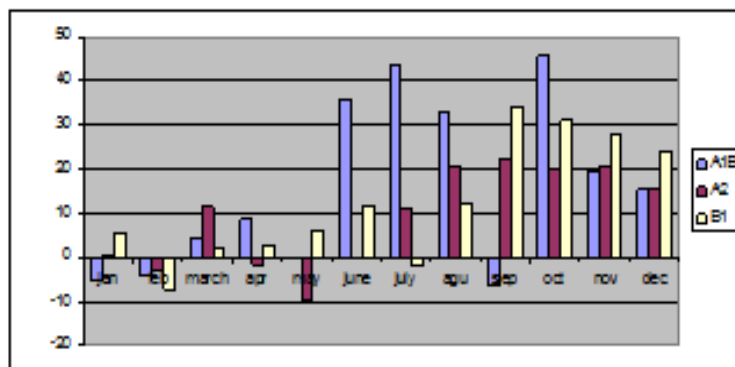
پس از بدست آوردن سناریوهای تغییر اقلیم حوضه با استفاده از روابط ۱ و ۲، سری زمانی ماهانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش حوضه محاسبه شد. لازم به ذکر است که در روابط مذکور از سری زمانی ماهانه متوسط برای متغیرهای مشاهداتی استفاده شده است.



شکل ۲: سناریوی تغییر اقلیم دمای حداقل



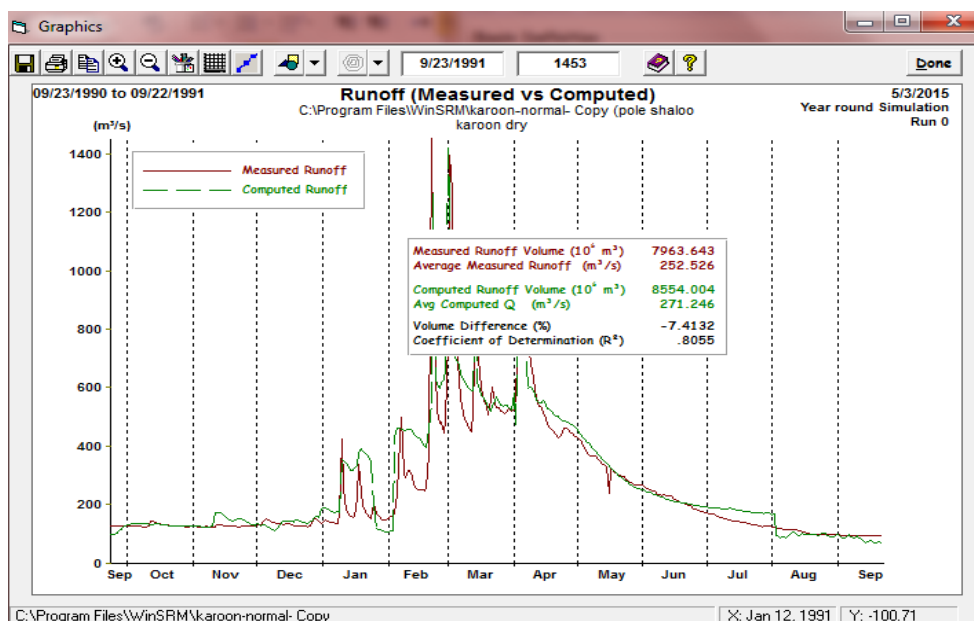
شکل ۳: سناریوی تغییر اقلیم دمای حداکثر



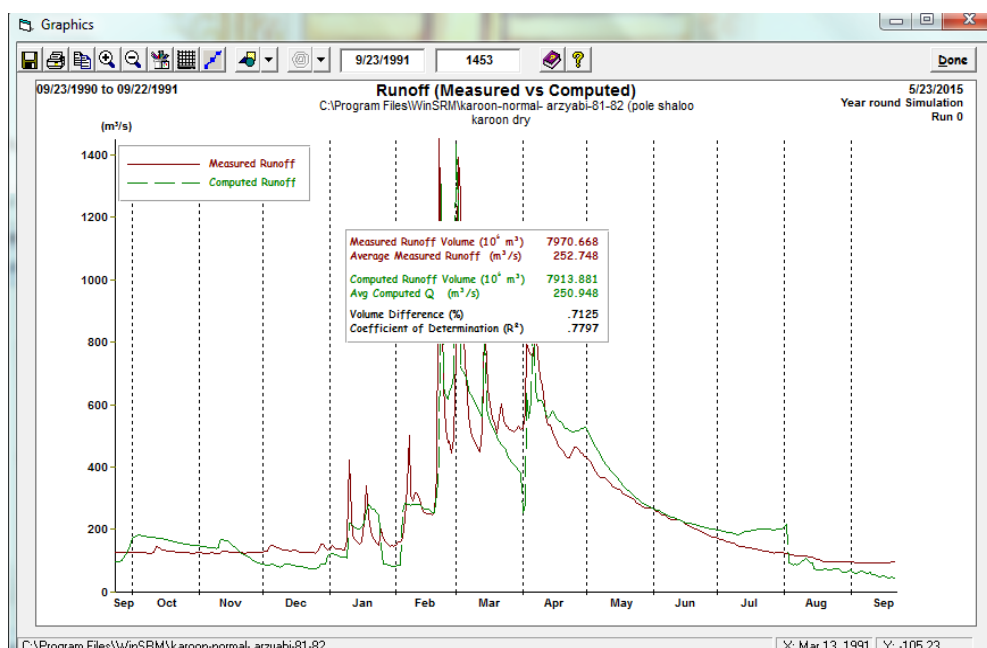
شکل ۴: سناریوی تغییر اقلیم بارش

همانطور که ذکر شد در این تحقیق برای شبیه‌سازی بارش- رواناب از مدل SRM استفاده شده است. یکی از محاسن مدل SRM این است که مدل قابلیت نمایش هیدروگراف رواناب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده را با هم داراست. بنابراین با استفاده از نمودارها بصورت چشمی می‌توان کیفیت شبیه‌سازی را کنترل نمود. علاوه بر این، مدل از دو معیار پذیرفته شده دیگر شامل ضریب تعیین که با R^2 نمایش داده می‌شود و تفاضل حجمی که با D_v نشان داده می‌شود، نیز

استفاده می‌نماید. معیارهای فوق بطور خودکار توسط مدل محاسبه می‌گردند. در این تحقیق سال‌های آبی ۸۰-۸۱ و ۷۸-۷۷ به دلیل کامل‌تر بودن داده‌های سطح پوشش برف به ترتیب برای واسنجی و ارزیابی مدل SRM انتخاب شدند. ضریب تعیین برای دوره واسنجی حدود ۰/۸ و برای دوره ارزیابی ۰/۷۷ و درصد اختلاف حجمی دبی برآوردی و مشاهده ای برای دوره های مذکور به ترتیب ۷- و ۰/۷۷ می باشد. شکل‌های زیر مقایسه دبی روزانه رواناب ناشی از ذوب برف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل SRM را در دوره واسنجی و ارزیابی نشان می‌دهد.

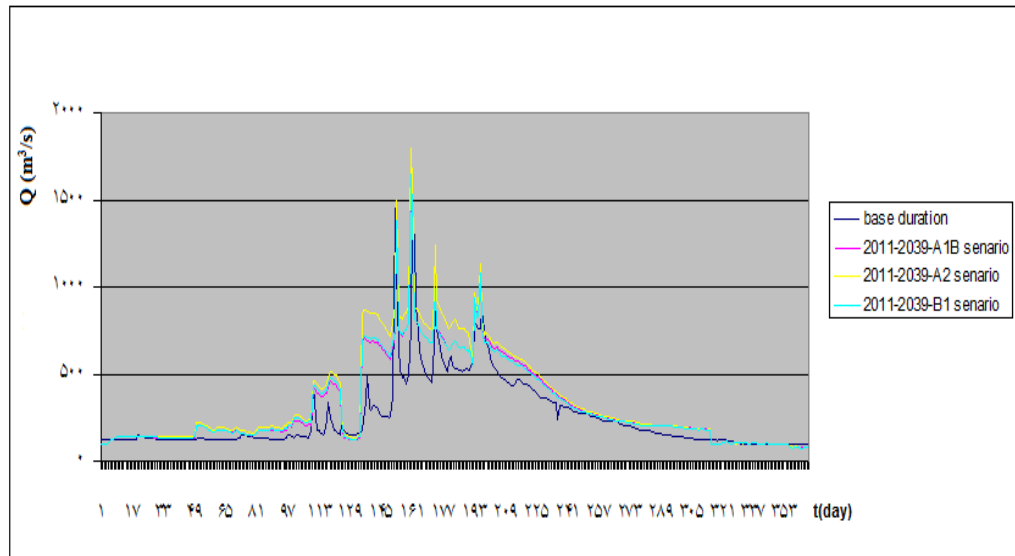


شکل ۵: کالیبراسیون مدل SRM برای سال آبی ۸۰-۸۱



شکل ۶: ارزیابی مدل SRM برای سال آبی ۷۷-۷۸

بعد از واسنجی و ارزیابی مدل و تعیین پارامترهای بهینه مدل ذوب برف برای این حوضه، به کمک نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های اقلیمی، از آن برای پیش‌بینی جریان در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ تحت سه سناریوی اقلیمی A1B، A2 و B استفاده شد و توزیع زمانی جریان برای دوره آتی با استفاده از مدل تغییر اقلیم HadCM3 پیش‌بینی شد. شکل ۷ و (جدول ۵) نتایج پیش‌بینی را نشان می‌دهند.



شکل ۷: پیش‌بینی رواناب در محل پل شالو و مقایسه با رواناب دوره پایه تحت سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1

جدول ۶: مقایسه تغییرات رواناب در محل پل شالو تحت سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 نسبت به دوره پایه

(درصد)

	Jan	Feb	Mar	April	May	June	Jul	Ags	Sep	Oct	Nov	Dec
A1B	۳۷	۱۶۲	۹/۶	۴۱	۸	۳	۱۸	-۲۳	-۲۸	-۲۳	-۲۵	-۱۲
A2	۵۵	۲۰۲	۲۶	۴۷	۱۱	۴/۵	۱۷	-۲۴	-۲۹	-۲۲	-۲۰	-۳
B1	۴۵	۱۶۰	۹/۲	۳۷	۵/۵	۰/۳۸	۱۵	-۲۳	-۲۹	-۲۲	-۲۵	-۱۰

نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد در هر سه سناریوی A1B و A2 و B1 برای دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۹) در ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر، روند کاهشی در جریان مشاهده می‌شود و در سایر ماه‌ها روند تغییرات افزایشی خواهد بود. بیشترین کاهش در روند جریان هم در هر سه سناریو مربوط به ماه سپتامبر بوده و وضعیت جریان در این ماه بحرانی خواهد بود. به همین ترتیب در هر سه سناریو بیشترین افزایش دبی مربوط به ماه‌های ژانویه و فوریه و آوریل می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در دوره آتی، ذوب برف سریع‌تر از گذشته انجام می‌شود و رخدادهای سیل با افزایش چشمگیر همراه خواهد بود. این نتیجه‌گیری با نتایج هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2007) در یک راستا می‌باشد.

نتیجه گیری

نتیجه این تحقیق با نتیجه تحقیق قربانی زاده و همکاران (۱۳۸۸) که برای دو دوره ۲۵ ساله (۲۰۵۰-۲۰۰۰) تحت دو سناریوی A و B با مدل اقلیمی EHAM4 در همین حوضه انجام شده است در مورد ماه‌های فصل زمستان و دو ماه از فصل تابستان در یک راستا بوده ولی در فصل پاییز و بهار نتایج متفاوت می‌باشد و این موضوع عدم قطعیت مطالعات تغییر اقلیم تحت سناریوها و مدل‌های اقلیمی، همچنین نحوه ریزمقیاس کردن داده‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، به مدیران منابع آب توصیه می‌شود برای مواجهه با جریان‌های با دبی و سرعت بالا بدلیل طوفان‌های شدید در فصل ذوب برف و نیز جریان‌های کم در دوره‌های بالقوه کم باران مخصوصاً "ماه سپتامبر، تدابیر لازم را بکار گرفته و از راهکارهای مدیریتی مناسب استفاده نمایند. همچنین بعنوان پیشنهاد جهت مطالعات آینده توصیه می‌شود از تلفیق عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، روش‌های کوچک مقیاس‌نمایی و نیز سایر مدل‌های بارش- رواناب استفاده شود.

منابع

- آشفته، پ.، مساح بوانی، ع. (۱۳۸۹). تأثیر تغییر اقلیم بر دبیه‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۴، شماره ۵۳، ۳۹-۲۵.
- حجاری زاده، ز، فتاحی، الف، مساح بوانی، ع، ناصرزاده م. (۱۳۹۱). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدروگراف سیلاب در دوره‌های آتی، مطالعه موردی: حوضه آبریز بختیاری. جغرافیا (فصلنامه علمی- پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، سال ۱۰، شماره ۲۴، ۳۴-۵.
- خلیلی اقدام، ن، مساعدی، الف، سلطانی، الف، کامکار، ب. (۱۳۹۱). ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش بینی برخی از پارامترهای جوی سنج. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۴، ۱۰۳-۸۵.
- دودانگه، الف، سلطانی، س، سرحدی، ع. (۱۳۹۰). بررسی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۵، شماره ۵۸، ۲۲۹-۲۱۵.
- شریفیان، ح.، حبیبی، ع. (۱۳۹۲). بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات منابع آب سطحی در بخشی از حوزه استان گلستان، مجموعه مقالات اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، اصفهان، ایران، ۱۷ بهمن.

عباسی، ف.، ملبوسی، ش.، باباییان، الف.، اثمري، م.، برهانی ر. (۱۳۸۹). پیش بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریز مقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۲، ۲۱۸-۲۳۲.

قربانی زاده خرازی، ح.، صدقی ح.، ثقفیان ب.، پرهمت ج. (۱۳۸۸). بررسی اثر تغییر اقلیم بر توزیع زمانی جریان رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه کارون. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۳، شماره ۵۰، ۹-۴۵.

مساح بوانی، ع.، مرید س. (۱۳۸۴). اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد ۹، شماره ۴، ۱۷-۲۸.

Alcamo, J., Flörke, M., and Märlker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climate changes, *Hydrolog. Sci. J.*, 52, 247–275.

Barrow, E., Hulme, M. and Semenov, M. (1996). Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*, 7, pp: 119-215

Booij, Martijn J., Daniël Tollenaar, Eelco van Beek, Jaap C. J. Kwadijk (2011). Simulating impacts of climate change on river discharges in the Nile basin, *Journal of Hydrology*, 36 (2011), 696-709

Burn, D. H., and Hag Elnor, M. A. (2002). Detection of hydrologic trend and variability, *J. of Hydrology*, 255(1-4), 107-122.

Chen H., Xu C.Y., and Guo S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*. 434–435(0): p. 36-45.

Chen J., F.P. Brissette, and R. Leconte.(2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3–4): p. 190-202.

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thames, united kingdom. *Jouornal of Climatic Change*, 69, pp: 245-296

Ficklin, D. L., Luo, Y., Luedeling, E. and Zhang, M.(2009). Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374 (1-2): pp: 16-29.

Hamlet, A. F. and Lettenmaier D. P. (2007). Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. *Water Resour. Res.*, 43(6), W06427.

- Hubbard, E. F., Landwehr, J. M., and Barker, A. R. (1997).** Temporal variability in the hydrologic regimes of the United States, FRIEND'97-Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resources Management, A. Gustard, ed., 246, International Association of Hydrological Sciences, Oxfordshire, U.K
- IPCC (2007). Summary for policymakers in climate change.** Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds) (2007) Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel of climate change, Cambridge University Press, Cambridge, pp: 1-18.
- Jones, P. D. and Hulme, M. (1996).** Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. International journal of climatology, 16, pp: 361-377.
- Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Wallis, J. R. (1994).** Hydro-climatological trends in the continental United States 1948-1988, J. Climatology, 7(4), pp: 586-607.
- Muttiah R. S. and Wurbs R. A. (2002).** Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. Water International, 27(3): pp: 407-419
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., and Stouffer, R. J. (2008).** Stationarity Is Dead: Whither Water Management?, Science, 319, pp: 573-574,
- Nohara, Daisuke, Kitoh, Akio, Hosaka, Masahiro, Oki, Taikan. (2016).** Impact Of Climate Change On River Discharge Projected By Multimodel Ensemble, Journal Of Hydrometeorology, 7, 1076-1088.
- Soltanieh, M. (2003),** Vulnerability of Iran to adverse impact of climate change, National Workshop on Kyoto Protocol: Challenges and Opportunity for Sustainable Development of I.R.Iran. October 25-26.
- Semenov, M. A., and Brooks, R. J. (1998).** Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate Research, 10: 95-107.
- Velazquez, David Pulido, Luis Garrote, Joaquin Andreu, Francisco-Javier Martin-arrasco, Ana Iglesias (2011).** 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, J. of Hydrology, 405, pp: 110-122.
- Westmacott, J. R., and Burn, D. H. (1997).** Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin, J. Hydrol., 202(1-4), 263-279.
- Whitfield, P. H., and Canon, A. J. (2000).** Recent variations in climate and hydrology in Canada, Can. Water Resource J., 25(1), pp: 19-65.

Zhang Qiang, Vijay P. Singh, Peng Sun, Xi Chen, Zengxin Zhang, Jianfeng Li (2011).
Precipitation and streamflow changes in China: Changing patterns, causes and implications, J.
of Hydrology, 410, pp: 204-216.