



ISSN 2251-7480

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی یک حوضه آبریز کوهستانی در ایران

محمد رضا خزانی

۱) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات: m_r_khazae@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۶

چکیده

محدودیت منابع آبی و رشد جمعیت و بهره‌برداری بیش‌تر از آن، وضعیت منابع آبی را در آینده به خطر انداخته است. تغییر اقلیم نیز یکی از پدیده‌هایی است که امروزه بسیاری از پژوهشگران و تصمیم‌گیران بخش آب را نگران کرده است. در این پژوهش، محدودیت منابع آبی، رشد جمعیت و بهره‌برداری بیشتر از آن، وضعیت منابع آبی را در آینده به خطر انداخته است. تغییر اقلیم نیز یکی از پدیده‌هایی است که امروزه بسیاری از محققان و تصمیم‌گیران بخش آب را نگران کرده است. در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی یک حوضه کوهستانی ارزیابی شده است. به این منظور سناریوهای مدل‌های گردش عمومی به روش عامل تغییر ریزمقیاس شده‌اند. سناریوهای اقلیمی به مدل بارش-رواناب روزانه که از پیش برای حوضه به خوبی واسنجی و اعتبارسنجی شده است وارد شده و جریان روزانه رودخانه برای دوره مشاهداتی و سناریوهای اقلیم تغییر یافته آینده (۹۳-۲۰۶۷) شبیه‌سازی شده است. با مقایسه ویژگی‌های جریان شبیه‌سازی شده سناریوهای آینده با دوره فعلی، اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه ارزیابی شده است. به منظور تحلیل عدم قطعیت سناریوهای انتشار، از سه سناریوی A2، A1B، و B1 که به ترتیب بیانگر حالات غلظت زیاد، متوسط، و کم گازهای گلخانه‌ای هستند، استفاده شده است. نتایج حاکی از افزایش میانگین دمای حوضه بین ۳ تا ۵ درجه و افزایش تبخیر و تعرق در همه ماه‌های سال است. با وجود عدم قطعیت سناریوهای انتشار، تحت همه سناریوها بارش و جریان سالانه افزایش می‌یابد، اما توزیع فصلی نیز تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که جریان در پائیز و زمستان افزایش و در بهار و تابستان کاهش می‌یابد. کاهش جریان رودخانه در نیمه دوم سال آبی مبین لزوم توجه به اثرات تغییر اقلیم در طراحی مخازن سدها است.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم؛ حوضه رودخانه بشار؛ رژیم هیدرولوژیکی؛ شبیه‌سازی جریان روزانه؛ عامل تغییر،

مقدمه

ارزیابی اثر تغییر اقلیم آینده بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌ها و اتخاذ تدابیر سازگاری برای آن شرایط، به خصوص در ارتباط با منابع آب و طراحی سازه‌های بزرگ رودخانه‌ای، لازم است اثرات تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه‌ها ارزیابی شود (رضایی زمان و افروزی، ۱۳۹۴).

در حال حاضر معتبرترین وسیله برای شبیه‌سازی واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب تغییر متغیرهای اقلیمی کره زمین شده است و پیش‌بینی می‌شود که این تغییرات در آینده نیز ادامه یابد (IPCC, 2001). با تغییر اقلیم، متغیرهای اقلیمی از جمله دما، بارش، و تبخیر و تعرق تغییر می‌کند و این تغییرات موجب تغییر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها می‌شود. این موضوع در مطالعات متعددی ذکر شده است (IPCC, 2001). لذا به منظور

به عنوان نمونه، به طور طبیعی مقدار دما در هر روز به وقوع یا عدم وقوع بارش در آن روز وابسته است (Semenov et al., 1998, Khazaei et al., 2012). هنگامی سناریوهای اقلیم آینده برای ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم زیر مقیاس می‌شوند، برای صحت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، لازم است که این همبستگی توسط مدل ریزمقیاس نمایی حفظ شده باشد.

در میان روش‌های ریزمقیاس نمایی، روش‌های عامل تغییر ((*Change Factor (CF)*))، مولدهای استوکستیک داده‌های هواشناسی ((*Weather Generators (WG)*))، و RCMs ((*Regional Climate Models*)) همبستگی متغیرها را در ریزمقیاس نمایی حفظ می‌کنند. در این خصوص روش عامل تغییر، ساده‌ترین و متداولترین روش ریزمقیاس نمایی است (Reynard et al., 2001; Loukas et al., 2002; Prudhomme et al., 2003; Fowler et al., 2007). روش CF، میانگین‌های ماهانه‌ی متغیرهای اقلیمی فعلی یک مکان را براساس سناریوهای تغییر اقلیم مدل‌های GCM تغییر می‌دهد و سناریوهای اقلیمی آینده را برای آن مکان تولید می‌کند. در نتیجه در مطالعات ارزیابی تغییرات میانگین‌ها و سیکل ماهانه متغیرها، روشی مناسب و ساده است. با وجود آنکه نادیده گرفتن تغییر در نوسانات اقلیمی، ضعف این روش برای استفاده در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی (از جمله سیلاب‌ها) است (Fowler et al., 2007; Prudhomme et al., 2002). این روش به دلیل سادگی همچنان متداول‌ترین روش برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب نیز بوده است (Reynard et al., 2001; Loukas et al., 2002; Prudhomme et al., 2003; Mareuil et al., 2007; Kay et al., 2009; Khazaei et al., 2012). در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبریز رودخانه بشار ارزیابی شده است. در این خصوص تغییرات میانگین‌ها و سیکل سالانه متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه تحت اثر تغییر اقلیم ارزیابی شده است. به این منظور، برای ریزمقیاس نمایی سناریوهای اقلیم مدل گردش عمومی، برای سه

گردش عمومی ((*General Circulation Model (GCM)*)) هستند (IPCC, 2001). این مدل‌ها داده‌های اقلیمی را به صورت سه بعدی برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند. البته، به دلیل وضوح مکانی و زمانی کم خروجی GCMs، استفاده از آنها برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم در مقیاس حوضه آبریز مناسب نیست (Wilby, 2007) و اغلب لازم است برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی، به وضوح بهتری ریزمقیاس شوند (Reynard et al., 2003). میزان تأثیر تغییر اقلیم بر جریان آب رودخانه‌ها، علاوه بر میزان تغییر متغیرهای اقلیمی، تا حدی وابسته به خصوصیات حوضه آنها است؛ و برای تشخیص میزان این تأثیر، نیاز به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان آب می‌باشد (Leander et al., 2007). پس از فراهم شدن داده‌های مناسب اقلیمی برای اقلیم حال و سناریوهای آینده، از این داده‌ها به عنوان ورودی‌های یک مدل هیدرولوژیکی استفاده می‌شود و جریان فعلی و محتمل آینده شبیه‌سازی می‌شود. لازم است این مدل هیدرولوژیکی قبلاً برای حوضه واسنجی و اعتبارسنجی شده باشد. سپس با مقایسه ویژگی‌های جریان‌های آینده و حال، می‌توان آثار محتمل تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه رودخانه را ارزیابی کرد.

مطالعات زیادی به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر جریان رودخانه و رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها پرداخته‌اند که از جمله آنها می‌توان به مطالعات (Arnell (1999), Reynard et al., (2001), Loukas et al., (2002), Prudhomme et al., (2003), Mareuil et al., (2007), Devkota et al., Khazaei et al., (2012), Kay et al., (2009), al., (2015) اشاره کرد.

برای ریزمقیاس نمایی خروجی‌های GCMs روش‌های مختلفی توسعه یافته است. برای ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم، حداقل باید داده‌های اقلیمی بارش و دما، به گونه‌ای ریز مقیاس شوند که همبستگی بین این متغیرها حفظ شود (Fowler et al., 2007, Khazaei et al., 2012).

روش در یک ایستگاه سینوپتیک واقع در مجاورت حوضه، با روش پنمن-مانیت و واسنجی شده است (خزائی و همکاران، ۱۳۹۴).

واسنجی مدل توسط یک ابزار واسنجی خودکار به روش الگوریتم ژنتیک، که توسط *Khazaei et al., 2014* برای مدل ARNO توسعه داده شده، انجام شده است. مدل توسط قسمتی از داده های موجود واسنجی شده و توسط قسمت دیگری از داده ها که در مرحله واسنجی از آنها استفاده نشده است، اعتبارسنجی شده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص کارایی نش-ساتکلیف (Nash و Sutcliffe, 1970) و ضریب تعیین استفاده شده است. این شاخص ها توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته اند (خزائی و همکاران، ۱۳۹۴). Servat و Dezetter (۱۹۹۱) و Han و Rao (۱۹۸۷)، شاخص کارایی نش-ساتکلیف را به عنوان بهترین معیار برای واسنجی مدل بارش رواناب معرفی کردند. شاخص کارایی نش-ساتکلیف به صورت زیر تعریف می شود.

$$EC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

که در آن، Q_{obs_i} جریان مشاهداتی در روز i ام، Q_{sim_i} جریان شبیه سازی شده در روز i ام، و $\overline{Q_{obs}}$ میانگین جریان مشاهداتی در دوره شبیه سازی است. تغییرات این شاخص از $-\infty$ تا $+1$ بوده و هر چه شبیه سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به یک نزدیک تر است. مقدار صفر برای شاخص کارایی نش-ساتکلیف به معنی آن است که شبیه سازی بهتر از مقدار میانگین داده های مشاهداتی رواناب نیست. ضریب تعیین (R^2) نیز مجذور ضریب همبستگی است.

ریزمقیاس نمایی

برای ریزمقیاس نمایی سناریوهای مدل جهانی اقلیم از روش عامل تغییر استفاده شده است. در این روش تفاوت میانگین بین خروجی های GCM برای دوره کنترل و آینده

سناریوی انتشار A1B، A2، و B1، از روش عامل تغییر استفاده شده است و جریان رودخانه توسط یک مدل روزانه نیمه توزیعی مفهومی، که به خوبی برای حوضه واسنجی و اعتبارسنجی شده است، شبیه سازی شده است.

مواد و روش ها

شبیه سازی جریان روزانه

برای شبیه سازی جریان، از مدل بارش-رواناب روزانه ARNO استفاده شده است. ARNO یک مدل مفهومی نیمه توزیعی پیوسته است که توسط Todini (۱۹۹۸) توسعه داده شده است. مولفه های اصلی این مدل شامل مولفه تعادل رطوبت خاک، مولفه تلفات تبخیر و تعرق، مولفه ذوب و ذخیره برف، مولفه جریان آب زیر زمینی، و مولفه روندیابی جریان سطحی هستند. در مولفه تعادل رطوبت خاک این مدل، ظرفیت رطوبت خاک در سطح حوضه به صورت یک متغیر لحاظ شده و تغییرات آن توسط یک تابع توزیع احتمال بیان می شود. این ویژگی سبب شده است که جریان خروجی حوضه، با تعداد کمتری پارامتر نسبت به مدل های سنتی تر شبیه سازی شود (Todini, 1996). داده های مورد نیاز مدل، سری های روزانه بارش، دما، و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه و مشخصات حوضه از جمله مساحت، کاربری اراضی و شیب متوسط است. جزئیات بیشتر در خصوص این مدل توسط Todini (1996) و *Khazaei et al. (2014)* توصیف شده است. از دیگر دلایل انتخاب این مدل، می توان به موارد زیر اشاره کرد. این مدل به صورت گسترده در مطالعاتی همچون برنامه ریزی آب، تحلیل جریان های کم، تحلیل سیل های حدی، پیش بینی زمان واقعی سیل، و مطالعات اثرات تغییر اقلیم، در مناطق مختلف دنیا با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (Abdulla et al., 1999; Fowler et al., 2007; Todini, 1996).

سری های روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه با به کارگیری روش هارگریوز-سامانی محاسبه شده است. این

منطقه تحقیق و داده ها

حوضه مورد مطالعه، حوضه رودخانه بشار واقع در محدوده جغرافیایی ۵۱° تا ۵۲° طول شرقی و ۳۰° تا ۳۱° عرض شمالی در جنوب غربی ایران است. مساحت حوضه ۲۸۰۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن ۲۲۷۷ متر از سطح دریا است. از ۲۷ سال داده های بارش روزانه، دمای حداقل روزانه، و دمای حداکثر روزانه ایستگاه تبخیر سنجی یاسوج با کد ۲۰۳-۲۱ واقع در مرکز حوضه برای سالهای ۲۰۰۰-۱۹۷۴ و ۸ سال داده‌های با کیفیت جریان روزانه ایستگاه خروجی حوضه با کد ۲۱۵-۲۱ استفاده شده است. داده های ۸ ساله جریان به همراه داده های هم دوره بارش و دمای حوضه، به دو دوره چهار ساله مجزا تقسیم شد و از یک دوره چهار ساله برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی و از دوره چهار ساله دیگر برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد. تحقیقات پیشین استفاده از حداقل ۲ تا ۳ سال داده برای واسنجی مدل را کافی می‌دانند (Todini, 1996).

همچنین سناریوهای اقلیمی A1B، A2، و B1 مدل جهانی اقلیم CGCM3 برای سلول مربوط به حوضه مورد استفاده قرار گرفته است. علت انتخاب این سه سناریو که منبای اجرای مدل CGCM3 بوده‌اند آن است که سناریوی A2، A1B، و B1 به ترتیب بیانگر حالات بدبینانه، بینابینی و خوش‌بینانه شرایط انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند و تقریباً به ترتیب در موقعیت‌های میانه و حدود ۸۰ درصد بالا و پایین سناریوهای انتشار قرار دارند. لذا این سه سناریو دامنه وسیعی از حالات ممکن انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده را در بر می‌گیرند. خروجی‌های روزانه مورد استفاده از مدل CGCM3 مربوط به دوره کنترل ۲۰۰۰-۱۹۷۴ و دوره آینده ۹۳-۲۰۶۷ است.

نتایج و بحث

شبیه سازی جریان رودخانه

مدل هیدرولوژیکی توسط دو دوره چهار ساله داده‌های با کیفیت حوضه، واسنجی و اعتبار سنجی شد. برای

برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه می‌شود. سپس این مقادیر به هر داده روزانه سری مشاهداتی، وابسته به آنکه در کدام ماه سال قرار دارد، به صورت جمع یا ضرب، اعمال می‌شود. به این ترتیب سناریوهای اقلیم آینده تولید می‌شوند.

در این روش برای ریزمقیاس نمایی و تولید سناریوهای آینده بارش روزانه از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$P_{i,j}^F = \frac{P_j^{F,GCM}}{P_j^{B,GCM}} \times P_{i,j}^O \quad (2)$$

که در آن، $P_{i,j}^F$ بارش روز نام از سری بارش سناریوی اقلیم آینده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد. $P_{i,j}^O$ بارش روز نام از سری بارش مشاهداتی ثبت شده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد. $P_j^{F,GCM}$ میانگین بارش ماه‌های j سناریوی بارش آینده مدل GCM و $P_j^{B,GCM}$ میانگین بارش ماه‌های j از سری بارش مدل GCM در دوره کنترل است.

برای ریزمقیاس نمایی و تولید سناریوهای آینده هر یک از متغیرهای دمای حداقل یا دمای حداکثر روزانه از رابطه زیر استفاده می‌شود.

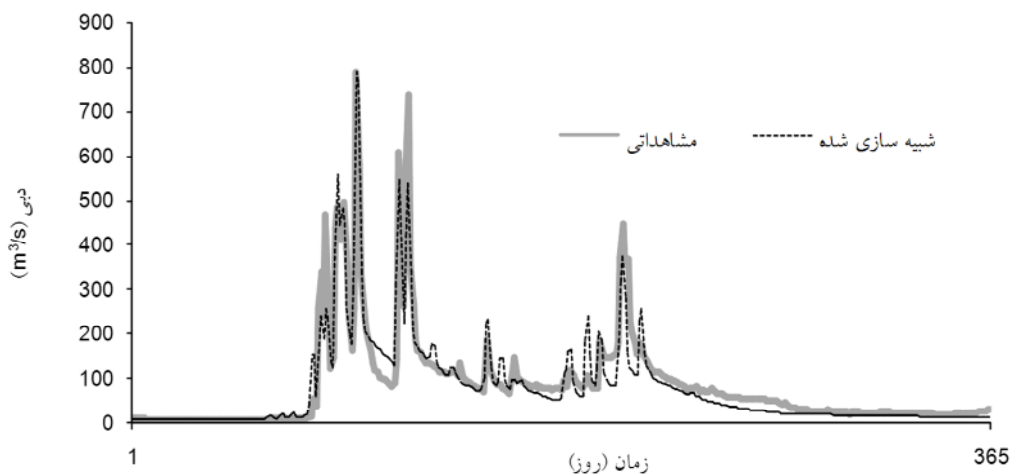
$$T_{i,j}^F = T_j^{F,GCM} - T_j^{B,GCM} + T_{i,j}^O \quad (3)$$

که در آن، $T_{i,j}^F$ دمای روز نام از سری دمای سناریوی اقلیم آینده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد. $T_{i,j}^O$ دمای روز نام از سری دمای مشاهداتی ثبت شده است که در ماه j از ماه‌های سال قرار دارد. $T_j^{F,GCM}$ میانگین دمای ماه‌های j سناریوی دمای آینده مدل GCM و $T_j^{B,GCM}$ میانگین دمای ماه‌های j از سری دمای مدل GCM در دوره کنترل است. رابطه فوق برای هر یک از سری‌های دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه به صورت جداگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این روابط برای ریزمقیاس نمایی هر یک از سناریوهای انتشار به صورت جداگانه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

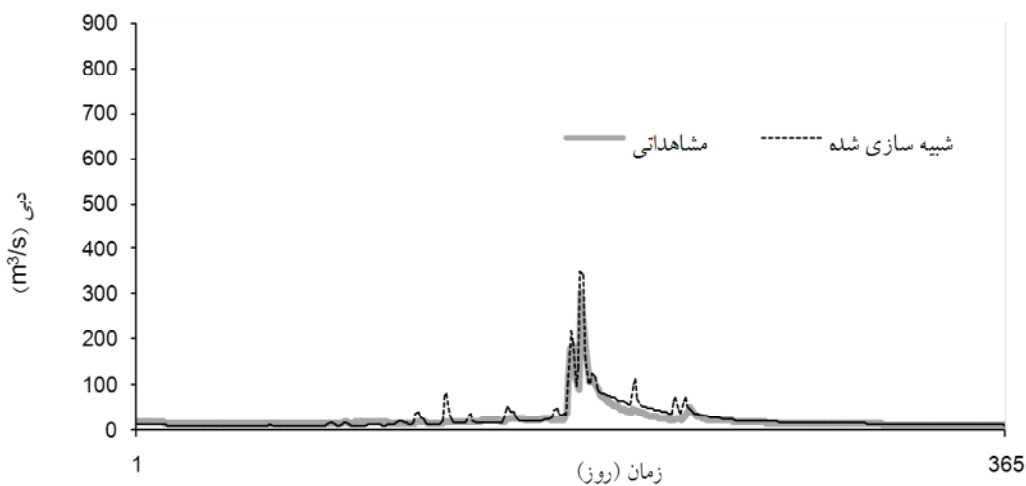
در حالی که Kamali و همکاران (۲۰۰۷)، مقادیر شاخص کارایی نش- ساتکلیف بزرگتر از ۰/۷ را برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی روزانه قابل قبول دانستند. در نتیجه عملکرد مدل هیدرولوژیکی در شبیه سازی جریان رودخانه حوضه بشار خوب ارزیابی می شود. مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای پرآب ترین سال دوره و خشک‌ترین سال دوره به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. این سال‌ها به ترتیب در دوره واسنجی و دوره اعتبارسنجی واقع هستند. همانطور که مشاهده می شود مدل جریان حوضه را چه در سال خشک و چه در سال پرآب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به خوبی شبیه سازی کرده است.

واسنجی مدل از روش الگوریتم ژنتیک (Khazaei et al., 2014) استفاده شد.

در مرحله واسنجی مدل، شاخص کارایی نش- ساتکلیف برای داده‌های روزانه معادل ۰/۸۷ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۵ به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز مقادیر شاخص کارایی نش- ساتکلیف برابر ۰/۸۳ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۸ به دست آمد. مقادیر این شاخص‌ها در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، به مقادیر ایده‌آل آنها به میزان قابل توجهی نزدیک است. در مقایسه با دیگر مطالعات شبیه‌سازی بارش- رواناب روزانه، Zhang و Savenije (۲۰۰۵)، معیار شبیه‌سازی خوب را شاخص کارایی نش- ساتکلیف بزرگتر از ۰/۶ برگزیدند.



شکل ۱. عملکرد مدل در شبیه سازی پرآب‌ترین سال که در دوره واسنجی واقع است (سال آبی ۸۱-۱۳۸۰).



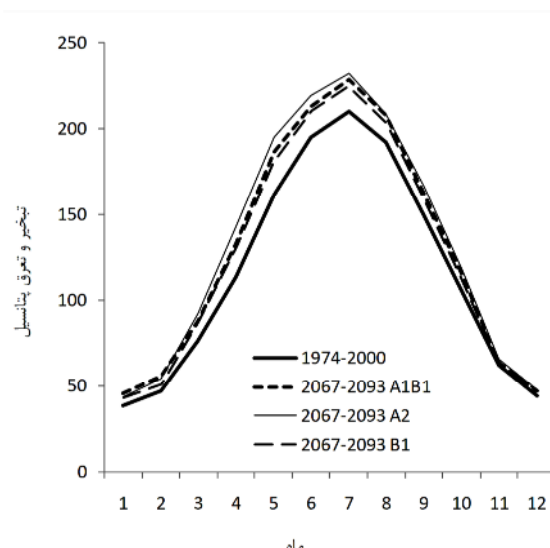
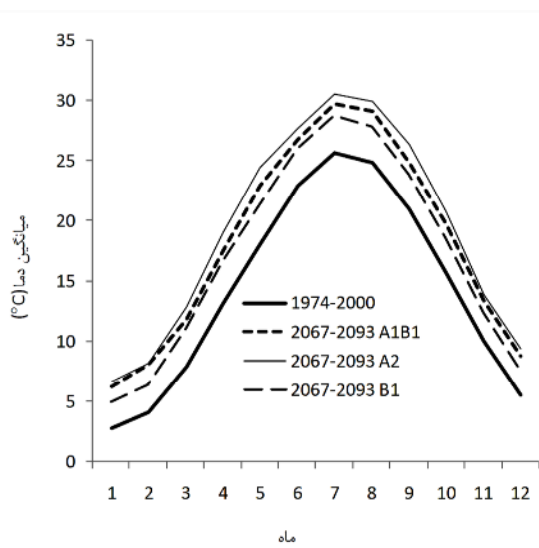
شکل ۲. عملکرد مدل در شبیه سازی خشک‌ترین سال که در دوره اعتبارسنجی واقع است (سال آبی ۶۳-۱۳۶۲).

افزایش مربوط به فصل زمستان است. بر این مبنای پیش‌یابی می‌شود که تبخیر و تعرق پتانسیل میانگین فصل تابستان از ۵۵۲ میلی‌متر در اقلیم فعلی به ۵۸۸ (برای سناریوی B1) تا ۶۰۷ میلی‌متر (برای سناریوی A2) برسد؛ و تبخیر و تعرق پتانسیل میانگین فصل زمستان از ۱۶۱ میلی‌متر در اقلیم فعلی به ۱۸۲ (برای سناریوی B1) تا ۱۸۹ میلی‌متر (برای سناریوی A2) برسد. همچنین انتظار می‌رود مقدار سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه از ۱۳۹۲ میلی‌متر به ۱۵۱۷ تا ۱۵۸۴ افزایش یابد. این افزایش در تبخیر و تعرق پتانسیل در جهت افزایش تلفات آب حوضه از این طریق است.

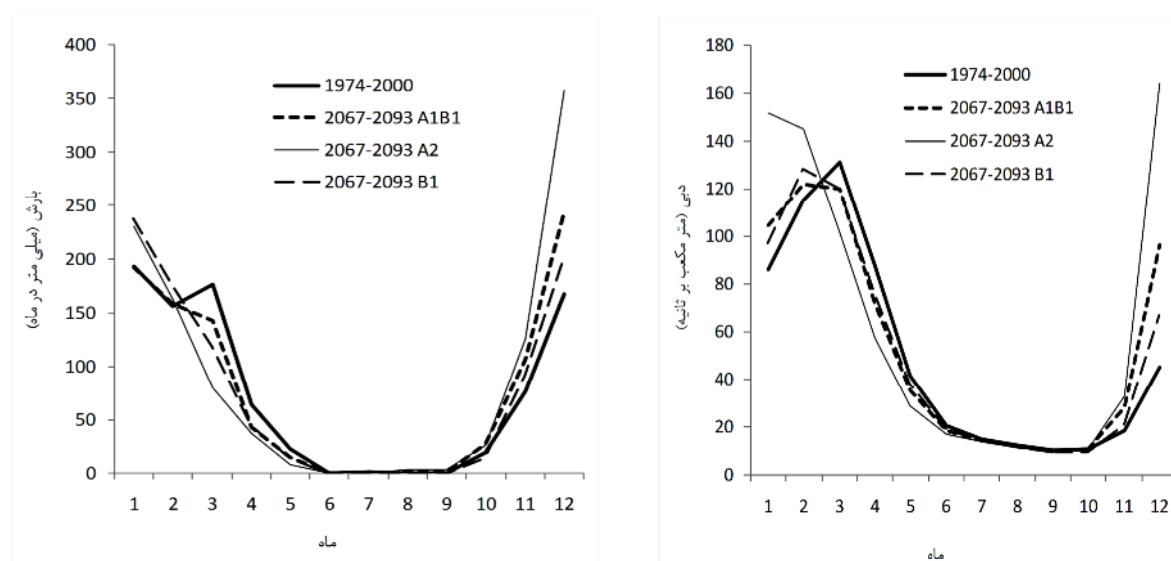
شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نمایش نتایج پیش‌گویی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های ماهانه و فصلی بارش و جریان حوضه است. مقادیر میانگین و درصد تغییرات فصلی این متغیرها نیز به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. علاوه بر آن، مقادیر سالانه‌ی بارش و جریان حوضه برای اقلیم فعلی و سناریوهای آینده در جدول (۴) ارائه شده است.

ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه پیش‌گویی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های ماهانه دما و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه برای سه سناریوی انتشار، در شکل (۳) نشان داده شده است. میانگین‌ها و درصدهای تغییرات فصلی دما و تبخیر و تعرق پتانسیل، به ترتیب در جداول (۱) و (۲)، و مقادیر سالانه‌ی این متغیرها برای اقلیم فعلی و سناریوهای اقلیم تغییر یافته آینده در جدول (۴) ارائه شده است. بر مبنای این نتایج، پیش‌یابی می‌شود که دمای میانگین حوضه در دوره آینده (۹۳-۲۰۶۷)، بین ۳ تا ۵ درجه نسبت به اقلیم فعلی افزایش یابد. بر این مبنای بیشترین تغییرات دما مربوط به سناریوی A2 و کمترین آن مربوط به سناریوی B1 است. همانطور که در شکل (۳) و جدول (۲) مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود که دما در ماه‌ها و فصل‌های مختلف سال تقریباً به مقدار یکسان افزایش یابد.

بر مبنای سناریوهای مختلف، انتظار می‌رود تبخیر و تعرق پتانسیل در همه‌ی ماه‌های سال افزایش یابد؛ که بیشترین افزایش مربوط به فصل تابستان و کمترین



شکل ۳. پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های ماهانه‌ی دما و تبخیر و تعرق حوضه رودخانه بشار. محور افقی، ماه‌های میلادی از ژانویه تا دسامبر است.



شکل ۴. پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های دبی جریان و بارش ماهانه حوضه رودخانه بشار. محور افقی، ماه‌های میلادی از ژانویه تا دسامبر است.

بر مبنای همه‌ی سناریوهای مورد بررسی انتظار می‌آید رود بارش و جریان سالانه حوضه در اقلیم آینده افزایش یابد. پیش‌یابی می‌شود که مقدار بارش سالانه از مقدار ۱۳۹۲ میلی‌متر در سال به مقداری بین ۱۵۱۷ (سناریوی B1) تا ۱۵۸۴ (سناریوی A2) میلی‌متر در سال افزایش یابد. همچنین پیش‌یابی می‌شود که میانگین جریان سالانه از ۴۹/۱ متر مکعب در سال به مقداری بین ۵۰/۷ تا ۶۱/۵ افزایش یابد؛ با این حال تغییرات بارش و جریان در همه سال یکسان نیست. کاهش بارش در زمستان و بهار و کاهش جریان در بهار و تابستان که نیمه دوم سال آبی است، می‌تواند نگران‌کننده باشد. نتایج نشان می‌دهد که با وجود افزایش جریان رودخانه در پائیز و زمستان، میانگین جریان در بهار بر مبنای سناریوهای مختلف بین ۱۱ تا ۳۱ درصد، کاهش می‌یابد و همچنین میانگین جریان تابستانی رودخانه بین ۴ تا ۹ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع لزوم توجه به اثر تغییر اقلیم در طراحی مخازن ذخیره آب آینده را نشان می‌دهد.

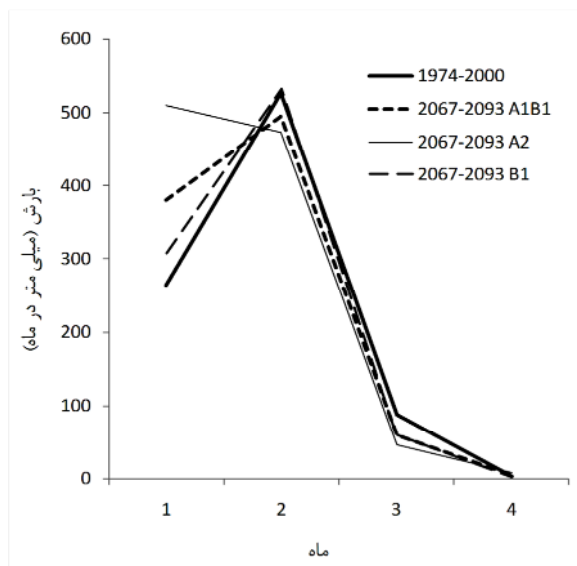
همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، تغییرات میانگین‌های بارش و جریان در ماه‌های مختلف متفاوت است. این نتایج حاکی از تغییر توزیع فصلی بارش و جریان در اقلیم آینده است. به عنوان نمونه بر مبنای همه سناریوها، بارش و جریان حوضه در ماه‌های دسامبر و ژانویه افزایش خواهد یافت و در ماه‌های مارس و آوریل کاهش خواهد یافت. مقادیر و درصد فصلی این تغییرات در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. شایان توجه است که تغییرات توزیع‌های بارش و جریان کاملاً بر همدیگر منطبق نیست و این به دلیل آن است که علاوه بر بارش، متغیرهای دما و تبخیر و تعرق نیز بر جریان موثرند. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که بر مبنای همه سناریوها، با وجود کاهش بارش در فصل زمستان، جریان در این فصل افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش دما در اقلیم آینده، سهم ذخیره برف از بارش‌های زمستانی کاهش یابد.

جدول ۱. پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای فصلی حوضه رودخانه بشار. مقادیر میانگین متغیرها در دروه فعلی و سناریوهای اقلیم آینده مقایسه شده‌اند.

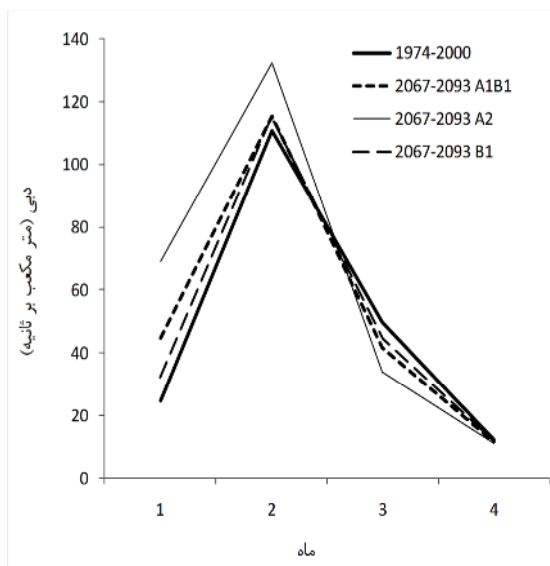
پائیز	زمستان	بهار	تابستان			
۲۱۰	۱۶۱	۴۷۰	۵۵۲	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	۱۹۷۴-۲۰۰۰	دوره فعلی
۲۵	۱۱۱	۵۰	۱۲	دبی رودخانه (متر مکعب بر ثانیه)		
۲۶۴	۵۲۶	۸۸	۳	بارش (میلی متر)		
۱۰	۵	۱۸	۲۴	دما (درجه سانتی‌گراد)		
۲۲۶	۱۸۹	۵۳۳	۵۹۹	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	AIB	
۴۵	۱۱۵	۴۲	۱۲	دبی رودخانه (متر مکعب بر ثانیه)		
۳۷۹	۴۹۴	۵۹	۴	بارش (میلی متر)		
۱۴	۹	۲۲	۲۸	دما (درجه سانتی‌گراد)		
۲۳۰	۱۸۹	۵۵۷	۶۰۷	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	A2	سناریوی آینده
۶۹	۱۳۲	۳۴	۱۱	دبی رودخانه (متر مکعب بر ثانیه)		
۵۱۰	۴۷۴	۴۶	۸	بارش (میلی متر)		
۱۵	۹	۲۴	۲۹	دما (درجه سانتی‌گراد)		
۲۲۴	۱۸۲	۵۲۲	۵۸۸	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)	BI	
۳۲	۱۱۵	۴۵	۱۲	دبی رودخانه (متر مکعب بر ثانیه)		
۳۰۷	۵۳۲	۵۹	۱	بارش (میلی متر)		
۱۳	۸	۲۱	۲۷	دما (درجه سانتی‌گراد)		

جدول ۲. درصد تغییرات متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی اقلیم تغییر یافته آینده نسبت به اقلیم فعلی

پائیز	بهار	تابستان	زمستان			
۸	۱۳	۹	۱۸	تبخیر و تعرق پتانسیل	AIB	
۸۲	-۱۶	-۵	۴	دبی رودخانه		
۴۴	-۳۳	۴۳	-۶	بارش		
۳۵	۲۴	۱۷	۷۸	دما		
۱۰	۱۸	۱۰	۱۸	تبخیر و تعرق پتانسیل	A2	سناریوی آینده
۱۸۰	-۳۱	-۹	۲۰	دبی رودخانه		
۹۳	-۴۸	۱۸۶	-۱۰	بارش		
۴۱	۳۲	۲۲	۸۷	دما		
۷	۱۱	۷	۱۳	تبخیر و تعرق پتانسیل	BI	
۳۱	-۱۱	-۴	۴	دبی رودخانه		
۱۶	-۳۳	-۴۷	۱	بارش		
۲۴	۱۸	۱۳	۵۳	دما		



شکل ۶: پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های بارش فصلی حوضه رودخانه بشار. محور افقی، فصل از پائیز تا تابستان است.



شکل ۵: پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر میانگین‌های جریان فصلی حوضه رودخانه بشار. محور افقی، فصل از پائیز تا تابستان است.

جدول ۳. پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای سالانه حوضه رودخانه بشار

سناریوهای اقلیم تغییر یافته آینده ۲۰۶۷-۲۰۹۳			دوره مشاهداتی	
B1	A2	A1B	۱۹۷۴-۲۰۰۰	
۱۷/۱	۱۹/۱	۱۸/۳	۱۴/۳	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱۵۱۷	۱۵۸۴	۱۵۴۷	۱۳۹۲	تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر در سال)
۹۰۰	۱۰۳۸	۹۳۶	۸۸۰	بارش (میلی متر در سال)
۵۰/۷	۶۱/۵	۵۳/۱	۴۹/۱	دبی رودخانه (متر مکعب بر ثانیه)

نتیجه گیری

روزانه حوضه است. با ورود داده‌های اقلیم فعلی (۲۰۰۰-۱۹۷۴) و سناریوهای اقلیم آینده (۲۰۶۷-۲۰۹۳) به مدل هیدرولوژیکی، جریان روزانه رودخانه برای سناریوهای اقلیم آینده و اقلیم فعلی شبیه سازی و مقایسه شد. عدم قطعیت سناریوهای انتشار با استفاده از تحلیل نتایج برای سه سناریوی انتشار A2، A1B، و B1 که به ترتیب بیانگر حالات انتشار بدبینانه، بینابینی، و خوش بینانه‌ی گازهای گلخانه‌ای هستند، بررسی شد.

بر مبنای نتایج این پژوهش، در دوره ۹۳-۲۰۶۷ میانگین دمای حوضه بین ۳ تا ۵ درجه نسبت به دوره فعلی (۱۹۷۴-۲۰۰۰) افزایش می‌یابد و این افزایش در ماه‌های مختلف سال تقریباً یکنواخت است. تحت همه

در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر یک حوضه آبریز کوهستانی واقع در جنوب غربی ایران ارزیابی شد. به این منظور سناریوهای اقلیمی بارش و دمای مدل CGCM3 به روش عامل تغییر برای حوضه ریز مقیاس شد. تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه به روش هارگریوز-سامانی که قبلاً توسط روش پنمن-مانتیت و اسنچی شده بود، تولید شد. جریان روزانه رودخانه توسط یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی مفهومی شبیه سازی شد. شاخص کارایی نش-ساتکلیف روزانه در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل، به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۳ به دست آمد که بیانگر عملکرد خوب مدل هیدرولوژیکی در شبیه سازی جریان

برف از بارش‌های زمستانی کاهش یافته و جریان افزایش می‌یابد. این موضوع مبین اهمیت استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی (در مطالعه آثار تغییر اقلیم) است، که مولفه‌های مهم موثر بر جریان را در نظر می‌گیرد. بیشترین افزایش جریان مربوط به ماه دسامبر، با افزایش بین ۴۸ تا ۲۶۵ درصد، و بیشترین کاهش مربوط به ماه آوریل، با کاهشی بین ۱۳ تا ۳۵ درصد نسبت به جریان در دوره فعلی و بر مبنای سناریوهای انتشار مختلف، است.

کاهش جریان رودخانه در نیمه دوم سال آبی مبین لزوم توجه به اثرات تغییر اقلیم در طراحی مخازن سدها است. در نتایج این پژوهش، عدم قطعیت سناریوهای اقلیمی در نظر گرفته شد. لیکن نتایج چنین تحقیقی می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های دیگری همچون عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و نوسانات اقلیمی مطمئن‌تر گردد.

سناریوها تبخیر و تعرق حوضه نیز در همه ماه‌های سال افزایش می‌یابد و مقدار افزایش آن در ماه‌های تابستان بیش از ماه‌های زمستان است. بر مبنای همه‌ی سناریوها، پیش‌یابی می‌شود که مقدار بارش سالانه بین ۲ تا ۱۸ درصد و مقدار جریان سالانه بین ۳ تا ۲۵ درصد افزایش یابد. با وجود آن، توزیع فصلی نیز تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که جریان در پائیز و زمستان افزایش و در بهار و تابستان کاهش می‌یابد.

شایان توجه است که تغییرات توزیع‌های بارش و جریان کاملاً بر همدیگر منطبق نیست. در فصل زمستان با وجود کاهش بارش بین ۶ تا ۱۰ درصد برای سناریوهای A1B و A2، مقدار جریان بین ۴ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. این به دلیل آن است که علاوه بر بارش، متغیرهای دما و تبخیر و تعرق نیز بر جریان موثرند. به عنوان نمونه با افزایش دما در اقلیم آینده، سهم ذخیره

فهرست منابع

- خزائی، م. ر.، ذهبیون، ب.، و تقیان، ب. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه آبریز در شرایط کمبود داده. فصلنامه علمی- پژوهشی علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۶۴: ۷۷-۹۰.
- رضایی زمان، م. و افروزی، ع. ۱۳۹۴. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات و ارائه راهبرد تغییر الگوی کشت (مطالعه موردی: حوضه سیمینه رود). نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴ (۴): ۵۱-۶۴.
- Abdulla, F.A., Lettenmaier, D.P. and Liang, X. 1999. Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data. *Journal of Hydrology*, 222: 37-54.
- Arnell, N.W. 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*, 9:5-23.
- Devkota, L.P. and Gyawali, D.R. 2015. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4: 502-515.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27: 1547-1578.
- IPCC, 2001. Climate change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press.
- Kamali, M., Ponnambalam, K., and Soulis, E. D. 2007. Computationally efficient calibration of WATCLASS Hydrologic models using surrogate optimization. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4: 2307-2321.
- Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A. and Jones, R.G. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92: 41-63.
- Khazaei, M.R., Zahabiyou B. and Saghafian, B. 2014. Development of an automatic calibration tool using genetic algorithm for the ARNO conceptual rainfall-runoff model, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 2535-2549.
- Khazaei, M.R., Zahabiyou B. and Saghafian, B. 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*, 32: 1997-2006.
- Leander, R. and Buishand, T.A. 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332 (3-4): 487-496.

- Loukas, A., Vasiliades, L. and Dalezios, N. R. 2002. Potential climate change impacts on flood producing mechanisms in southern British Columbia, Canada using the CGCMA1 simulation results. *Journal of Hydrology*, 259: 163-188.
- Mareuil, A., Leconte, R., Brissette, F. and Minville, M. 2007. Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Chateauguay River basin, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34: 1048-1060.
- Nash JE and Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion on principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*, 277: 1-23.
- Prudhomme, C., Reynard, N. and Crooks, S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes*, 16: 1137-1150.
- Rao, A.R. and Han, J. 1987. Analysis of objective functions used in urban runoff models. *Advances in Water Resources*, 10: 205-211.
- Reynard, N.S., Crooks S.M., Prudhomme, C, Svensson, C. and Kay, A.L. 2003. Impact of climate change on flood flows in river catchments. Interim report for Defra / EA project W5-032. 49pp.
- Reynard, N.S., Prudhomme, C. and Crooks, S.M. 2001. The flood characteristics of large UK Rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 48: 343-359.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10: 95-107.
- Servat, E., and Dezetter, A. 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Science Journal*, 36: 307-330.
- Todini, E., 1996. The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 175: 339-382.
- Wilby, R. L., Christian, W.D. 2007. SDSM 4.1, User Manual.
- Zhang, G.P. and Savenije, H.H.G. 2005. Rainfall-runoff modeling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 243-261.



Climate change impact assessment on hydrological regimes of a mountainous river basin in Iran

Mohammad Reza Khazaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Iran

*Corresponding author email: m_r_khazaei@yahoo.com

Received: 07-01-2016

Accepted: 16-03-2016

Abstract

Limited water resources, population growth and further exploitation of its, The status of water resources was threatened in future. Climate change also is one of the phenomena that nowadays researches and water sector decision makers are concerned. In this research, climate change impacts on hydrological regime of a mountainous river basin are assessed. In order to do that, scenarios of global climate models are downscaled by using change factor method. The climate scenarios are used as inputs of a rainfall-runoff model, which is well calibrated for the basin, and daily stream-flow series for present condition and future scenarios (2067-93) are simulated. By comparison of river-flow characteristics for present condition and future scenarios, the climate change impacts on hydrologic regime of the basin are assessed. For analysis of the emission scenarios uncertainty, scenarios of A2, A1B, and B1, which relevant to high, medium, and low emission scenarios, respectively. Based on the results, basin temperature will increase between 3 to 5 Celsius degrees and potential evapotranspiration will increase for all month of the year. Despite uncertainty of emission scenarios, under all emission scenarios, annual average of rainfall and stream flow will raise; however, seasonal cycle of rainfall and river flow will change, too. Average river flow in the autumn and winter will increase, while the average river flow in spring and summer will decrease. Decreasing of the river flow in the second half of the water year, Implies the importance of considering of the climate change impacts on the river-flow for designing of dam's reservoir.

Keywords: Bashar river basin; climate change; change factor; daily stream-flow simulation; hydrological regime