

تحلیل عدم قطعیت مدل های GCM و سناریوهای انتشار در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ماهانه حوضه بشار

محمد رضا خزائی^{۱*}

m_r_khazaei@yahoo.com

حدیث خزائی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۹

چکیده

زمینه و هدف: در این مقاله، بزرگی و اهمیت عدم قطعیت های ساختار مدل های GCM و سناریوهای انتشار در نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه حوضه رودخانه ی بشار بررسی و مقایسه شده است.

روش بررسی: جریان حوضه توسط یک مدل بارش-رواناب مفهومی به خوبی شبیه سازی شد. سناریوهای اقلیمی دوره ۹۳-۲۰۶۷ خروجی شش مدل GCM برای سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه ای به روش عامل تغییرات ریز مقیاس شد. با ورود داده های اقلیمی دوره پایه و هر یک از ۱۸ سناریوی اقلیم آینده به مدل بارش-رواناب، اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه ی حوضه ارزیابی شد. با مقایسه دامنه ی تغییرات نتایج تحت مدل های GCM و سناریوهای انتشار مختلف، عدم قطعیت آن ها در نتایج بررسی و مقایسه شد.

یافته ها: در شبیه سازی جریان ماهانه ضریب تعیین (R^2) در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۰/۹۴ به دست آمد. تحت هر یک از سناریوهای انتشار و مدل های GCM پیش یابی می شود جریان و رژیم فصلی رودخانه در اقلیم آینده تغییر کند. با وجود آن، هر یک از عدم قطعیت های ناشی از انتخاب مدل های GCM و سناریوی انتشار در نتایج مهم است. به عنوان نمونه تحت سناریوهای انتشار و GCM های مختلف میانگین جریان ماه دسامبر در آینده از ۲۶٪ کاهش تا ۱۲۳٪ افزایش یابد.

بحث و نتیجه گیری: پیش یابی می شود که تغییر اقلیم اثر مهمی بر جریان حوضه داشته باشد. اگرچه عدم قطعیت مدل های GCM از عدم قطعیت سناریوی انتشار بزرگ تر است، اما هیچ یک از این عدم قطعیت ها در تصمیم گیری طرح های آینده ی حوضه قابل چشم پوشی نیست.

واژه های کلیدی: جریان ماهانه، عدم قطعیت، تغییر اقلیم، حوضه بشار.

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران* (مسوول مکاتبات).

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

Scenarios In Climate Change Impact Assessment on Monthly Stream-flow of Karun Basin

Mohammad Reza Khazaei^{1*}

m_r_khazae@yaho.com

Hadis Khazaei²

Admission Date: November 5, 2016

Date Received: August 9, 2016

Abstract

Background and Objective: In this paper uncertainties of GCM's structure and emission scenarios in climate change impact assessment on monthly stream-flow of Bashar River basins are investigated and compared.

Method: stream-flow of the basin was simulated using a conceptual rainfall-runoff model. Climate scenarios simulated by 6 GCM under 3 emission scenarios for 2063-93 periods were downscaled using change factors method. Using these 18 future scenarios and observed climate data as inputs of the rainfall-runoff model, climate change impact on monthly stream-flow of the basin was assessed. Ranges of the results under various GCMs and emission scenarios were assessed and uncertainty of the GCMs and emission scenarios in the results were investigated.

Results: In simulation of the monthly stream-flow of the basin, coefficient of determination (R^2) reached values of 0.96 and 0.94 during calibration and validation, respectively. Under each of emission scenarios and GCMs it is projected that the amounts and annual cycle of the stream-flow will change. However, the amount and direction of the changes are different for various GCMs and emission scenarios. As instant, for September's under various GCMs and emission scenarios the mean stream-flow may changes between 26% decrease to 123% increase.

Conclusion: It is projected that climate change will have important impacts on the basin's stream-flow. The uncertainty from GCM structure is larger than uncertainty from emission scenarios. However, the uncertainty from emission scenarios is significant, too, and cannot be ignored.

Key words: monthly stream-flow, uncertainty, climate change, Bashar River Basin.

1- Associates Professor, Faculty of Civil Engineering, Payame Noor University, I.R of Iran. *(Corresponding author)

2- M.Sc. Student, Technical and Engineering Faculty, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

مقدمه

اقلیمی و عدم قطعیت ساختار مدل های هیدرولوژیکی نیز در ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم مطرح است. اما عدم قطعیت مدل های GCM و سناریوهای انتشار در همه مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم مشترک است.

اگرچه مطالعات بسیاری در مناطق مختلف جهان به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بدون به حساب آوردن عدم قطعیت ها پرداخته اند، اما این مطالعات عموماً به لزوم در نظر گرفتن عدم قطعیت ها اذعان داشته اند. در مطالعات محدودی به بررسی عدم قطعیت ها در ارزیابی آثار هیدرولوژیکی پرداخته شده است، که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد: روول (۲۰۰۶) عدم قطعیت سناریوهای انتشار و مدل های GCM را بر تغییر متغیرهای دما و بارش فصلی در انگلستان ارزیابی کرد. برای هر دو متغیر، عدم قطعیت ساختار مدل های GCM بزرگ تر از سناریوهای انتشار بود (۶). ویلی و همکاران (۲۰۰۶) عدم قطعیت های مدل های GCM و سناریوهای انتشار را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان روزانه را در یک حوضه در انگلستان بررسی کردند و مشاهده کردند که عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل - های GCM بزرگ تر از عدم قطعیت سناریوی انتشار است (۷). در مطالعه دیگری، ویلی و هاریس (۲۰۰۶) برای آن که منابع عدم قطعیت بیش تری را بررسی کنند، از چهار مدل GCM، دو سناریوی انتشار، دو روش کاهش مقیاس، دو مدل هیدرولوژیکی، و دو سری پارامتر مدل هیدرولوژیکی برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان های کمینه در حوضه Thames استفاده کردند. ایشان نتیجه گرفتند که بیش ترین عدم قطعیت مربوط به انتخاب مدل GCM است (۸). کامرون (۲۰۰۶) عدم قطعیت مدل های GCM، سناریوهای انتشار و نوسانات اقلیمی را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب های یک حوضه در اسکاتلند بررسی کرد. وی نتیجه گرفت که لازم است بیش از یک مدل GCM در چنین مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد (۹). سرات کاپدیولا و همکاران (۲۰۰۷) عدم قطعیت مدل های GCM و سناریوهای انتشار را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه San Pedro در آمریکا

تغییر اقلیم موجب تغییر ویژگی های متغیرهای اقلیمی از جمله بارش و دما می شود (۱) و در نتیجه، ویژگی های جریان رودخانه ها نیز تغییر می کند. چنین تغییراتی می تواند تأثیر مهمی بر جوامع انسانی و محیط زیست در آینده داشته باشد (۲). برای کسب آمادگی برای شرایط اقلیمی آینده و کاهش آثار زیان بار آن، لازم است اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه پیش یابی شود. اما در حال حاضر نتایج مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم هنوز با دشواری ها و عدم قطعیت های زیادی همراه است و نمی توان آثار تغییر اقلیم را به صورت قطعی برای یک منطقه تعیین کرد.

معتبرترین وسیله برای شبیه سازی واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه ای، مدل های جهانی اقلیم (General Climate Model (GCM) هستند (۳). این مدل ها سناریوهای اقلیمی (از جمله داده های بارش و دما) آینده را برای سراسر کره زمین شبیه سازی می کنند. مدل های GCM متعددی وجود دارد که در کشورهای مختلف در نقاط مختلف جهان تولید و اجرا شده اند. به دلیل تفاوت ساختار این مدل ها، عموماً پیش یابی های آن ها حتی برای یک سناریوی انتشار یکسان متفاوت است. در نتیجه از جمله ی مهم ترین عوامل عدم قطعیت در پیش یابی آثار تغییر اقلیم، تفاوت پیش یابی مدل های GCM مختلف است (۴).

از دیگر عوامل عدم قطعیت در نتایج پیش یابی اقلیم آینده یک منطقه، عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای در آینده می باشد. میزان انتشار گازهای گلخانه ای در آینده به صورت قطعی معلوم نیست و سناریوهای مختلفی برای آن محتمل است. هیأت بین دول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC))، چهار سناریوی مختلف را منتشر کرده است که در آن ها انواع مختلفی از چگونگی انتشار گازهای گلخانه ای وجود دارد. این سناریوها دامنه وسیعی از تغییرات محتمل در آینده را در بر می گیرد (۵). علاوه بر این، عدم قطعیت های دیگری چون عدم قطعیت روش های کاهش مقیاس، عدم قطعیت نوسانات

تصمیم‌گیری‌ها در نظر گرفته شود (۱۶). فرج‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر اطمینان‌پذیری تأمین آب پایین دست سد کرخه، سه سناریوی انتشار A_1 ، A_2 ، B_1 و مدل ۱۵ GCM را دسته‌بندی کردند و در نهایت از ترکیب ۵ مدل-سناریوی انتشار استفاده کردند. ایشان پیش‌بینی کردند که آبدهی حوضه در افق ۲۰۵۰ از ۵۶٪ کاهش تا ۳۴٪ افزایش داشته باشد (۱۷).

با منظور نمودن عدم قطعیت‌ها، نتایج دامنه‌ای از حالات محتمل آینده را در بر می‌گیرد. این حالات محتمل گاهی بسیار متفاوت هستند. لذا لازم است در تصمیم‌گیری‌ها و اتخاذ تدابیر آمادگی با شرایط تغییر یافته آینده در نظر گرفته شوند. به دلیل محدودیت‌هایی از جمله محدودیت دسترسی به داده‌ها و هزینه‌های محاسباتی، در نظر گرفتن همه عدم قطعیت‌ها در همه مطالعات ممکن نیست. لذا مقایسه کمی عدم قطعیت ناشی از منابع مختلف اهمیت دارد. چنین مطالعه‌ای علاوه بر ارایه نتایج مطمئن‌تر، الگویی را برای تمرکز بر عدم قطعیت‌های مهم-تر در سایر مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم در آن منطقه فراهم می‌کند.

نتایج مطالعاتی که عدم قطعیت‌ها را در ارزیابی آثار تغییر اقلیم بررسی کرده‌اند، نشان داده است که تعدادی از عدم قطعیت‌ها را می‌توان نادیده گرفت، اما بعضی از عدم قطعیت‌ها اثر مهمی بر نتایج دارند و لازم است که در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه مورد توجه قرار گیرند (۵). البته نتایج در نقاط مختلف دنیا متفاوت است و عموماً نتایج مطالعات تغییر اقلیم در هر منطقه را نمی‌توان به سایر مناطق تعمیم داد. به عنوان نمونه نتایج مقایسه عدم قطعیت‌ها در مطالعات مختلف در اروپا و به ویژه در انگلستان حاکی از برتری قابل توجه اهمیت عدم قطعیت مدل‌های GCM و کوچک بودن عدم قطعیت سناریوهای انتشار است (۴، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲)؛ اما نتایج مطالعاتی در ایران حاکی از قابل توجه بودن عدم قطعیت سناریوهای انتشار است (۱۸) و (۱۹).

مطابق بررسی نویسندگان این مقاله، پیش از این گزارشی از مقایسه کمی عدم قطعیت‌های سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM برای ایران منتشر نشده است. لذا در این تحقیق عدم-

بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از ۱۷ مدل GCM و ۴ سناریوی انتشار در مقیاس سالانه انجام شد و چگونگی تغییرات فصلی جریان حوضه بررسی نشد (۱۰). در مطالعه‌ی دیگری گراهام و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از دو مدل GCM و دو مدل RCM (که هر یک مربوط به یکی از دو مدل GCM مذکور بود) و دو سناریوی انتشار، عدم قطعیت‌ها را در نتایج اثر تغییر اقلیم بر جریان حوضه رودخانه Lule در سوئد ارزیابی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که بزرگ‌ترین عدم قطعیت، مربوط به انتخاب مدل GCM است (۱۱ و ۱۲). پرادهوم و دیویس (۲۰۰۸) عدم قطعیت‌ها در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه را در چهار حوضه بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که عدم قطعیت مدل‌های GCM بزرگ‌ترین منبع عدم قطعیت است (۱۳). کی و همکاران (۲۰۰۹) شش منبع عدم قطعیت را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های دو حوضه در انگلستان بررسی کردند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت ساختار مدل‌های GCM بزرگ‌ترین عامل عدم قطعیت است. ضمن آن که عدم قطعیت سناریوهای انتشار و پارامترهای مدل هیدرولوژیکی از کوچک‌ترین عوامل عدم قطعیت بود (۴). تامپسون و همکاران (۲۰۱۴) عدم قطعیت سناریوهای انتشار را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ۱۲ ایستگاه آبسنجی در جنوب شرق آسیا ارزیابی کردند. در این مطالعه از هفت مدل GCM استفاده شد و نتیجه‌گیری شد که تفاوت بین نتایج GCM‌های مختلف قابل توجه است. (۱۴). تیان و همکاران (۲۰۱۶) دامنه‌ی عدم قطعیت‌ها در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان‌های حدی را در یک حوضه در چین بررسی کردند. ایشان از چهار سناریوی انتشار، سه مدل GCM و سه مدل هیدرولوژیکی استفاده کردند. ایشان بزرگی عدم قطعیت‌ها بر جریان‌های حدی را به ترتیب نزولی ناشی از ساختار مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار یافتند (۱۵).

کمال و مساح بوانی (۱۳۹۰) عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM و مدل‌های هیدرولوژیکی را در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌سو بررسی کردند. ایشان از ۹ مدل GCM و دو مدل بارش-رواناب استفاده کردند. نتایج نشان داد که انتخاب مدل GCM از عدم قطعیت بزرگی برخوردار است و لازم است در

پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۴ و سه سناریوی انتشار دوره آینده ۹۳-۲۰۶۷ مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- کاهش مقیاس سناریوهای اقلیمی

در این مطالعه کاهش مقیاس سناریوهای مدل GCM به روش عامل تغییرات ((Change Factors (CF) انجام شد. 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. علاوه بر آن، داده‌های موردنیاز این روش برای مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار بیش‌تری نسبت به سایر روش‌های کاهش مقیاس در دسترس است. لذا این روش برای بررسی عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار روشی مناسب است (۲۰) و (۲۱).

۲-۳- منطقه تحقیق و داده‌ها

حوضه مورد مطالعه، حوضه رودخانه بشار، واقع در جنوب غربی ایران است. مساحت حوضه ۲۸۰۰ کیلومتر مربع است و ارتفاع متوسط آن ۲۲۷۷ متر از سطح دریا و محدوده‌ی تغییرات آن از ۱۵۴۰ تا ۴۳۰۰ متر از سطح دریا است. از ۲۷ سال داده‌های بارش روزانه، دمای حداقل روزانه، و دمای حداکثر روزانه ایستگاه تبخیرسنجی 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 شد. داده‌های ۸ ساله‌ی جریان به همراه داده‌های هم دوره بارش و دمای حوضه، به دو دوره چهار ساله‌ی 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 ۲ تا ۳ سال داده را برای واسنجی مدل ARNO کافی می‌دانند (۲۲).

۲-۴- شبیه‌سازی بارش-رواناب

قطعیت‌های ساختار مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار گازه‌های گلخانه‌ای در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان‌های ماهانه حوضه رودخانه بشار بررسی شده است. این بررسی با استفاده از ۱۸ سناریوی مختلف (حاصل از سه سناریوی انتشار و شش مدل GCM) انجام شده است. نتایج چنین پژوهشی علاوه بر آن که اطلاعاتی با قابلیت اطمینان نسبتاً بالا در خصوص تغییر منابع آب‌های سطحی حوضه در اختیار می‌گذارد، به بررسی اهمیت دو منشاء اولیه و مهم عدم قطعیت در نتایج ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در یک حوضه مهم در ایران می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار

برای ارزیابی عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازه‌های گلخانه‌ای، مطالعه تحت سه سناریوی A_1, A_2 و B_1, B_2 انجام شد. این سه سناریو به ترتیب بیان‌گر حالات بدبینانه، خوش‌بینانه و بینابینی شرایط انتشار گازه‌های گلخانه‌ای هستند. لذا اغلب مدل‌های GCM بر مبنای این سه سناریو که دامنه وسیعی از حالات ممکن انتشار گازه‌های گلخانه‌ای را در بر می‌گیرند، اجرا شده‌اند.

در مطالعات زیادی، پیش‌بینی‌های مدل‌های GCM بزرگ‌ترین عامل عدم قطعیت در ارزیابی آثار تغییر اقلیم شناخته شده است (۱۰). بنابراین در این مطالعه از همه مدل‌های GCM در دسترس که شرایط استفاده در این مطالعه را داشته‌اند استفاده شده است. داده‌ها از سایت IPCC تهیه شده است. برای ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های GCM، مدل‌هایی انتخاب شده است که خروجی آن‌ها در دوره هم‌زمان با دوره مشاهداتی برای هر سه سناریوی انتشار و برای منطقه مورد مطالعه در دسترس باشد. بر این مبنای شش مدل GCM شامل BCM2.0, CSIROMK3.0, CGCM3T63, CSIROMK3.5, INMCM3.0 و MIROC3.2 مورد استفاده قرار گرفت. خروجی‌های هر یک از این مدل‌ها در مقیاس ماهانه برای دوره

جریان مشاهداتی و جریان شبیه‌سازی شده در دوره شبیه‌سازی است.

جریان روزانه رودخانه توسط مدل مفومی بارش-رواناب ARNO شبیه‌سازی شده است. داده‌های مورد نیاز مدل، سری‌های روزانه بارش، دما، و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه و مشخصات حوضه از جمله مساحت، کاربری اراضی و شیب متوسط است. داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه به روش هارگریوز- سامانی شبیه‌سازی شده است. جزئیات این مدل توسط خزائی و همکاران (۱۳۹۴) و تودینی (۱۹۹۶) توصیف شده است (۲۲ و ۲۳).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی بارش-رواناب

در جدول (۱) نتایج عملکرد مدل بارش-رواناب برای شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه آرایه شده است. در مقیاس ماهانه، در دوره واسنجی ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۶ و معیار کارایی (EC) برابر ۰/۹۶ به دست آمد. در دوره اعتبارسنجی نیز ضریب تعیین و معیار کارایی به ترتیب برابر ۰/۹۴ و ۰/۸۹ به دست آمد و قدر مطلق خطای شبیه‌سازی میانگین (EV) در هر دو دوره کمتر از ۵ درصد بود.

در مقایسه با دیگر مطالعات، نادن و مک ماهو (۱۹۹۹)، باقتون و چیو (۲۰۰۳) و باقتون (۲۰۰۶) معیار پذیرش عملکرد شبیه‌سازی بارش-رواناب در مقیاس ماهانه را ضریب تعیین بزرگ‌تر از ۰/۶ و خطای میانگین کوچک‌تر از ۱۰ درصد برگزیدند (۲۵، ۲۴ و ۲۶). فرجزاده و همکاران (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی جریان ماهانه چهار زیر حوضه کرخه، EC روزانه را بین ۰/۳۴ تا ۰/۵۲ به دست آوردند (۱۷).

برای ارزیابی عملکرد مدل، از معیار کارایی (Efficiency Coefficient (EC))، ضریب تعیین (R^2)، خطای میانگین‌ها (EV) و مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌ها استفاده شده است. ضریب تعیین مربع ضریب همبستگی است و معیار کارایی و خطای میانگین‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$EC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - Q_{S_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (1)$$

$$EV = \frac{\bar{Q}_S - \bar{Q}_O}{\bar{Q}_O} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، Q_{O_i} جریان مشاهداتی گام زمانی i -ام، Q_{S_i} جریان شبیه‌سازی شده گام زمانی i -ام، و \bar{Q}_O و \bar{Q}_S به ترتیب میانگین

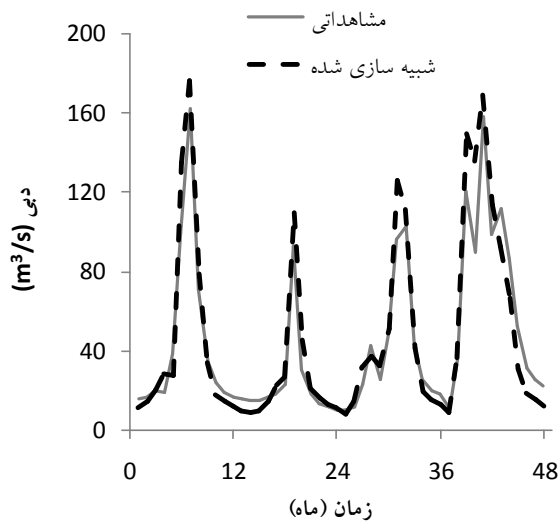
جدول ۱- عملکرد مدل ARNO در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه بشار

Table 1. Performance of the ARNO model in simulation of monthly stream-flow of the Bashar Basin

دوره	EC	R^2	EV (%)
واسنجی	۰/۹۶	۰/۹۶	-۴/۲
اعتبارسنجی	۰/۸۹	۰/۹۴	۴/۶

سازی شده و جریان مشاهداتی است. نتایج حاکی از عملکرد بسیار مناسب مدل واسنجی شده است.

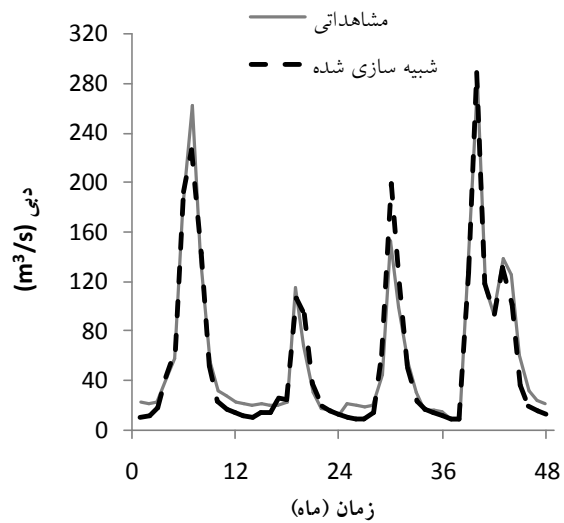
در شکل‌های (۱) و (۲) نیز هیدروگراف ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقایسه شده است. که حاکی از تطابق قابل قبول جریان شبیه-



شکل ۲- مقایسه هیدروگراف ماهانه مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره اعتبارسنجی

Figure 2. Comparison of simulated and observed hydrographs in validation period

GCM مختلف و سناریوهای انتشار مختلف، انتظار می رود میانگین جریان ماهانه اقلیم آینده در دسامبر ۵۱ درصد نسبت به دوره پایه افزایش یابد؛ اما به دلیل عدم قطعیت های سناریوهای انتشار و مدل های GCM، در سطح احتمال ۹۰٪ میانگین جریان این ماه می تواند بین ۲۶ درصد کاهش تا ۱۲۳ درصد افزایش داشته باشد. در مقابل پیش یابی می شود که بیشترین کاهش جریان در اقلیم تغییر یافته آینده در ماه مارس اتفاق بیفتد. برای این ماه حد میانه مدل های GCM مختلف و سناریوهای انتشار مختلف، حاکی از کاهش ۳۶ درصدی جریان اقلیم آینده نسبت به اقلیم دوره پایه است. البته در سطح اطمینان ۹۰٪ به دلیل عدم قطعیت های سناریوهای انتشار و مدل های GCM، کاهش جریان مارس ممکن است بین ۱۲٪ تا ۶۷٪ باشد. دامنه عدم قطعیت های مورد بررسی برای ماه های مختلف سال بین ۱۴۹٪ برای دسامبر تا ۱۶٪ برای اوت است. این نتایج حاکی از اهمیت عدم قطعیت های مدل های GCM و سناریوهای انتشار در نتایج ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان حوضه مورد مطالعه است. برای نمایش بهتر نتایج، در شکل (۳) اثر تغییر اقلیم بر میانگین های ماهانه جریان حوضه



شکل ۱- مقایسه هیدروگراف ماهانه مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره واسنجی

Figure 2. Comparison of simulated and observed hydrographs in calibration period

۲-۳- بررسی عدم قطعیت ها در اثر تغییر اقلیم بر رواناب ماهانه

در جدول (۲) عدم قطعیت مدل های GCM و سناریوهای انتشار توصیف شده است. برای تهیه این جدول، برای هر GCM تحت هر یک از سناریوهای انتشار (برای هر یک از ۱۸ سناریو)، درصد تغییرات جریان آینده نسبت به جریان دوره پایه محاسبه شد. برای هر ماه از سال، سناریوهای درصد تغییر جریان به صورت نزولی مرتب شد و حدود ۹۰٪ بالا و پایین و میانه مقادیر تعیین شد. دامنه ۹۰٪ سناریوها معادل عدم قطعیت سناریوهای انتشار و مدل های GCM در نتایج اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه حوضه، در سطح احتمال ۹۰٪ است.

همان طور که در جدول (۲) ملاحظه می شود، پیش یابی می شود تغییرات میانگین جریان آینده در ماه های مختلف متفاوت باشد. ضمن آن که نتایج در هر ماه به دلیل تفاوت GCM ها و سناریوهای انتشار از عدم قطعیت برخوردار است. به عنوان نمونه به اثر تغییر اقلیم بر جریان ماه دسامبر پرداخته می شود که پیش یابی می شود میانگین ماهانه جریان آن در اقلیم آینده بیشترین افزایش را داشته باشد. بر اساس حد میانه مدل های

نشان داده شده است. در این شکل میانه و حدود ۹۰٪ میانگین جریان اقلیم آینده (۹۳-۲۰۶۷) تحت سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM مختلف با جریان دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۴) مقایسه شده است.

جدول ۲- میانه و حدود ۹۰٪ درصد تغییر میانگین جریان ماهانه آینده نسبت به دوره پایه تحت مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار مختلف (%)

Table 2. Median and 90% bounds for percentage change in stream-flow monthly means for future scenarios in comparison to historical condition under various GCMs and emission scenarios (%)

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	
۲۶	۱۸	-۱۲	-۷	۷	۲	۲	۱	۵	۱۹	۱۰۶	۱۲۳	حد ۹۰٪ بالا
-۴۴	-۵۱	-۶۷	-۵۴	-۳۸	-۲۲	-۱۶	-۱۵	-۱۴	-۱۴	-۳۱	-۲۶	حد ۹۰٪ پایین
۷۰	۶۹	۵۶	۴۷	۴۵	۲۴	۱۸	۱۶	۱۹	۳۳	۱۳۸	۱۴۹	دامنه تغییرات
-۱۲	-۳۱	-۳۶	-۳۴	-۱۷	-۱۲	-۷	-۷	-۶	-۷	۲۹	۵۱	میانه

روش بیش‌ترین عدم قطعیت مدل‌های GCM که تحت یک سناریوی انتشار رخ می‌دهد تعیین می‌شود. به روشی مشابه، بزرگی عدم قطعیت سناریوهای انتشار تعیین شده است. بزرگی دامنه عدم قطعیت مدل‌های GCM بین ۱۰٪ تا ۱۳۸٪ و بزرگی دامنه عدم قطعیت سناریوهای انتشار بین ۱۲٪ تا ۸۵٪ برای ماه‌های مختلف سال است. این نتایج نشان می‌دهد که هر دو مورد انتخاب سناریوهای انتشار و انتخاب مدل GCM، منابع مهمی از عدم قطعیت در نتایج هستند. بنابراین برای به کارگیری نتایج در طرح‌های آینده، لازم است نتایج تحت مدل‌های GCM مختلف و سناریوهای انتشار مختلف در اختیار تصمیم‌گیران قرار گیرد.

در جدول (۳) بزرگی هر یک از عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار ارایه و مقایسه شده است. برای تعیین بزرگی عدم قطعیت مدل‌های GCM برای هر ماه از سال مراحل به شرح زیر است. برای هر سناریوی انتشار و هر GCM، درصد تغییر جریان آینده نسبت به دوره پایه محاسبه شده است. در دامنه ۹۰٪ مقادیر، برای هر سناریوی انتشار، حدود بالا و پایین درصد تغییرات جریان GCM-های مختلف تعیین شده است. بزرگ‌ترین اختلاف بیشینه و کمینه درصد تغییرات برای سناریوهای انتشار مختلف (گام قبل) تعیین شده است که مقادیر اخیر دامنه عدم قطعیت مدل‌های GCM است. گام آخر به دلیل آن است که عدم قطعیت مدل‌های GCM برای سناریوهای انتشار مختلف متفاوت است و به این

جدول ۳- مقایسه بزرگی دامنه هر یک از عدم قطعیت‌های انتخاب GCM و سناریوی انتشار در اثر تغییر اقلیم بر میانگین جریان ماهانه (%)

Table 3. Comparison of uncertainty magnitude due to GCM selection and because of emission scenario selection in climate change impact assessment on monthly stream-flow (%)

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	منبع عدم قطعیت
۷۰	۶۹	۴۹	۳۹	۳۷	۱۶	۱۳	۱۰	۱۴	۳۳	۱۳۸	۱۳۴	مدل‌های GCM
۵۳	۴۱	۳۵	۴۷	۳۸	۲۲	۱۵	۱۴	۱۲	۱۷	۸۱	۸۵	سناریوهای انتشار

مقایسه شده است. در حد میانه مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار مختلف پیش‌یابی می‌شود که جریان فصل زمستان، بهار و تابستان به ترتیب ۲۷٪، ۲۴٪ و ۷٪ کاهش یابد و جریان فصل

در جدول (۴) و شکل (۴) میانه و حدود ۹۰٪ میانگین جریان فصلی و سالانه اقلیم آینده (۹۳-۲۰۶۷) تحت سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM مختلف با جریان دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۴)

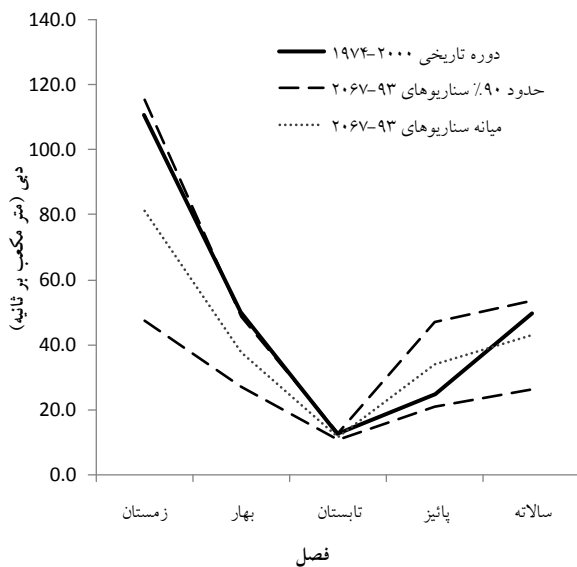
۱۵٪ کاهش یابد و جریان فصل پاییز بین ۸۹٪ افزایش تا ۱۶٪ کاهش یابد. در مجموع پیش‌یابی می‌شود میانگین آورد سالانه-ی رودخانه در اقلیم آینده نسبت به اقلیم پایه از ۴۷٪ کاهش تا ۸٪ افزایش تغییر کند.

پاییز ۳۸٪ افزایش یابد. اما به دلیل عدم قطعیت سناریوهای انتشار و مدل‌های GCM، در سطح اطمینان ۹۰٪ پیش‌یابی می‌شود جریان در فصل زمستان بین ۴٪ افزایش تا ۵۷٪ کاهش، و جریان فصل بهار بین ۲٪ تا ۴۶٪ کاهش یابد. همچنین پیش‌یابی می‌شود جریان تابستان بین ۲٪ افزایش تا

جدول ۴- میانه و حدود ۹۰٪ اثر تغییر اقلیم بر جریان سالانه و فصلی حوضه برای GCM ها و سناریوهای انتشار مختلف (%)

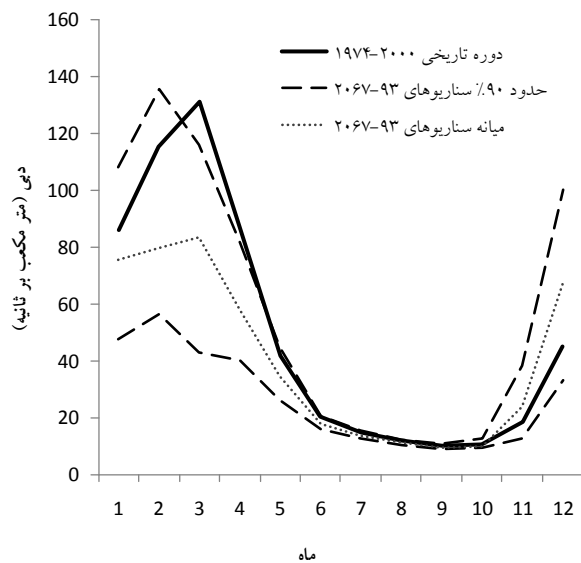
Table 4. Median and 90% bounds for future climate change impacts on seasonal and annual stream-flow means under various GCMs and emission scenarios (%)

سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	
-۴۷	-۱۶	-۱۵	-۴۶	-۵۷	حد ۹۰٪ پایین
-۱۳	۳۸	-۷	-۲۴	-۲۷	میان
۸	۸۹	۲	-۲	۴	حد ۹۰٪ بالا



شکل ۴- میانه و حدود ۹۰٪ اثر تغییر اقلیم بر جریان سالانه و فصلی حوضه

Figure 4. Median and 90% bounds of climate change impacts on annual and seasonal stream-flow of the Basin



شکل ۳- میانه و حدود ۹۰٪ اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه حوضه

Figure 3. Median and 90% bounds of climate change impacts on monthly stream-flow of the Basin

نتیجه گیری

انتشار مورد استفاده سناریوهای A_2 ، A_1B و B_1 هستند که به ترتیب بیان گر حالات بدبینانه، بینابینی و خوشبینانه‌ی انتشار گازهای گل‌خانه‌ای هستند. از همه‌ی مدل‌های GCM که

در این مطالعه با استفاده از پیش‌یابی‌های اقلیمی شش مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار گازهای گل‌خانه‌ای اثر تغییر اقلیمی بر جریان‌های ماهانه حوضه بشار ارزیابی شد. سناریوهای

اطمینان ۹۰٪، تحت سناریوهای مختلف پیش‌یابی می‌شود جریان فصل پاییز از ۱۶٪ کاهش تا ۸۹٪ افزایش یابد؛ جریان زمستان از ۵۷٪ کاهش تا ۴٪ افزایش یابد؛ جریان بهار از ۲٪ تا ۴۶٪ کاهش یابد؛ و جریان تابستان از ۷٪ تا ۱۵٪ کاهش یابد. در میانه سناریوها، پیش‌یابی می‌شود میانگین جریان در پاییز ۳۸٪ افزایش و در زمستان، بهار و تابستان به ترتیب ۲۷٪، ۲۴٪ و ۷٪ کاهش یابد. این موضوع حاکی از تغییر سیکل فصلی جریان حوضه است. ضمن آن‌که در میانه‌ی سناریوها، پیش‌یابی می‌شود میانگین جریان سالانه حوضه ۱۳٪ کاهش یابد. حدود ۹۰٪ تغییرات جریان سالانه بین ۴۷٪ کاهش تا ۸٪ افزایش است.

در مقایسه عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار در پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر جریان حوضه، دامنه عدم قطعیت مدل‌های GCM از ۱۰٪ (برای ماه اوت) تا ۱۳۸٪ برای ماه نوامبر است. دامنه عدم قطعیت سناریوهای انتشار از ۱۲٪ (برای ماه سپتامبر) تا ۸۵٪ برای ماه دسامبر است. اگر چه عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل‌های GCM از عدم قطعیت سناریوهای انتشار بیش‌تر است، اما بزرگی هر یک از این عدم قطعیت‌ها در منطقه مورد مطالعه مهم و غیر قابل چشم‌پوشی است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از اعتبارات دانشگاه پیام‌نور انجام شده است.

Reference

- Shiehbeigi, A., Abbaspour, M., Soltaniyeh, M., Hosseinzadeh, F., Abedi, Z., 2014. Evaluation of climate change and prediction of its impacts on efficiency and fuel consumption of thermal power plants in Iran in next decade. Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 16, pp. 1-12. (In Persian)
- Khoshmanesh zadeh, B., Poorhashemi, A., Soltaniyeh, M., Hermidas Bavand, D., 2016. Analyzing the Impacts of Climate Change

خروجی آن‌ها برای هر سه سناریوی مورد نظر در دوره‌ی هم-زمان با دوره مشاهداتی (۲۰۰۰-۱۹۷۴) و دوره آینده ۲۰۸۰ (۹۳-۲۰۶۷) در دسترس بود، استفاده شد. به این ترتیب مدل‌های GCM مورد استفاده شامل BCM2.0، CSIRO MK3.0، CSIRO MK3.5، CGCM3T63 و INMCM3.0 است. MIROC3.0 و INMCM3.0 توسط یک مدل بارش رواناب مفهومی به خوبی شبیه‌سازی شد. به گونه‌ای که در شبیه‌سازی جریان ماهانه ضریب تعیین (R^2) و معیار کارایی (EC) در دوره واسنجی برابر ۰/۹۶ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۴ و ۰/۸۹ به دست آمد و خطای شبیه‌سازی میانگین در هر یک از این دو دوره کم‌تر از ۵٪ بود. جریان برای اقلیم فعلی و هر یک از ۱۸ سناریوی اقلیم آینده شبیه‌سازی شد. همچنین اهمیت و دامنه‌ی عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار به صورت کمی بررسی و مقایسه شد. بنابر بررسی انجام شده، پیش از این چنین مقایسه‌ای برای جریان حوضه‌های آبریز ایران انجام نشده است. چنین مطالعه‌ای با ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ماهانه‌ی حوضه تحت دامنه وسیعی از سناریوهای ممکن، اطلاعاتی با قابلیت اطمینان نسبتاً بالا در خصوص تغییر منابع آب‌های سطحی حوضه کارون در اختیار تصمیم‌گیران می‌گذارد؛ علاوه بر آن مقایسه‌ی اهمیت دو منبع اولیه و مهم عدم قطعیت در نتایج ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم، به مطالعات آتی برای شناخت و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مهم در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند.

با در نظر گرفتن ۱۸ سناریوی تغییر اقلیم، نتایج نشان داد که مقادیر جریان ماهانه تحت هر سناریو تغییر می‌کند. اما بزرگی و جهت تغییر بستگی به آن دارد که کدام سناریوی انتخاب شده است. به عنوان نمونه میانگین جریان آینده ماه دسامبر (که بیش‌ترین دامنه عدم قطعیت را دارد) در دامنه ۹۰٪ سناریوها می‌تواند از ۲۶٪ کاهش تا ۱۲۳٪ افزایش داشته باشد. در میانه‌ی سناریوها پیش‌یابی می‌شود میانگین جریان این ماه ۵۱٪ افزایش داشته باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی اثر تغییر اقلیم تحت یک یا چند سناریوهای محدود به نتایج نامطمئن و غیرکاربردی منجر شود. به عنوان خلاصه‌ای از نتایج، در سطح

- and uncertainty –on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora) *Journal of Hydrology*, Vol. 347, pp. 48– 66.
11. Graham LP, Andreasson J., Carlsson B., 2007a. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—a case study on the Lule River basin. *Clim Change*, Vol 81, pp. 293–307.
 12. Graham L.P., Hageman S., Jaun S., Beniston M., 2007b. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Climatic Change*, Vol. 81, pp. 97–122.
 13. Prudhomme, C., Davies, H.N., 2008. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on river flow regimes in the UK. Part 2: future climate, *Climate Change*, Vol. 93, pp. 197-222.
 14. Thompson, J.R., Laizé, C.L.R., Green, A.J., Acreman, M.C., Kingston, D.G., 2014. Climate change uncertainty in environmental flows for the Mekong River. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, pp. 935-954.
 15. Tian, Y., Xu, Y.P., Booij, M.J., Cao, L., 2016. Impact assessment of multiple uncertainty sources on high flows under climate change. *Hydrology Research*, Vol. 47, pp. 61-74.
 16. Kamal, A.R., Masah, A., 2012. The uncertainty assessment of AOGCM & Hydrological models for estimating Gharesu basin temperature, precipitation, and runoff under climate change impact, *Iranian Water Researches Journal*, Vol. 5, pp. 39-50. (In Persian)
 17. Farajzadeh, M., Madani Larijani, K., Massah Bevani, A., Davtalab R., 2014. Climate change effects on reliability of water delivery in downstream of Karkheh on Human Rights. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 17, pp. 223-234. (In Persian)
 3. IPCC, 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.
 4. 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*, Vol. 92, pp. 41-63.
 5. IPCC, 2007. General Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment, Cambridge University Press.
 6. Rowell, D.P., 2006. A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation. *Clim Change*, Vol. 79, pp. 243–257
 7. Wilby, R.L., Whitehead, P.G., Wade, A.J., Butterfield, D., Davis, R.J., Watts, G., 2006. Integrated modeling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *J Hydrol*, Vol. 330, pp. 204–220
 8. Wilby, R.L., Harris, I., 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour Res*, Vol. 42, pp. W02419.
 9. Cameron, D., 2006. An application of the UKCIP02 climate change scenarios to flood estimation by continuous simulation for a gauged catchment in the northeast of Scotland, UK (with uncertainty). *J Hydrol*, Vol. 328, pp. 212–226.
 10. Serrat-Capdevila, A., Valdés, J.B., Pérez, J.G., Baird, K., Mata, L.J., Maddock, T., 2007. Modeling climate change impacts –

- modelling. *International Journal of Climatology*, Vol. 27, pp. 1547-1578.
22. Todini, E., 1996. The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 339-382.
23. Khazaei, M.R., Zahabiyoun, B., Saghafian, B., 2015. Daily Stream Flow Simulation in a Data-Poor Basin. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 17, pp. 77-90. (In Persian)
24. Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. The SFB model part I- validation of fixed model parameters. *Civil Engineering Transactions CE32* (3), pp. 157-161.
25. Boughton, W., Chiew, F., 2003. Calibrations of the AWBM for Use on Ungauged Catchments. Technical Report 03/15. CRC for Catchment Hydrology, Monash University, 37 pp.
26. Boughton, W., 2006. Calibrations of a daily rainfall-runoff model with poorquality data. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 21, pp. 1114-1128.
- river basin and its adaptation strategies. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, Vol. 3, pp. 49-63. (In Persian)
18. Khazaei, M.R., 2016, Estimation of joint uncertainties due to natural climate variability and emission scenarios in climate change assessment on precipitation and temperature in Zanzan. *Journal of Environmental Science and Technology*, In press. (In Persian)
19. Khazaei, M.R., Zahabiyoun, B., Saghafian, B., 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*, Vol. 32, pp. 1997-2006.
20. Khazaei, M.R., 2016. Climate change impact assessment on hydrological regimes of a mountainous river basin in Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, Vol. 5, pp. 43-54. (In Persian)
21. Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological