



Climate Change Impact on Annual Meteorological and Hydrological Variables of the Sirvan Basin

M.R. Khazaei^{1*} and M. Byzedi²

Abstract

In this paper the climate change impacts on annual meteorological variables and river-flow of the Sirvan Basin in western Iran are assessed. Future scenarios of CGCM3 (including annual precipitation, mean daily maximum and minimum temperatures) for A1B, A2, and B1 scenarios are downscaled using Change Factors method for the Sirvan Basin. Climate change impacts on these variables and on the potential evapotranspiration of the basin are assessed. For hydrologic simulation of the river-flow of the basin 20 annual hydrologic models are tested and finally the two best models (namely M8 and ICARLike) are employed. Then annual river-flow of the Sirvan Basin for current and future climate conditions is simulated; and climate change impacts on hydrologic variables of the basin are assessed. It is projected that the temperature and potential evapotranspiration will be increased and precipitation and river-flow will be decreased in the Sirvan Basin in the future. Despite importance of uncertainties related to the emission scenarios and hydrologic models, under all of the investigated future scenarios it is expected that the stream-flow of the basin will be reduced in the future.

Keywords: Climate change, Sirvan River Basin, Hydrological simulation, Uncertainty, Potential evapotranspiration.

Received: April 3, 2016

Accepted: May 18, 2016

اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای سالانه هواشناسی و هیدرولوژیک حوضه سیروان

محمد رضا خزائی^{۱*} و مطلب بایزیدی^۲

چکیده

در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و جریان سالانه حوضه سیروان با منظور نمودن عدم قطعیت‌های سناریوهای انتشار و ساختار مدل‌های هیدرولوژیک، ارزیابی شده است. سناریوهای آینده‌ی بارش، بیشینه دمای روزانه و کمینه دمای روزانه مدل اقلیمی CGCM3 برای حوضه آبریز سیروان به روش عامل تغییرات ریز مقیاس شده است و اثر تغییر اقلیم بر این متغیرها و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه، بیست مدل هیدرولوژیک سالانه مورد آزمون قرار گرفت و دو مدل (با عناوین M8 و ICARLike) که بهترین عملکرد را داشتند، برگزیده شدند. جریان سالانه حوضه آبریز سیروان توسط دو مدل هیدرولوژیک برای سناریوهای آینده (۶۵-۲۰۳۶) و دوره‌ی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) شبیه‌سازی شد و اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیک حوضه ارزیابی شد. عدم قطعیت‌ها با استفاده از سه سناریوی A1B، A2، و B1 و دو مدل هیدرولوژیک تحلیل شد. نتایج حاکی از افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل، کاهش بارش و جریان سالانه حوضه سیروان است. با وجود آنکه دامنه‌ی عدم قطعیت‌های سناریوهای انتشار و ساختار مدل‌های هیدرولوژیک قابل توجه است، تحت همه حالات مورد بررسی، جریان سالانه حوضه سیروان در اقلیم آینده کاهش یابد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه سیروان، شبیه‌سازی هیدرولوژیک، عدم قطعیت، تبخیر و تعرق پتانسیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۲۹

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Iran. Email: m_r_khazaei@yahoo.com

2-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran

*- Corresponding Author

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران.

۲- استادیار، گروه آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج.

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

فعالیت‌های اخیر بشر موجب افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و به تبع آن افزایش دمای کره زمین شده است. سناریوهای منتشر شده توسط هیأت بین دول تغییر اقلیم (IPCC) حاکی از آن است که دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ میلادی، $1/4-5/8^{\circ}\text{C}$ نسبت به سال ۱۹۹۰ افزایش خواهد یافت. این افزایش، دیگر متغیرهای اقلیمی را نیز تحت تاثیر خود قرار می‌دهد و موجب تغییر اقلیم می‌شود (IPCC, 1995). با تغییر متغیرهای اقلیمی، رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها نیز تغییر می‌کند. این موضوع در مطالعات متعددی ذکر شده است (IPCC, 2001). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم آینده بر رژیم جریان رودخانه و خشکسالی‌ها، و منظور نمودن آن در برنامه‌ریزی‌های آینده، کمک شایانی به امر توسعه و کاهش خسارات تغییر اقلیم می‌نماید. مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه عموماً شامل دو مرحله است. در مرحله اول لازم است داده‌های اقلیمی آینده حوضه پیش‌یابی شود؛ و مرحله دوم شبیه‌سازی جریان رودخانه است.

معتبرترین وسیله برای شبیه‌سازی واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای و شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی آینده، مدل‌های جهانی اقلیم (GCM) هستند (IPCC, 2001). البته وضوح مکانی خروجی GCMs برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مقیاس حوضه آبریز مناسب نیست و لازم است خروجی این مدل‌ها زیر مقیاس شود. علاوه بر آن، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده به صورت قطعی معلوم نیست و سناریوهای مختلفی برای آن محتمل است. هیأت بین دول تغییر اقلیم، IPCC^۲، در سال ۱۹۹۶ چهار سناریوی مختلف را منتشر کرد که در آنها انواع مختلفی از چگونگی انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. این سناریوها دامنه وسیعی از تغییرات محتمل در آینده را دربرمی‌گیرد (IPCC, 2007).

شبیه‌سازی جریان رودخانه توسط مدل‌های هیدرولوژیکی انجام می‌شود. در این خصوص ابتدا مدل هیدرولوژیکی مناسب برای حوضه واسنجی و اعتبارسنجی می‌شود. سپس با ورود سناریوهای اقلیمی آینده به آن، سناریوهای جریان آینده حوضه شبیه‌سازی می‌شود. به عنوان نمونه‌هایی از مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه و خشکسالی، به موارد زیر اشاره می‌شود.

Khazaee et al. (2012) با توسعه یک مدل کاهش مقیاس روزانه، سناریوهای اقلیمی آینده A1B، A2، و B1 مدل CGCM3 را برای

حوضه کارون ریز مقیاس کردند. ایشان جریان حوضه کارون را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی روزانه ARNO شبیه‌سازی کردند و اثر تغییر اقلیم را بر جریان و سیلاب‌های رودخانه کارون ارزیابی کردند. Fowler and Kilsby (2004) اثر تغییر اقلیم را بر خشکسالی‌ها در انگلستان ارزیابی کردند. در این مطالعه از سناریوهای A2 و B2 خروجی مدل HadRM3H استفاده شد. شاخص خشکسالی بر مبنای بارش ماهانه تعریف شد و خشکسالی‌های محتمل دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۷۰) با خشکسالی‌های دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در اکثر مناطق انگلستان، تحت سناریوهای مورد بررسی، شدت خشکسالی در دوره آینده نسبت دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. Leander and Bouishand (2006) برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوضه‌ای با مساحت حوضه ۲۱۰۰۰ کیلومتر مربع در اروپای غربی، از داده‌های خروجی یک RCM به عنوان ورودی‌های یک مدل بارش- رواناب پیوسته استفاده کردند. Massah Bavani and Morid (2006) اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود را با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 در دو دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار دادند و برای شبیه‌سازی جریان رودخانه از تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند. Modaresi et al. (2012) اثر تغییر اقلیم را بر میزان آبدهی سالانه رودخانه گرگان‌رود بررسی کردند. ایشان از سناریوی B2 خروجی مدل HADCM3 استفاده کردند و برای شبیه‌سازی جریان رودخانه از رابطه رگرسیون خطی ساده بین بارش و دمای سالانه استفاده نمودند. در نتیجه پژوهش ایشان، جریان سالانه دوره ۱۴۱۵-۱۳۸۶ نسبت به دوره ۱۳۸۵-۱۳۵۶، برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۱۰۰ ساله، به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۳۳ درصد کاهش نشان داد.

هدف از این پژوهش ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای سالانه هواشناسی و هیدرولوژیک حوضه سیروان، با تحلیل عدم قطعیت‌های سناریوهای انتشار و مدل‌های هیدرولوژیکی است. به این منظور، در ابتدا سناریوهای آینده دما و بارش مدل CGCM3 برای سه سناریوهای انتشار A1B، A2، و B1، برای حوضه ریز مقیاس شد. سپس دو مدل هیدرولوژیکی سالانه برای حوضه آبریز سیروان توسعه یافت. با ورود داده‌های اقلیمی دوره‌های تاریخی و سناریوهای آینده به مدل‌های هیدرولوژیکی، جریان سالانه حوضه سیروان برای دوره‌ی پایه و سناریوهای اقلیم آینده تولید شد. با مقایسه سناریوهای اقلیم آتی حوضه با مقادیر متناظر اقلیم فعلی، اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و جریان رودخانه حوضه سیروان ارزیابی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحقیق

روش تحقیق شامل مراحل زیر است. در مرحله اول سناریوهای اقلیم آتی مدل اقلیمی CGCM3 برای حوضه سیروان ریز مقیاس شد. در مرحله دوم به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان سالانه حوضه سیروان پرداخته شد. تعداد ۱۳ مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی جریان سالانه حوضه، واسنجی، صحت سنجی و مقایسه شدند. در تعدادی از این مدل‌ها که از تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌شود، سه روش مختلف محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل مورد آزمون قرار گرفت. لذا در مجموع می‌توان گفت از ۲۰ مدل مختلف هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی جریان سالانه و انتخاب مدل برتر استفاده شده است. تعدادی از این مدل‌ها در ادبیات تحقیق پیشنهاد شده‌اند و تعدادی بر مبنای روابط تجربی و مفهومی در این تحقیق توسعه یافته‌اند. برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه از روش‌های هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1985)، بلانسی-کریدل (Blaney and Criddle, 1950) و تورنت‌وایت (Thornthwaite, 1948) استفاده شد. در نتیجه مقایسه مدل‌ها، دو مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی جریان سالانه‌ی حوضه‌ی سیروان انتخاب شد و با ورود سناریوهای بارش و دمای اقلیم آینده به آن‌ها، سناریوهای آینده‌ی جریان حوضه شبیه‌سازی شد. جریان تاریخی حوضه نیز به روش مشابه، شبیه‌سازی شد. با مقایسه جریان و خشکسالی‌های دوره‌ی پایه و سناریوهای اقلیم آینده، اثر تغییر اقلیم بر آنها ارزیابی شد. برای منظور نمودن عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی، نتایج برای دو مدل مختلف که عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان سالانه حوضه داشته‌اند ارائه شده است. همچنین برای منظور نمودن عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گل‌خانه‌ای، جریان آینده حوضه تحت سه سناریوی مختلف که دامنه وسیعی از حالات ممکن انتشار گازهای گل‌خانه‌ای را در بر می‌گیرد ارزیابی شده است.

۲-۲- کاهش مقیاس

برای کاهش مقیاس خروجی مدل GCM از روش عامل تغییرات^۴ استفاده شد. روش عامل تغییرات متداول‌ترین و ساده‌ترین روش کاهش مقیاس است (Prudhomme et al., 2002; Fowler and Kilsby, 2007). در روش عامل تغییرات، تفاضل میانگین داده‌های دمای سناریوی اقلیم آینده و دوره پایه خروجی GCM محاسبه شده و به همه‌ی داده‌های سری مشاهداتی اضافه می‌شود تا سناریوی کاهش مقیاس یافته آینده برای حوضه به دست

آید. برای کاهش مقیاس بارش، نسبت میانگین داده‌های بارش سناریوی اقلیم آینده خروجی GCM به دوره پایه خروجی GCM محاسبه شده و در همه‌ی داده‌های سری مشاهداتی ضرب می‌شود تا سناریوی کاهش مقیاس یافته آینده برای حوضه به دست آید.

۲-۳- مدل‌های هیدرولوژیکی

مدل‌های هیدرولوژیکی زیر برای شبیه‌سازی جریان سالانه رودخانه سیروان واسنجی، صحت سنجی و مقایسه شدند: مدل MI: این مدل تک مخزنه بوده و به طور گسترده در هیدرولوژی مورد استفاده قرار گرفته است (Manabe, 1969). این مدل تنها یک پارامتر (a_1) دارد که مبین ظرفیت مخزن است. ذخیره مخزن در ابتدای سال k -ام با S_{k-1} نشان داده می‌شود. در ابتدا متغیر میانی S^* محاسبه می‌شود:

$$S^* = S_{k-1} + P_k \quad (1)$$

که در آن، P_k بارش سال k -ام است. سپس، جریان سالانه (Q) به روش زیر به دست می‌آید:

$$\text{If } S^* > a_1 \quad \text{then } Q_k = S^* - a_1 \quad (2)$$

$$\text{and } S^* = a_1 \quad \text{else } Q_k = 0$$

و مقدار جدید ذخیره آب مخزن به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$S_k = S^* - E \quad (3)$$

$$\text{If } S_k < 0 \quad \text{then } S_k = 0 \quad (4)$$

مدل (Mouelhi (2003): در این مدل، ذخیره بارش سال‌های قبل در حوضه، در جریان سال اخیر منظور می‌شود. در این مدل بارش سالانه سال قبل (P_{k-1}) با اعمال یک ضریب رواناب، در تولید رواناب سال فعلی (Q_k) تأثیر می‌گذارد. این مدل به صورت زیر ارائه شده است:

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{b_6 P_k + (1 - b_6) P_{k-1}}{a_6 E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (5)$$

a_6 و b_6 پارامترهای مدل هستند که از طریق واسنجی مدل به دست می‌آیند، و E_k تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه در سال اخیر (k) است. مدل فوق، هر چند که بسیار ساده است، اما نتیجه یک تحقیق گسترده بوده است و در توسعه این مدل، روش‌های زیادی (به ویژه برای منظور نمودن بارش سال قبل در جریان سال اخیر) بررسی شده است (Mouelhi et al., 2006). نکته قابل توجه در ساختار این مدل آن است که سابقه بارش سال قبل، بدون آنکه پارامتری به مدل اضافه شود، در شبیه‌سازی وارد شده است.

و برای S'' مقدار $S_k = S'' - E_s$ قرار داده می‌شود تا در محاسبات سال آینده شرکت کند. a ، b و c پارامتر مدل هستند.

روش کتاین: اساس این روش بر مبنای میزان کمبود جریان (D) درحوضه استواراست. روش کتاین توسط روابط زیر بیان می‌شود (Shamohammadi Heidari and Panjehkeh, 2009).

$$D = P(1 - L.P) \quad (11)$$

$$L = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \quad (12)$$

$$R = P - D = L.P^2 \quad (13)$$

که در آن، P بارندگی سالانه‌ی حوضه به متر، D کمبود جریان سالانه به متر، T دمای متوسط حوضه به درجه‌ی سانتی‌گراد، و R رواناب به متر است.

روش تورک: این روش براساس نتایج مطالعات بر روی ۲۵۴ حوضه‌ی آبریز در شرایط آب و هوایی مختلف و با مساحت‌های کمتر از ۳۰۰ کیلومتر مربع، به دست آمده است و توسط روابط زیر ارایه می‌شود (Shamohammadi Heidari and Panjehkeh, 2009).

$$D = \frac{P}{(0.9 + (\frac{P}{L})^2)^{0.5}} \quad (14)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (15)$$

$$R = P - D \quad (16)$$

که در آن، D کمبود سالانه برحسب میلی‌متر، P بارش سالانه برحسب میلی‌متر، L شاخص درجه حرارت، و R رواناب سطحی است.

روش ایکار: این رابطه توسط انجمن تحقیقات کشاورزی هند (ICAR) برای برآورد رواناب سالانه‌ی حوضه‌های کوچک ارایه شده است (Neghresh and Shah Hoseini, 2012).

$$R = \frac{1.115.P^{1.44}}{T^{1.34} A^{0.0613}} \quad (17)$$

که در آن، R ارتفاع رواناب سالیانه به سانتی‌متر، A مساحت حوضه به کیلومتر مربع، P بارش سالیانه به سانتی‌متر، و T دمای متوسط سالانه به درجه‌ی سانتی‌گراد است.

روش جاستین: رابطه جاستین برای برآورد رواناب سالانه، توسط رابطه زیر بیان می‌شود (Neghresh and Shah Hoseini 2012):

$$R = K.A.s^{0.155} \left(\frac{P^2}{1.8t + 32} \right) \quad (18)$$

(2006) Mouelhi et al. عملکرد این مدل را برای شبیه‌سازی رواناب سالانه بر روی ۴۰۷ حوضه بررسی کردند و آن را به عنوان بهترین مدل در بین مدل‌های مورد بررسی خود مدل معرفی کردند.

مدل GR1: (2006) Mouelhi et al. دریافتند که با حذف دو پارامتر از مدل (2003) Mouelhi، این مدل به یک مدل یک پارامتری (معروف به مدل GR1) تبدیل می‌شود که از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی جریان سالانه برخوردار است. این مدل به صورت زیر ارایه شده است:

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (6)$$

که در آن، X پارامتر مدل است و سایر متغیرها در رابطه قبل تعریف شد.

مدل M8: این مدل را (2006) Mouelhi et al. برای منظور نمودن ذخیره آب حوضه سال قبل در جریان سال کنونی پیشنهاد کردند. این مدل از مدل بارش- رواناب روزانه (2003) Perrin et al. GR4J منتج شده است.

$$P_s = \frac{a \left[1 - \left(\frac{S_{k-1}}{a} \right)^2 \tanh \left(\frac{P_k}{a} \right) \right]}{1 + \frac{S_{k-1}}{a} \tanh \left(\frac{P_k}{a} \right)} \quad (7)$$

که در آن، a یک پارامتر است. برای S_{k-1} مقدار $S = S_{k-1} + P_s$ قرار داده می‌شود و نفوذ عمقی P_c از ذخیره مخزن کم می‌شود:

$$P_c = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S'}{a} \right)^4 \right]^{-0.25} \right\} \quad (8)$$

و برای S' مقدار $S' = S' - P_c$ قرار داده می‌شود. در ادامه مقدار جریان سالانه سال فعلی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_k = b(P + P_c - P_s) \quad (9)$$

در نهایت، ذخیره S'' ، توسط E_s (مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل E)، کاهش می‌یابد:

$$E_s = \frac{S'' \left(2 - \frac{S''}{a} \right)^2 \tanh \left(\frac{cE}{a} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S''}{a} \right) \tanh \left(\frac{cE}{a} \right)} \quad (10)$$

که در آن، R ارتفاع رواناب سالانه به سانتی‌متر، K پارامتر مدل، P بارندگی سالانه به سانتی‌متر، s شیب حوضه، A مساحت حوضه به کیلومتر مربع و t درجه حرارت سالانه به درجه سانتی‌گراد است. این رابطه را برای شبیه‌سازی رواناب سالانه یک حوضه می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$R = K' \frac{P^2}{1.8t + 32} \quad (19)$$

که در آن، K' پارامتر مدل است که از واسنجی مدل به دست می‌آید. مدل مفهومی ۹: هنگامی که گام زمانی به بزرگی یک سال مورد نظر باشد، مدل بارش- رواناب معمولاً مدل تعادل آب^۵ نامیده می‌شود. در این نوع مدل‌ها فرض می‌شود که زمان پاسخ حوضه در مقایسه با گام زمانی شبیه‌سازی قابل نظر است (Mouelhi et al., 2006). لذا مدل زیر می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان سالانه پیشنهاد و مورد آزمون قرار گیرد:

$$R = a.P - b.ET + c \quad (20)$$

در این رابطه، R ارتفاع رواناب سالانه در سطح حوضه، P ارتفاع بارش سالانه، ET تبخیر و تعرق سالانه حوضه است. a ، b و c پارامترهای مدل هستند. انتظار می‌رود که ضریب a بتواند عدم تطابق محدود محل ایستگاه بارش با مرکز حوضه را برای مقیاس سالانه تا حد قابل قبولی جبران نماید؛ زیرا بارش در مقیاس سالانه وابستگی مناسبی با ارتفاع دارد.

مدل مفهومی ۱۰: تعدادی از روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق، بر مبنای رابطه خطی بین تبخیر و تعرق و دما توسعه یافته‌اند. به عنوان نمونه روش بلانی- کریدل که از روش‌های معتبر بر مبنای دما است، از این دسته است. بنابراین مدل هیدرولوژیکی مفهومی ۹، می‌تواند به صورت تابعی از دما، توسط رابطه زیر بیان شود:

$$R = c.P + d.T + e \quad (21)$$

مدل مفهومی ۱۱: جریان سالانه حوضه می‌تواند متأثر از بارش سال قبل (به دلیل ذخیره شدن در آب‌های زیرزمینی) باشد. لذا مدل مفهومی ۱۰ را می‌توان به صورت زیر کامل‌تر نمود:

$$R_t = c.P_t + d.T_t + f.P_{t-1} + e \quad (22)$$

که در آن، t اندیس معرف سال t -ام و $t-1$ معرف سال قبل از آن است. a ، b ، c ، d و e پارامترهای مدل هستند. شایان ذکر است که در انتخاب مدل، به حداقل رساندن تعداد پارامترهای مدل مورد توجه قرار خواهد گرفت.

علاوه بر مدل‌های فوق، تعدادی مدل تجربی محتمل برای شبیه‌سازی جریان توسط متغیرهای اقلیمی مورد آزمون قرار گرفت. جریان حوضه می‌تواند تابعی غیر خطی از متغیرهای اقلیمی باشد. به عنوان نمونه، به صورت مفهومی، جریان تابعی از تبخیر و تعرق است و تبخیر و تعرق می‌تواند مطابق روابطی از قبیل پنمن-مانتیس و هارگریوز- سامانی، تابعی غیرخطی از دما باشد. در نتیجه، جریان می‌تواند تابعی غیرخطی از دما باشد. علاوه بر این، برخی از روابط تجربی (از جمله روابط جاستین و ایکار) بیانگر روابط غیرخطی جریان و بارش است. در نتیجه تعدادی رابطه تجربی غیر خطی برای شبیه‌سازی جریان حوضه مورد آزمون قرار گرفت.

مدل تجربی غیر خطی ۱۲: در این مدل سه پارامتری، جریان تابعی غیرخطی از بارش و دما است.

$$\log R = a.\log P + b.\log T + c \quad (23)$$

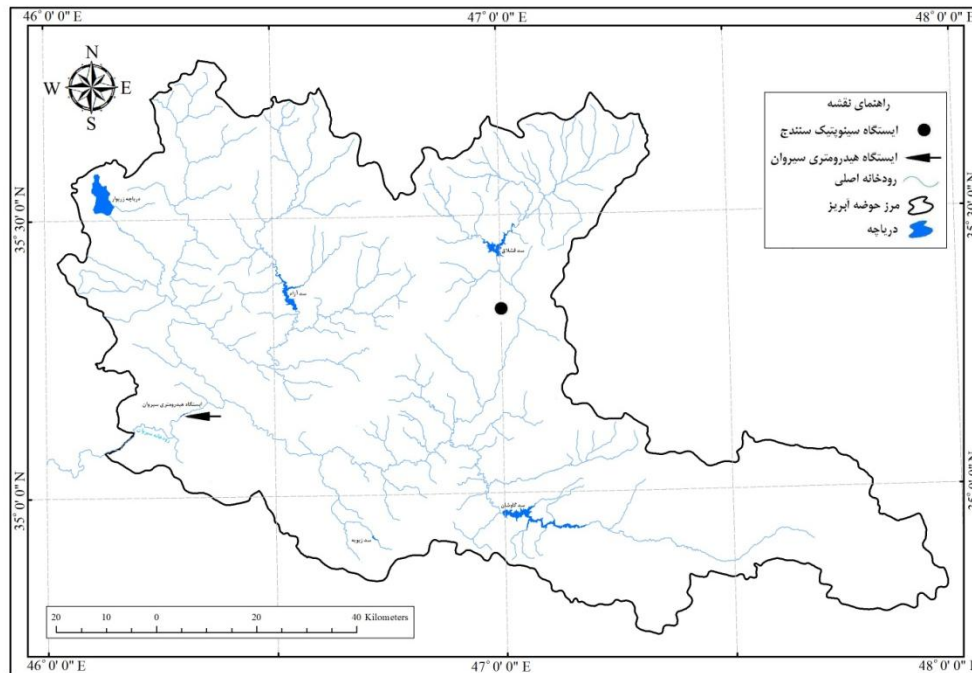
مدل تجربی ۱۳ (ICARLike): در این مدل، برای شبیه‌سازی رفتار غیر خطی جریان و بارش از مدل ایکار استفاده شده است. با ترکیب مدل ایکار و یک مدل مفهومی ساده، یک مدل سه پارامتری انعطاف‌پذیر پیشنهاد و مورد آزمون قرار گرفته است.

$$R = a.R_{(ICAR)} + b.P + c.T \quad (24)$$

در این مدل، $R_{(ICAR)}$ جریان شبیه‌سازی توسط رابطه ایکار بوده که قبلاً معرفی شده است.

۲-۴- حوضه آبریز و داده‌ها

حوضه آبریز مورد مطالعه، حوضه آبریز سیروان است. این حوضه در محدوده جغرافیایی 36° تا 46° طول شرقی و 34° تا 36° عرض شمالی در غرب ایران واقع است. رودخانه سیروان پنجمین رودخانه پرآب کشور است که از کوهستانهای زاگرس در استان کردستان سرچشمه می‌گیرد. بخش عمده‌ای از آورد سالانه رودخانه سیروان به کشور عراق سرازیر شده و از دسترس خارج می‌گردد. در حال حاضر حدود ۱۰ درصد از پتانسیل آبی این حوضه از طریق سدهای موجود بهره‌برداری می‌گردد. مساحت حوضه ۹۸۶۲ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن ۱۳۵۰ متر از سطح دریا است. موقعیت جغرافیایی، شبکه رودخانه‌ها و ایستگاه‌های اندازه‌گیری حوضه در شکل ۱ ارایه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه سیروان و شبکه رودخانه‌های آن

است. خروجی‌های مدل CGCM3 مربوط به دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دوره آینده ۶۵-۲۰۳۶ است.

۲-۵- واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی

همان‌طور که در بخش ۲-۴ ذکر شد، از ۱۹ سال ابتدایی داده‌های حوضه برای واسنجی مدل و از ۱۴ سال باقی مانده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. تابع هدف برای واسنجی مدل، حداقل ساختن مجموع مربع خطاها است و از یک روش بهینه‌یابی خودکار برای حداقل ساختن تابع هدف و تخمین پارامترها استفاده شد. پس از یافتن پارامترهای مدل در دوره واسنجی، اعتبارسنجی مدل انجام شد.

جدول ۱- مختصات ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی مورد استفاده حوضه سیروان

طول	عرض	ارتفاع	
جغرافیایی	جغرافیایی	(متر)	
۴۷°، ۰۰'	۳۵°، ۲۰'	۱۳۷۳	ایستگاه سینوپتیک سندج
۴۶°، ۱۸'	۳۵°، ۰۹'	۶۹۰	ایستگاه آب‌سنجی سیروان

در این حوضه داده‌های بارش و دمای ایستگاه هواشناسی سندج و داده‌های روزانه جریان رودخانه در ایستگاه خروجی حوضه (ایستگاه سیروان) در دوره‌ی ۱۹۵۹-۲۰۰۴ در دسترس است (جدول ۱). از آمار جریان رودخانه، ۱۲ سال (۸۳-۱۳۷۲) به دلیل وجود نقص در داده‌ها و یا در آزمون کنترل کیفی حذف شده است و از ۳۴ سال داده‌های مشاهداتی بارش و دمای ایستگاه سندج و داده‌های جریان ایستگاه خروجی حوضه برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی استفاده شده است.

از این داده‌ها، سال اول برای خطای شرایط اولیه مدل کنار گذاشته شده است، ۱۹ سال بعدی برای واسنجی مدل و ۱۴ سال انتهایی (۱۹۹۱-۲۰۰۴) برای اعتبارسنجی استفاده شده است. به دلیل کوتاه بودن طول آماری داده‌های سایر ایستگاه‌های حوضه، برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی تنها از داده‌های هواشناسی ایستگاه سندج استفاده شده است. از داده‌های سایر ایستگاه‌ها در سال‌های مشترک برای کنترل کیفیت داده‌ها و توسعه‌ی روابط بارش-ارتفاع و دما-ارتفاع در حوضه استفاده شده است. در موارد لزوم، داده‌های ایستگاه سندج توسط روابط بارش-ارتفاع و دما-ارتفاع به دست آمده برای حوضه، به داده‌های میانگین ارتفاعی حوضه تبدیل شده است.

برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم از سناریوهای بارش و دمای مدل جهانی اقلیم CGCM3 بر مبنای سه سناریو A1B، A2 و B1 استفاده شده

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی جریان سالانه حوضه سیروان توسط مدل‌های منتخب

مدل ICARLike	مدل M8		
۱۹/۷۶	۱۹۹	<i>a</i>	
۰/۲۵	۰/۶۹	<i>b</i>	مقدار پارامترها
۳/۸۱	۰/۰۲	<i>c</i>	
۵	۰	<i>EQ</i>	
۰/۸۴	۰/۷۲	<i>EC</i>	واسنجی
۰/۸۶	۰/۷۲	<i>R²</i>	
۱۲/۹۲	۱۷/۳۶	<i>RMSE</i>	
-۹	-۱۰	<i>EQ</i>	
۰/۷۵	۰/۷۰	<i>EC</i>	اعتبارسنجی
۰/۸۱	۰/۷۴	<i>R²</i>	
۱۶/۸۹	۱۸/۴۰	<i>RMSE</i>	

۳-۲- ارزیابی آثار تغییر اقلیم

سناریوهای میانگین سالانه‌ی دما و بارش اقلیم آینده حوضه سیروان در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس این سناریوها انتظار می‌رود که میانگین دمای حوضه سیروان در دوره ۲۰۳۶-۲۰۶۵ نسبت به دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ بین ۲/۴ تا ۳/۲ افزایش یابد و از مقدار ۱۳/۳ درجه سانتیگراد فعلی به مقداری بین ۱۵/۷ تا ۱۶/۵ برسد. بر این اساس متوسط دمای حداکثر روزانه بین ۲/۱ تا ۳/۲ و متوسط دمای حداقل روزانه بین ۲/۷ تا ۳/۳ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. بر مبنای سناریوهای ریزمقیاس شده‌ی دما و محاسبه تبخیر و تعرق بر اساس روش هارگریوز- سامانی، انتظار می‌رود تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه سیروان در دوره ۲۰۳۶-۶۵ نسبت به دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ بین ۵/۳ تا ۹/۲ درصد افزایش یابد. همچنین بر مبنای این سناریوها، انتظار می‌رود در شرایط اقلیمی آینده میانگین بارش حوضه بین ۵/۷ تا ۱۳/۲ درصد نسبت به دوره پایه کاهش یابد.

با استفاده از سناریوهای دما، بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل آینده‌ی حوضه سیروان و مدل‌های هیدرولوژیکی تهیه شده برای این حوضه، سناریوهای جریان سالانه اقلیم آینده حوضه شبیه‌سازی شد. در شکل‌های ۲ و ۳ سناریوهای آینده جریان حوضه سیروان در دوره ۲۰۳۶-۶۵ با جریان اقلیم دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ مقایسه شده است. به دلیل نزدیک بودن مقادیر نتایج سناریوهای A2 و A1B نمودارهای این دو سناریو تقریباً بر هم منطبق شده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل از معیارهای اریبی EQ مدل، تابع تعیین (R^2) و شاخص راندمان (EC) و ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) استفاده شد. اریبی، خطای نسبی حجم است و از رابطه تعریف می‌شود.

$$EQ = \frac{\overline{Q_{sim}} - \overline{Q_{obs}}}{\overline{Q_{obs}}} \times 100 \quad (25)$$

که در آن، $\overline{Q_{sim}}$ و $\overline{Q_{obs}}$ به ترتیب میانگین جریان‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. تابع تعیین، مربع ضریب همبستگی سری جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی است و توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{[n(\sum_{i=1}^n Q_{sim_i} Q_{obs_i}) - (\sum_{i=1}^n Q_{sim_i})(\sum_{i=1}^n Q_{obs_i})]^2}{[n \sum_{i=1}^n Q_{sim_i}^2 - (\sum_{i=1}^n Q_{sim_i})^2][n \sum_{i=1}^n Q_{obs_i}^2 - (\sum_{i=1}^n Q_{obs_i})^2]} \quad (26)$$

که در آن، Q_{sim_i} و Q_{obs_i} به ترتیب جریان‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در سال i -ام و n تعداد داده‌ها است. شاخص راندمان توسط رابطه زیر تعریف می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$EC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{Q_{obs}} - Q_{obs_i})^2} \quad (27)$$

$RMSE$ توسط رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{n}} \quad (28)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی هیدرولوژیکی

بیست مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی جریان سالانه‌ی حوضه واسنجی و اعتبارسنجی شدند. در نتیجه‌ی مقایسه مدل‌ها، دو مدل M8 با تبخیر و تعرق هارگریوز- سامانی و مدل تجربی ۱۳ (ICARLike) به عنوان بهترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی جریان سالانه حوضه سیروان انتخاب شدند. نتایج شبیه‌سازی توسط این مدل‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای شبیه‌سازی توسط مدل M8، مقادیر بارش ایستگاه سندج توسط رابطه بارش-ارتفاع حوضه به مقادیر بارش میانگین ارتفاعی حوضه تبدیل شد. بارش میانگین حوضه، از رابطه بارش-ارتفاع حوضه سیروان، مساوی ۰/۹۶ بارش ایستگاه هواشناسی سندج است. دو مدل منتخب از تعداد مساوی پارامتر برخوردارند و تقریباً عملکردشان به خوبی یکدیگر است. لذا از هر دو مدل برای شبیه‌سازی جریان و ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه استفاده شد؛ تا به این ترتیب عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی در نتایج دیده شود.

جدول ۳- مقادیر میانگین سالانه متغیرهای ایستگاه سنندج در دوره مشاهداتی و سناریوهای اقلیم آینده

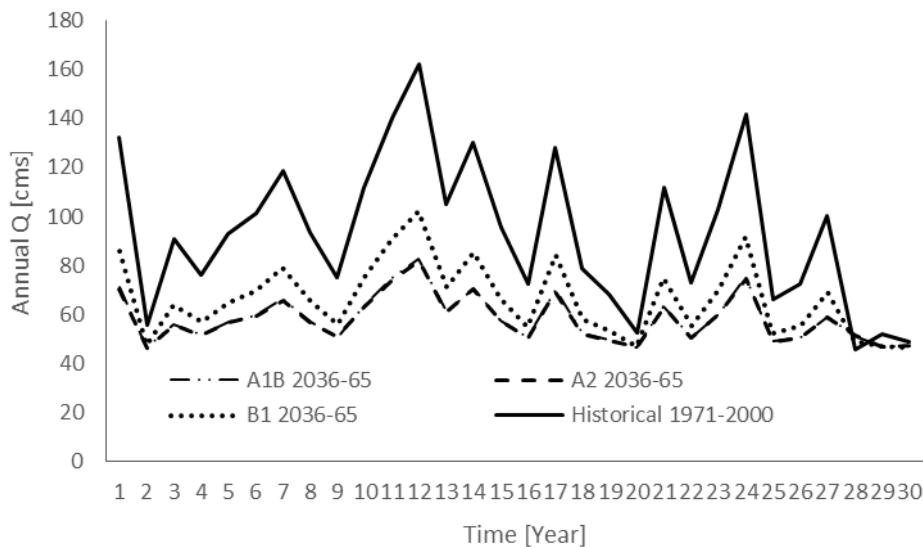
سناریوهای اقلیم آینده (۲۰۳۶-۲۰۶۵)			دوره مشاهده شده (۱۹۷۱-۲۰۰۰)	
A1B	B1	A2		
۸/۲	۷/۷	۸/۳	۵	میانگین دمای حداقل روزانه [°C]
۲۴/۵	۲۳/۶	۲۴/۷	۲۱/۵	میانگین دمای حداکثر روزانه [°C]
۱۶/۴	۱۵/۷	۱۶/۵	۱۳/۳	میانگین دمای دوره [°C]
۴۰۱/۲	۴۳۵/۹	۴۰۱/۷	۴۶۲	میانگین بارش [mm]

می‌شود که تعداد خشکسالی‌ها به ۲۹ تا ۳۰ سال از کل دوره ۳۰ ساله برسد. بر اساس مدل هیدرولوژیکی M8، برای سناریوهای مختلف انتشار، پیش‌بینی می‌شود که تعداد خشکسالی‌ها به ۱۶ تا ۲۱ سال از کل دوره ۳۰ ساله برسد.

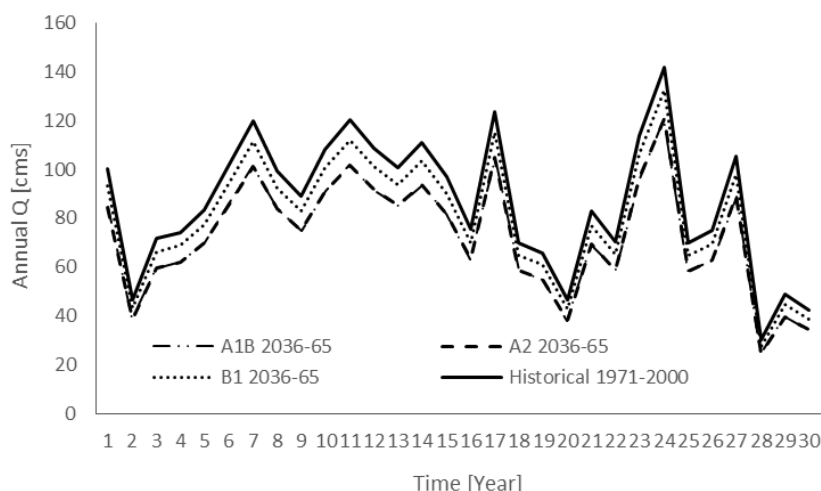
نتایج برای همه سناریوهای انتشار و مدل‌های هیدرولوژیکی حاکی از افزایش تعداد خشکسالی‌ها در اقلیم آینده است. ضمن آنکه عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی در نتایج مطالعه بسیار مهم‌تر از عدم قطعیت سناریوهای انتشار است (جدول ۵). برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شدت خشکسالی‌ها، متوسط کمبود جریان خشکسالی‌ها از مقدار میانه جریان دوره تاریخی برای دوره‌ی پایه و سناریوهای اقلیم آتی مقایسه شد (Fleig, 2004). همچنین مقدار کمبود حجم جریان در خشک‌ترین سال دوره، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد متوسط شدت خشکسالی‌ها در سال‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه به مقدار قابل ملاحظه‌ای شدیدتر خواهد شد.

با وجود آنکه دامنه عدم قطعیت‌های مدل‌های هیدرولوژیکی و سناریوهای انتشار در نتایج وسیع است، جریان آینده حوضه تحت هر یک از سناریوها و مدل‌های مورد بررسی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در جدول ۴ میانگین جریان حوضه سیروان در اقلیم فعلی با سناریوهای اقلیم آینده مقایسه شده است. بر مبنای نتایج سناریوهای مورد بررسی، تحت مدل هیدرولوژیکی ICARLike، جریان حوضه در اقلیم آینده ۲۹ تا ۳۸ درصد نسبت به اقلیم دوره پایه کاهش می‌یابد؛ و تحت مدل هیدرولوژیکی M8 انتظار می‌رود جریان حوضه در اقلیم آینده بین ۷ تا ۱۶ درصد نسبت به اقلیم دوره پایه کاهش یابد.

برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های حوضه سیروان، مقدار حد آستانه خشکسالی، دبی میانه‌ی دوره تاریخی (Q_{50}) انتخاب شد (Fleig, 2004). بر این مبنای، ۱۵ سال از ۳۰ سال دوره مشاهده شده خشکسالی محسوب می‌شود. برای اقلیم آینده، بر اساس نتایج مدل هیدرولوژیکی ICARLike و سناریوهای انتشار مختلف، پیش‌بینی



شکل ۲- اثر تغییر اقلیم بر جریان سالانه حوضه سیروان با استفاده از مدل ICARLike



شکل ۳- اثر تغییر اقلیم بر جریان سالانه حوضه سیروان با استفاده از مدل M8

جدول ۴- میانگین‌های جریان شبیه‌سازی شده حوضه در دوره مشاهداتی و سناریوهای آینده (m³/s)

سناریوهای اقلیم آینده (۲۰۳۶-۲۰۶۵)		دوره مشاهده شده		
A1B	B1	A2	۱۹۷۱-۲۰۰۰	
۵۸/۲۴	۶۶/۲۰	۵۷/۹۰	۹۳/۱۴	مدل هیدرولوژیکی ICARLike
۷۲/۵۸	۸۰/۳۰	۷۲/۶۱	۸۶/۴۴	مدل هیدرولوژیکی M8

جدول ۵- مقایسه خشکسالی‌ها در دوره تاریخی و اقلیم تغییر یافته آینده

M8				ICARLike			مدل	
دوره آینده		دوره پایه		دوره آینده		دوره پایه		
B1	A2	A1B		B1	A2	A1B		
۱۶	۲۱	۲۱	۱۵	۲۹	۳۰	۳۰	۱۵	سناریو
۴۳۹	۵۵۳	۵۵۴	۳۶۰	۸۶۰	۱۱۱۰	۱۱۰۰	۳۹۸	تعداد خشکسالی
۱۸۵۴	۱۹۵۰	۱۹۵۰	۱۷۷۳	۱۴۷۰	۱۴۷۵	۱۴۷۵	۱۵۰۰	میانگین سالانه حجم کمبودها (میلیون متر مکعب)
								بیشترین کمبود سالانه (میلیون متر مکعب)

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله، اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی، جریان رودخانه و خشکسالی‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز سیروان در مقیاس سالانه ارزیابی شد. در این ارزیابی، عدم قطعیت‌های ساختار مدل هیدرولوژیکی و سناریوهای انتشار نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه، تعداد بیست مدل هیدرولوژیکی برای حوضه واسنجی، اعتبارسنجی و مقایسه شد. در پایان با معرفی دو مدل ICARLike و M8 به عنوان مدل‌های برتر، جریان سالانه‌ی حوضه‌ی سیروان شبیه‌سازی شد. انتخاب دو مدل

این در حالی است که شدت شدیدترین خشکسالی، تغییر قابل توجهی ندارد. بر اساس مدل ICARLike برای همه سناریوهای انتشار، شدت شدیدترین خشکسالی دوره آینده اندکی کمتر از شدت شدیدترین خشکسالی دوره تاریخی است، اما بر اساس مدل M8، برای همه سناریوهای انتشار، شدت شدیدترین خشکسالی دوره آینده اندکی وخیم‌تر از شدت شدیدترین خشکسالی دوره تاریخی است. در خصوص شدت خشکسالی‌ها نیز عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی بیشتر از عدم قطعیت سناریوهای انتشار است.

پیش‌یابی می‌شود تغییر اقلیم آینده اثر مهمی بر متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبریز سیروان داشته باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- General Climate Model
- 2- Resolution
- 3- Intergovernmental Panel of Climate Change
- 4- Change Factors
- 5- water balance
- 6- Bias

۵- مراجع

- Blaney HF, Criddle WD (1950) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96, 44 pp
- Fleig A (2004) Hydrological Drought – a comparative study using daily discharge series from around the world, Master Thesis, Institut Für Hydrology, Universität Freiburg
- Fowler HJ, Kilsby CG (2004) Future increases in UK water resource drought projected by a regional climate model. In Proceedings of the BHS International Conference on Hydrology: Science & Practice for the 21st Century, London, 1:15–21
- Fowler HJ, Kilsby CG (2007) Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. J. Climate Change, 80:337-367
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1 (2), 96–99
- IPCC (1995) Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. In: Waston, RT., Zinyowera, MC, Moss, RH (ed.). UK
- 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
- IPCC (2007) General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 2
- Khazaei MR, Zahabiyoun B, 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

هیدرولوژیکی هم ارز، به دلیل بررسی عدم قطعیت ساختار مدل هیدرولوژیکی در نتایج تحقیق بوده است. برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، سه روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل هارگریوز-سامانی، بلانی کریدل و تورنت وایت مقایسه شد و روش هارگریوز-سامانی برای تولید تبخیر و تعرق پتانسیل ورودی مدل هیدرولوژیکی برگزیده شد. در ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی، ضریب تعیین در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، بین ۰/۷۲ تا ۰/۸۶، شاخص راندمان بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۴، و درصد خطای شبیه‌سازی حجم جریان بین صفر تا ۱۰ درصد به دست آمد، که حاکی از عملکرد قابل قبول مدل‌های هیدرولوژیکی است. برای فراهم نمودن سناریوهای اقلیم آینده حوضه‌ی سیروان، خروجی‌های مدل CGCM3 به روش عامل تغییرات برای حوضه ریز مقیاس شد. برای بررسی عدم قطعیت سناریوهای انتشار از سه سناریوی A1B، A2، و B1، که دامنه وسیعی از حالات غلظت گازهای گلخانه‌ای را در بر می‌گیرند، استفاده شد. بر مبنای نتایج تحقیق، پیش‌یابی می‌شود در دوره ۶۵-۲۰۳۶ نسبت به دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰، میانگین دمای حداکثر روزانه حوضه بین ۲/۱ تا ۳/۲ و میانگین دمای حداقل روزانه حوضه بین ۲/۷ تا ۳/۳ درجه سانتیگراد افزایش یابد. همچنین انتظار می‌رود تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه سیروان بین ۵/۳ تا ۹/۲ درصد افزایش یابد. علاوه بر آن پیش‌یابی می‌شود که میانگین بارش این حوضه بین ۱۳/۲ تا ۵/۷ درصد کاهش یابد.

تحت مدل هیدرولوژیکی ICARLike و سه سناریوی انتشار، جریان حوضه سیروان در اقلیمی آینده کاهش ۲۹ تا ۳۸ درصد را نسبت به اقلیم فعلی نشان می‌دهد. ضمن آنکه تعداد سال‌های با جریان زیر میانه دوره تاریخی، از ۱۵ سال به ۲۹ تا ۳۰ سال در کل دوره ۳۰ ساله می‌رسد. با استفاده از مدل هیدرولوژیکی M8، در شرایط اقلیمی آینده کاهشی بین ۷ تا ۱۶ درصد نسبت به اقلیم فعلی برای جریان حوضه قابل انتظار است و تعداد خشکسالی‌ها، از ۱۵ سال به ۱۶ تا ۲۱ سال از کل دوره ۳۰ ساله می‌رسد. میانگین کمبود جریان برای همه سناریوها کاهش قابل توجه نشان می‌دهد. با این وجود، شدت شدیدترین خشکسالی برای همه سناریوهای انتشار بر اساس مدل ICARLike اندکی کاهش و بر اساس مدل M8 اندکی افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج، به ترتیب اهمیت، عدم قطعیت‌های ساختار مدل‌های هیدرولوژیکی و سناریوهای انتشار در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر این حوضه مهم است و لازم است مورد توجه قرار گیرد. لیکن با وجود عدم قطعیت مهم مدل‌های هیدرولوژیکی و سناریوهای انتشار،

- step: The Manabe bucket model revisited . Journal of Hydrology 328:283–296
- Nash JE, Sutcliffe J (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I. A Discussion on Principles. *J. Hydrol.* 10(3):282–293
- Negharesh H, Shahhoseini M (2012) The survey of estimation methods of annual discharge and flood-water of the Tighab (Catchment of Khash township). *Geographic Space*, 11(36):255-282 (In Persian)
- Perrin C, Michel C, Andre'assian V(2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4):275–289
- Prudhomme C, Reynard N, Crooks S (2002) Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes*, 16, 1137-1150
- Shamohammadi Heidari Z, Panjehkeh N (2009) Calibration of empirical relationships for estimation of annual sewage in basins of the Khuzestan Plain. 1st International Conference of Water Crisis, Zabol University, Zabol, Iran (In Persian)
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*, 38:55-94
- Leander R, Bouishand TA (2006) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332:487-496
- Massah Bavani AR, Morid S (2006) Impact of climate change on the water resources of Zayandeh Rud Basin. *JWSS - Isfahan University of Technology*, 9 (4):17-28 (In Persian)
- Modaresi F, Araghinrad S, Ebrahimi K, Kholghi M (2012) Assessment of climate change effects on the annual water yield of rivers: A case study of Gorganroud river, Iran. *Journal of Water and Soil*, 26 (6):1365-1377 (In Persian)
- Manabe S (1969) Climate and the ocean circulation. 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface. *Mon. Weather Rev.* 97 (11), 739–774
- Mouelhi S (2003) Versunecha`mechoe`rente de mode`lespluiiede `bit conceptuelsglobaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensueletjournalier (Towards a consistent series of lumped conceptual rainfall–runoff models, for inter-annual, annual, monthly and daily time steps). Ph.D. Thesis, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp
- Mouelhi S, Michel C, Perrin C, Andreassian V (2006) Linking stream flow to rainfall at the annual time