

مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در تاثیر بر

رواناب حوضه در دوره آتی

علیرضا کمال^۱ و علیرضا مساح بوانی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۸/۲، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱)

چکیده

استفاده از خروجی مدل‌های گردش کلی جو - اقیانوس (AOGCMs) به‌منزله معتبرترین ابزار در تحقیقات تغییر اقلیم، در حال افزایش است. تاکنون نسخه‌های گوناگونی از مدل‌های AOGCM عرضه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های اولین گزارش ارزیابی هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) تحت عنوان FAR(1990)، مدل‌های دومین گزارش با عنوان SAR(1996)، مدل‌های سومین گزارش با عنوان TAR(2001) و مدل‌های چهارمین گزارش ارزیابی با عنوان AR4(2007) اشاره کرد. هدف از این تحقیق مقایسه عدم قطعیت مدل‌های TAR و AR4 در تاثیر بر رواناب حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ است. برای این کار از خروجی‌های هفت مدل شامل TAR شامل CCSR، CGCM2، ECHAM4، GFDL-، R30، HadCM3، NCAR-DOE PCM و نه مدل منتخب از AR4 شامل CCSM3، CGCM3، CSIRO Mk3، MIROC-med، PCM تحت سناریو انتشار A2 استفاده شد. در ابتدا مدل مفهومی بارش - رواناب SIMHYD در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای حوضه قره‌سو مورد واسنجی و راستی‌آزمایی قرار گرفت. سپس با مقیاس‌کاهی داده‌های اقلیمی مدل‌های ذکر شده TAR و AR4 برای منطقه تحقیقاتی با روش تناسبی و معرفی آنها به مدل SIMHYD، بازه تفاوت بین مدل‌ها در برآورد رواناب حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت دو گروه از مدل‌های TAR و AR4 مورد مقایسه قرار گرفت. هرچند در حال حاضر از هر دو گروه از این مدل‌ها در بررسی اثرات تغییر اقلیم استفاده می‌شود، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های AR4 ضمن مدیریت بیشتر عدم قطعیت نتایج کاربردی‌تری نسبت به مدل‌های TAR به‌همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، مدل SIMHYD، مدل AOGCM-TAR، مدل AOGCM-AR4

Comparison of future uncertainty of AOGCM-TAR and AOGCM-AR4 models in the projection of runoff basin

Kamal, A. R.¹ and Massah Bavani, A. R.²

¹M.Sc. Student of Water Resources Engineering, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Irrigation and Drainage Engineering Department, University of Tehran, Iran

(Received: 24 Oct 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

Increased concentration of greenhouse gases is expected to alter the radiative balance of atmosphere, causing increases in temperature and changes in precipitation patterns and other climatic variables. These changes are associated with the changes in hydrological systems globally and at the basin scale. These changes include: precipitation patterns and

extremes; the amount and generation of river flow; the frequency and intensity of flood and drought.

At present, coupled Atmospheric -Oceanic General Circulation Models (AOGCMs) are the most frequently used models for projection of different climatic change scenarios. These scenarios can finally simulate other changes, such as water resources changes in the future. The basis of these models consists of describing the physical processes taking place in the climate system and the dynamics of climate variables as a function of different internal or external changes. Up to now IPCC has released 4 different versions of AOGCM models including: First Assessment Report models (FAR) in 1990, Second Assessment Report models (SAR) in 1996, Third Assessment Report models (TAR) in 2001 and Fourth Assessment Report models (AR4) in 2007. In this paper we evaluate the uncertainty of using different TAR and AR4 AOGCM models on the projection of runoff of a basin. At first we used temperature and precipitation variables of 7 TAR models including CCSR, CGCM2, CSIRO-MK2, ECHAM4, GFDL-R30, HadCM3, NCAR-DOE PCM and 9 AR4 models including; CCSM3, GCM3, CSIRO Mk3, GFDL CM2.1, GISS E-R, HadCM3, ECHAM5, MIROC-med, PCM for the 2040-2069 periods under A2 emission scenario. The A2 scenario corresponds to pessimistic future with higher population growth, lower GDP growth, and fragmented and slower technological change. A conceptual rainfall-runoff model (SYMHYD) was calibrated and verified for the Gharesu basin in baseline period (1971-2000). SIMHYD simulates daily runoff (Surface runoff and base flow) using daily precipitation and potential evapotranspiration (PET) as input data. Gharesu basin is located in North West of great Karkheh River Basin, west of Iran.

Historical data in this study are daily temperature (T), precipitation (P) and runoff (R) for thirty years period (1971 to 2000). These data were acquired from different sources and stations. Temperature records of Kermanshah synoptic station, Outflow measurements of Qarehbaghestan hydrometric station, and daily precipitation records of eleven rain gauge stations were used in this study.

The climate variables (monthly temperature and precipitation) of 16 AOGCMs were downscaled to Gharesu basin. Downscaling is a procedure that derives local or regional scale information from larger scale data like AOGCM outputs. In this study, change factor downscaling techniques was employed to generate monthly precipitation and temperature values for Gharesu basin scale in future period (2040-2069). Results show that in all months the temperature of the basin will increase by an average of 2.5°C. On the other hand the increasing of temperature simulated by TAR models are more than AR4 models. Both AR4 and TAR models simulate precipitation in a same manner, reduction for winter and spring and increase for autumn.

Finally the ranges of precipitation and temperature change of the period 2040-2069 simulated by both models introduced to SYMHYD rainfall-runoff model and the monthly runoff changes of the basin were simulated for the period 2040-2069 relative to the period 1971-2000. Results show that runoff change of the basin due to AR4 models are less than TAR models for most of the months. On the other hand the runoff will increase in winter by 20-60% and by 20-40% in summer and decrease in autumn up to 40% and up to 60% in spring. Finally it can be concluded that although the number of AR4 models used in this study is more than TAR models, the range of uncertainty of AR4 is less than TAR. The final results showed that the projections of AR4 models are more reliable than TAR models.

Key words: Climate change, SIMHYD, AOGCM-TAR, AOGCM -AR4 models, Rainfall-runoff

۱ مقدمه

تاکنون رشد قابل‌توجهی یافته است ولی همچنان از مدل‌های گروه‌های قبل نیز در تحقیقات استفاده می‌شود. در ادامه سعی شده تا به تحقیقاتی که از هر گروه از مدل‌های AOGCM استفاده کرده‌اند، اشاره شود.

در تحقیقی که مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵) به انجام رساندند، وضعیت آینده اقلیم حوضه زاینده‌رود تحت‌تاثیر پدیده تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق عملکرد دو روش مقیاس‌کاهی (کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)) متوسط ماهانه دما و بارندگی هفت مدل AOGCM-TAR مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج روشن ساخت که استفاده صرف از خروجی یک مدل AOGCM تحت یک سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای نمی‌تواند نتایجی منطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم داشته باشد. تحقیقی دیگر، تاثیر تغییر اقلیم بر میزان جریان آب در حوضه‌ای در بلژیک، با استفاده از خروجی‌های شش مدل AOGCM-TAR در هشت حوضه را گلن و رولن (۱۹۹۸) مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. همه مدل‌ها به‌جز دو مورد از آنها، افزایش فراوانی سیلاب را نشان دادند. در تحقیق دیگری، تاثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط و با استفاده از خروجی هفت مدل AOGCM-TAR را پرودهام و همکاران (۲۰۰۱) به انجام رساندند. نتایج روشن ساخت که عدم قطعیت مربوط به خروجی مدل‌های گوناگون AOGCM به‌خصوص برای دوره‌های زمانی کوتاه‌تر یعنی دوره ۲۰۱۰-۲۰۴۹ بیشترین تاثیر را خواهد داشت.

در تحقیقی کریستینسن و لسنمایر (۲۰۰۶) اثر تغییر اقلیم را بر هیدرولوژی و منابع آب حوزه رودخانه کلرادو در ایالت متحد با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌های بزرگ‌مقیاس هیدرولوژی و خروجی‌های ۱۱ مدل AOGCM-AR4 و دو سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای

طبق گزارش‌های IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) تغییر اقلیم باعث ایجاد تغییر در مقادیر دما و بارش در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است. به‌گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخداد‌های حداکثر اقلیمی مانند خشک‌سالی و سیلاب در بعضی مناطق افزایش یافته است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۰۷). از این‌رو پرداختن به تغییرات در دما و بارش در حکم اولین اثر تغییر اقلیم در یک منطقه، حائز اهمیت است. در این راستا برای پیش‌بینی وضعیت اقلیمی، باید اقدام به تولید سناریوهای اقلیمی کرد (آی‌پی‌سی‌سی، ۱۹۹۹).

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های گردش کلی جو-اقیانوس (Atmosphere-Ocean) General Circulation Model است (لن و همکاران ۱۹۹۹؛ میشل، ۲۰۰۳؛ ویلی و هریس، ۲۰۰۶). مدل‌های AOGCM بر پایه قوانین فیزیکی که با روابط ریاضی داده می‌شود استوار هستند. این روابط در یک شبکه سه‌بعدی در سطح کره زمین حل می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی اقلیم کره زمین مولفه‌های اصلی سامانه اقلیم شامل: جو (اتمسفر)، سنگ‌سپهر (لیتوسفر)، زیست‌سپهر (بیوسفر)، آب‌سپهر (هیدروسفر) و یخ‌سپهر (کرایوسفر)، به‌شکل زیرمدل‌های عددی جداگانه تهیه می‌شوند. سپس با جفت‌شدن این زیرمدل‌ها باهم AOGCM‌ها ساخته می‌شوند. IPCC که وظیفه اصلی تحقیق و بررسی در رابطه با مقوله‌های علمی و فنی و خطرات بالقوه تغییرات آب و هوا و همچنین اثرات آن در سطح جهان و تعیین سیاست‌های مقابله با آن را دارد، تاکنون چهار گزارش ارزیابی (Assessment Report) در سه بخش مبانی علمی، آسیب‌پذیری و سازگاری، و فرونشانی تغییر اقلیم عرضه کرده است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۰۷). هرچند استفاده از مدل‌های AR4 (Assessment Report No.4, AR4) در ارزیابی‌های تغییر اقلیم از ۲۰۰۷

اقلیم استفاده می‌شود. از این‌رو هدف این تحقیق بررسی تفاوت این دو گروه مدل در برآورد متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژی حوضه در دوره آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم، در جهت استفاده مطلوب‌تر از این مدل‌های اقلیمی است.

۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه تحقیقاتی

زیرحوضه قره‌سو در شمال غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده است. مساحت آن برابر ۵۳۵۴ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۳۴۶ و ۱۱۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانه این حوضه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است.

در تحقیقات تغییر اقلیم در ابتدا لازم است تا داده‌های دوره پایه مشخص شود. در این تحقیق داده‌های پایه مورد استفاده شامل داده‌های مشاهداتی دما، بارش و رواناب در دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ از ایستگاه‌های منتخب منطقه است. در این تحقیق به منظور نشان دادن واضح‌تر تاثیر تغییرات متغیرهای اقلیمی بر رواناب منطقه، از داده‌های روزانه استفاده شده است. برای متغیر دما داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه به‌خاطر دارا بودن داده‌های کامل و ارتفاعی برابر متوسط ارتفاع سایر ایستگاه‌ها در حکم مبنا انتخاب شد. برای متغیر بارش از میانگین منطقه‌ای داده‌های روزانه ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی استفاده شد. از طرف دیگر ایستگاه هیدرومتری قره‌باغستان واقع در خروجی حوضه قره‌سو به‌منزله ایستگاه مبنا برای مشاهده تغییرات رواناب حوضه انتخاب شد (جدول ۱ و شکل ۱).

۲-۲ مدل‌های اقلیمی و سناریوی انتشار

مدل‌های AOGCM که در این تحقیق استفاده شده‌اند زیر مجموعه ای از مدل‌های سومین گزارش ارزیابی (TAR) و مدل‌های چهارمین گزارش ارزیابی (AR4) IPCC هستند (جدول ۲) که خروجی‌های دما، بارش و همچنین رواناب

A2 (افزایش زیاد گازهای گلخانه‌ای) و B1 (افزایش کم گازهای گلخانه‌ای) مورد ارزیابی قرار دادند. از سناریوهای اقلیمی کوچک‌مقیاس شده در حکم ورودی مدل بزرگ‌مقیاس هیدرولوژی VIC استفاده شد. سپس مجموعه‌ای از دما و بارش کوچک‌مقیاس شده و مشتقات آنها شامل گردش جریان و عملکرد سامانه مخزن با شبیه‌سازی‌های اقلیم معاصر در دوره تاریخی ۱۹۵۰-۱۹۹۹ مقایسه شد. ماکزینو و همکاران (۲۰۰۷)، ۱۷ مدل اقلیمی چهارمین گزارش ارزیابی AR4 را با شبیه‌سازی پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش بر حوضه ماری‌دارلینگ استرالیا و به‌دست آوردن تابع چگالی احتمال (PDFs) برای هر متغیر، رتبه‌بندی کردند. آنها در نهایت سه مدل CSIRO، IPSL و MIROC-m را پیشنهاد کردند. زیرا این مدل‌ها PDFهای مشاهداتی هر سه متغیر را نسبت به دیگر مدل‌ها (که صرفاً جواب‌گوی PDF یک یا دو متغیر بودند)، به‌خوبی برآورد کردند. مورر (۲۰۰۷) عدم قطعیت اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی نوادا را تحت دو سناریو انتشار A1 و B2 مورد بررسی قرار داد. او در این تحقیق از خروجی ۱۱ مدل AOGCM-AR4 در شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی VIC در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ استفاده کرد. نتایج روشن‌ساخت که سناریوهای انتشار آینده، نقش بارزی در شدت اثرات منابع آب کالیفرنیا ایفا می‌کنند. کمال و مساح‌بوانی (۱۳۹۰) عدم قطعیت نه مدل AOGCM مربوط به گروه AR4 و دو مدل هیدرولوژی را در برآورد رواناب حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم در حوضه قره‌سو عملی ساختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تاثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM بر اقلیم منطقه نسبت به تاثیر عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژی بر رواناب حوضه بیشتر است.

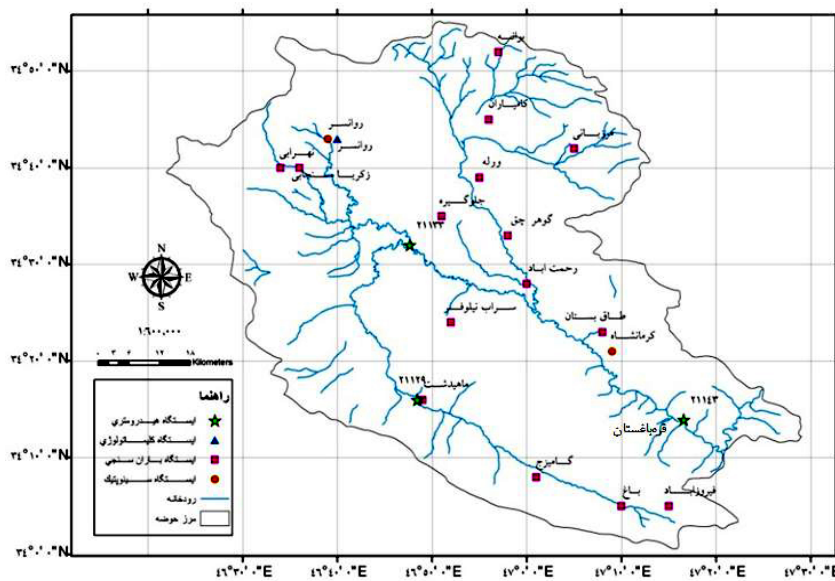
با توجه به بررسی‌های به انجام رسیده در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر رواناب، می‌توان پی‌برد که در حال حاضر از هر دو گروه از مدل‌های AOGCM در تحقیقات تغییر

مجموع سناریوهای SRES (Special Reports on) در این سناریو از رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی با دیدگاه منطقه‌ای در جهت تعیین میزان گازهای گلخانه‌ای استفاده شده است.

حاصل از آنها در حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی‌های دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۹) در هر ۱۶ مدل AOGCM، از متغیرهای اقلیمی اجرا شده مدل‌ها تحت سناریوی انتشار A2 از

جدول ۱. نام و نوع ایستگاه‌ها در محدوده حوضه قره‌سو.

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
بوانه	بارانسنجی	۴۶-۵۸	۳۴-۵۲	۱۸۵۰
بان سعید	بارانسنجی	۴۷-۰۷	۳۴-۵۶	۱۵۰۰
دهستان	بارانسنجی	۴۷-۱۴	۳۴-۴۳	۱۶۸۰
جلوگیره	بارانسنجی	۴۶-۵۱	۳۴-۳۵	۱۳۸۰
کرمانشاه	بارانسنجی	۴۷-۰۹	۳۴-۲۱	۱۳۱۸
هرسین	بارانسنجی	۴۷-۳۴	۳۴-۱۶	۱۵۵۰
گوهرچغا	بارانسنجی	۴۷-۰۰	۳۴-۳۳	۱۴۰۰
ماهیدشت	بارانسنجی	۴۶-۴۸	۳۴-۱۶	۱۳۵۰
حسن آباد	بارانسنجی	۴۶-۳۹	۳۴-۱۰	۱۵۰۰
دهراشه	بارانسنجی	۴۶-۲۲	۳۴-۴۱	۱۵۰۰
روانسر	بارانسنجی	۴۶-۴۰	۳۴-۴۳	۱۴۰۰
کرمانشاه	سینوپتیک	۴۷-۰۹	۳۴-۲۱	۱۳۱۸
قره‌باغستان	هیدرومتری	۴۷-۱۵	۳۴-۱۴	۱۲۸۰



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب.

جدول ۲. مشخصات ۱۶ مدل AOGCM استفاده شده در این تحقیق (آی پی سی سی-دی دی سی، ۱۹۸۸).

نام مدل های AOGCM-TAR	سناریوهای شبیه سازی	قدرت تفکیک جوی	مرجع
NCARPCM	A2,B2,A1B	4.5° . 7.5°	Meehl et al,2001
HADCM3	A1,A2b,A2c,B2	2.5° . 3.75°	Gordon et al,2000
GFDL-R30	A2,B2	4.5° . 7.5°	Knutson et al,1999
ECHAM4	A2,B2	2.8° . 2.8°	Stendel et al, 2000
CSIRO	A1,A2,B1,B2	3.2° . 3.7°	Gordon and O'Farrell, 1997
CGCM2	A2,B2	3.7° . 3.7°	Flato and Boer, 2001
CCSRNIES	A1,A1FI,A1T,A2,B1,B2	5.6° . 5.6°	Nozawa et al, 2001
نام مدل های AOGCM-AR4	سناریوهای شبیه سازی	قدرت تفکیک جوی	مرجع
PCM	A1FI, A2, B1	2.81° . 2.81°	Washington et al. (2000)
MIROC-med	A2, B1	2.81° . 2.81°	Hasumi and Emori (2004)
HadCM3	A1FI, A2, B1	2.5° . 3.75°	Pope et al. (2000)
GISS E-R	A2, B1	4° . 5°	Schmidt et al. (2006)
GFDL CM2.1	A1FI, A2, B1	2° . 2.5°	Delworth et al. (2006)
ECHAM5	A2, B1	1.875° . 1.875°	Roeckner et al. (2003)
CSIRO Mk3	A2, B1	1.875° . 1.875°	Gordon et al. (2002)
CGCM3	A2, B1	3.75° . 3.75°	Kim et al. (2002, 2003)
CCSM3	A2, B1	1.4° . 1.4°	Collins et al. (2006)

۳-۲ مقیاس گاهی

یکی از محدودیت های عمده در استفاده از خروجی مدل های AOGCM تفکیک مکانی کم (Resolution) آنها است که به لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نیاز مدل های هیدرولوژی مطابقت ندارد. بنابراین از روش های مقیاس گاهی (Downscaling) برای رفع این محدودیت استفاده می شود. روش های مقیاس گاهی عبارتند از: روش استفاده از سلول اصلی یا روش تناسبی (Proportional Downscaling)، روش درون یابی اطلاعات سلول های مجاور، روش های آماری (Statistical Downscaling) و روش دینامیکی (ویلیبی و هریس، ۲۰۰۶). در این روش ها سعی می شود تا داده های شبیه سازی شده با استفاده از سلول بزرگ مقیاس مدل

AOGCM به داده های ایستگاه مورد بررسی نسبت داده شود (مقیاس گاهی مکانی). در این نسبت دهی همچنین می توان با استفاده از روش های متفاوت، مقیاس زمانی داده های شبیه سازی شده را نیز کاهش داد (مقیاس گاهی زمانی).

در این تحقیق به منظور مقیاس گاهی داده های مدل های AOGCM برای منطقه مورد بررسی از روش تناسبی استفاده می شود. در این روش به طور معمول نسبت های ماهانه برای سری های تاریخی به دست می آید. ابتدا سناریوهای تغییر اقلیم برای دما و بارش تولید می شود. لذا برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر «اختلاف» برای دما (رابطه ۱) و «نسبت» برای بارندگی (رابطه ۲) برای متوسط درازمدت هر ماه در دوره آتی

مدل‌های دو گروه AOGCM بر رواناب از مدل بارش- رواناب SIMHYD استفاده شد که شرح مختصری از آن در ادامه آورده می‌شود. مدل SIMHYD یک مدل مفهومی (conceptual) بارش- رواناب است که جریان روزانه را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر تعرق پتانسیل روزانه شبیه‌سازی می‌کند. SIMHYD نسخه ساده شده مدل مفهومی بارش- رواناب HYDROLOG در ۱۹۷۲ و MODHYDROLOG در ۱۹۹۱ است (چیو و همکاران ۲۰۰۲). در مدل SIMHYD از هفت پارامتر استفاده می‌شود که روابط ساده شده آنها در زیر آورده شده است. ساختار این مدل بارش- رواناب در شکل ۲ آورده شده است.

داده‌های کوچک مقیاس شده حاصل از نه مدل AR4- AOGCM و هفت مدل AOGCM-TAR به‌طور جداگانه به مدل بارش- رواناب معرفی می‌شوند و دامنه تغییرات رواناب حوضه قره‌سو در اثر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شبیه‌سازی می‌شود.

PET = areal potential evapotranspiration (Input data) (۵)

IMAX = lesser of {INSC, PET} (۶)

INT = lesser of {IMAX, RAIN} (۷)

INR = RAIN - INT (۸)

RMO = lesser of {COEFF exp (-SQ x SMS/SMSC), INR} (۹)

IRUN = INR - RMO (۱۰)

SRUN = SUB x SMS/SMSC x RMO (۱۱)

REC = CRAK x SMS/SMSC x (RMO - SRUN) (۱۲)

SMF = RMO - SRUN - REC (۱۳)

POT = PET - INT (۱۴)

ET = lesser of {10 x SMS/SMSC, POT} (۱۵)

BAS = K x GW (۱۶)

RUNOFF = IRUN + SRUN + BAS (۱۷)

در اینجا PET تبخیر و تعرق پتانسیل واقعی، INSC (mm)

دوره شبیه‌سازی شده پایه با استفاده از همان مدل (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (جونز و هلمن، ۱۹۹۶).

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (۱)$$

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

در روابط فوق ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین درازمدت ۳۰ ساله برای هر ماه ($1 \leq i \leq 12$)، $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده با AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا ۲۰۴۰-۲۰۶۹)، $\bar{T}_{GCM, base, i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده با AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای هر ماه است. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار است.

سپس از روش عامل تغییر (Change Factor) برای مقیاس‌کاهی تناسبی داده‌های طرح استفاده می‌شود. در روش عامل تغییر برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) افزوده می‌شود:

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (۳)$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (۴)$$

در رابطه فوق T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (در اینجا روزانه) در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰)، T سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده است. در رابطه (۴) برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار است.

۴-۲ مدل هیدرولوژی

در این تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر عدم قطعیت مربوط به

بر رواناب حوضه در دوره آتی تعیین می‌شود.

به منظور بررسی کیفی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در وضعیت کنونی منطقه از روابط ۱۸، ۱۹ و ۲۰ استفاده شد. جدول‌های ۳ و ۴ معیارهای عملکرد مدل‌های AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارندگی ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) منطقه، نسبت به داده‌های مشاهداتی ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) حوضه را نشان می‌دهند. عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی مقادیر بارش و به خصوص دما برای ایستگاه‌های مورد بررسی نشان از زیاد بودن R^2 برای تمامی مدل‌ها و کم بودن نسبی شاخص‌های خطا دارد. همچنین با مقایسه دو گروه مدل اقلیمی چنین بر می‌آید که مدل‌های AR4 و TAR در دوره حال شبیه‌سازی‌های نزدیک به هم و قابل قبولی دارند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که این مدل‌ها توانایی خوبی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حوضه قره‌سو دارند و می‌توان به خروجی‌های آن برای این حوضه اعتماد داشت.

از طرف دیگر باید توجه داشت که گرچه مدل‌های گروه AR4 عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به مدل‌های گروه TAR در شبیه‌سازی الگوی متغیرهای دما و بارش منطقه آشکار می‌سازند ولی این بدان معنی نیست که در شبیه‌سازی دوره‌های آتی نیز همین روند حاکم باشد؛ چراکه برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های گذشته پارامترهای مدل‌های AOGCM به گونه‌ای واسنجی می‌شود که بتواند متغیرهای اقلیمی دوره مشاهداتی را به خوبی شبیه‌سازی کند. این در حالی است که برای دوره‌های آتی گازهای گلخانه‌ای در حکم یک ورودی به مدل AOGCM معرفی می‌شوند. این عمل باعث می‌شود تا واداشت‌های تابش حاصل از این گازها بر دیگر معادلات موجود در مدل تاثیر گذارد. در اینجا است که توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در

ذخیره برگابی، $COEFF$ (mm) حداکثر ضریب نفوذ، SQ کسر نفوذ، $SMSC$ (mm) ظرفیت ذخیره رطوبت خاک، SUB ضریب تناسبی جریان زیرسطحی، $CRAK$ ضریب تناسبی تغذیه آب‌های زیرزمینی و K ضریب جریان پایه است.

در شبیه‌سازی بارش-رواناب روزانه‌ی حوضه قره‌سو با استفاده از مدل SIMHYD، در ابتدا بهترین دوره واسنجی و راستی‌آزمایی در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای به حداقل رساندن خطای شبیه‌سازی انتخاب شد. این انتخاب براساس اجرای مدل در دوره‌های متفاوت و انتخاب دوره با بالاترین ضریب تعیین (Coefficient Of Determination، R^2) (رابطه ۱۸) و پایین‌ترین شاخص‌های خطا شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE, Root Mean Square Error) (رابطه ۱۹) و ضریب اُریبی (Bias) (رابطه ۲۰) بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده صورت گرفت.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs_t} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim_t} - \overline{Q_{sim}})}{\sigma_{obs} \times \sigma_{sim}} \right]^2 \quad (18)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{obs_t} - Q_{sim_t})^2} \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs_t} - Q_{sim_t}) \quad (20)$$

در این روابط Q_{sim} و Q_{obs} به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

۳ نتایج و بحث

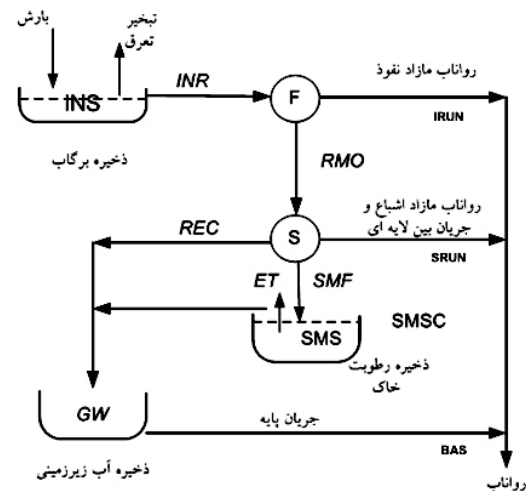
در این قسمت در ابتدا شبیه‌سازی دو گروه مدل اقلیمی در وضعیت کنونی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس به بررسی محدوده تغییرات ماهانه دما و بارش منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ با مقایسه عدم قطعیت مدل‌های AR4 و TAR پرداخته می‌شود. در پی آن با واسنجی کردن مدل بارش-رواناب تاثیر محدوده تغییرات دما و بارش منطقه

داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود مقدار سالانه درازمدت دمای منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه در هر دو طیف مدل AOGCM در حال افزایش و متوسط مقدار آن حدود $2/5^{\circ}\text{C}$ است ولی این مقدار افزایش در ماه‌های گوناگون، متفاوت است.

این در حالی است که دامنه تغییرات حاصل از مدل‌های TAR تقریباً دو برابر مدل‌های AR4 است.

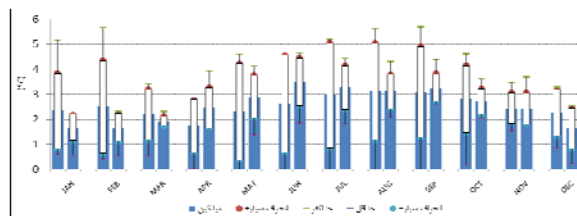
این موضوع بیانگر همگرایی بیشتر مدل‌های گروه AR4 نسبت به مدل‌های گروه TAR در شبیه‌سازی دما است. از طرف دیگر متوسط شبیه‌سازی‌های مدل‌های AR4 افزایش دمای بیشتری را برای تابستان (Jun-July-August) نسبت به مدل‌های گروه TAR نشان می‌دهد. در حالی که این مقدار برای زمستان (Dec-Jan-Feb) بر عکس است (شکل ۴). در فصل پاییز در هر دو طیف مدل متوسط افزایش دمای منطقه یکسان شبیه‌سازی شده است ولی دامنه تغییرات مدل‌های TAR بیشتر از مدل‌های AR4 است.

دوره‌های آبی به منزله مبحثی جدا از توانایی این مدل‌ها برای دوره‌های گذشته مطرح می‌شود.

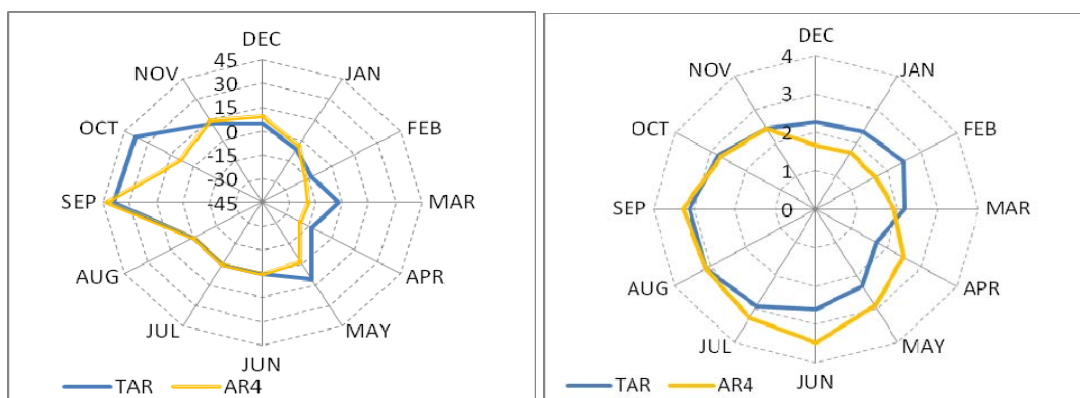


شکل ۲. ساختار مدل SIMHDY در شبیه‌سازی روزانه بارش-رواناب

محدوده تغییرات دما و بارش منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) با میانگین، انحراف از معیار، حداکثر و حداقل تغییرات برای هر دو طیف مدل (AR4 و TAR) در شکل‌های ۳ و ۶ نمایش



شکل ۳. تغییرات ماهانه دما ($^{\circ}\text{C}$) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه توسط مدل‌های TAR (چپ) و AR4 (راست).



شکل ۵. درصد تغییرات درازمدت بارش.

شکل ۴. مقدار تغییرات درازمدت دما ($^{\circ}\text{C}$).

جدول ۳. شاخص‌های عملکرد مدل‌های AOGCM-TAR نسبت به داده‌های مشاهداتی دما و بارندگی ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) متوسط حوضه.

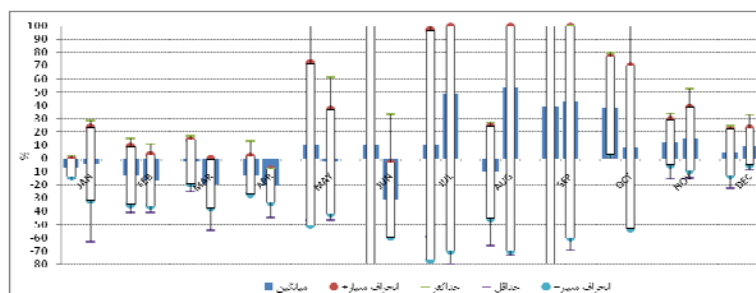
بارش			دما			معیار عملکرد مدل
<i>Bias (mm)</i>	<i>RMSE (mm)</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Bias (°C)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>R² (%)</i>	TAR
۷/۴۸	۷/۲۴	۷۳	۳/۷۵	۱/۲۴	۹۲	CCCma
۲۷/۵۴	۱۱	۹۳	-۴/۹۲	۱/۴۴	۹۱	CCSRNIES
۳۴/۶۴	۱۳/۲۱	۸۳	-۱/۳۹	۰/۶۸	۸۷	CSIRO
۲۱/۳۲	۸/۴۳	۹۱	-۱/۲۲	۰/۶۶	۹۳	ECHAM4
۲۶/۶۹	۱۰/۸۳	۷۷	-۱/۳۴	۰/۹۸	۹۱	GFDL
-۲/۱۲	۳/۹۴	۹۳	۵/۵۷	۱/۶۳	۹۳	HADCM3
۳۰/۲۹	۱۱/۸۱	۸۵	۳/۳۶	۱/۱۳	۹۱	NCARPCM
۲۰/۸۳	۹/۵	۸۴	۰/۵۴	۱/۱	۹۱	میانگین

نسبت به دوره پایه برای منطقه انتظار داشت (شکل ۵).

۱-۳ شبیه‌سازی بارش- رواناب

برای واسنجی مدل SIMHYD از آمار روزانه بارش میانگین حوضه، رواناب مشاهداتی ایستگاه قره باغستان و تبخیر تعرق پتانسیل به‌دست آمده از معادله هارگریوز- سامانی، استفاده شد. دوره (۱۹۷۹/۱/۱) - (۱۹۸۳/۱۲/۳۱) برای واسنجی و دوره (۱۹۸۴/۱/۱) - (۱۹۸۸/۱۲/۳۱) برای راستی‌آزمایی شبیه‌سازی انتخاب شد. شکل‌های ۷ تا ۱۰ عملکرد مدل SIMHYD را در دوره‌های واسنجی و راستی‌آزمایی نشان می‌دهد.

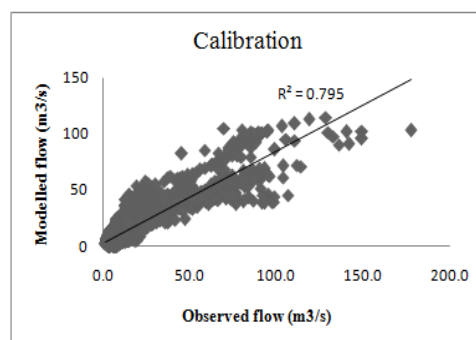
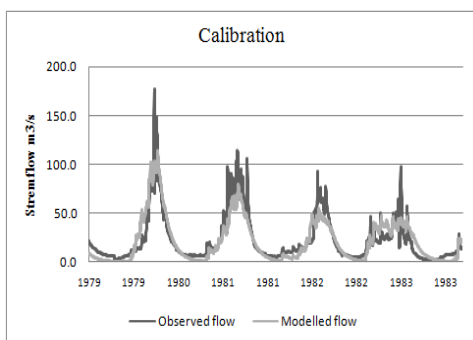
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تغییرات درازمدت بارش منطقه در اکثر ماه‌ها در دوره آتی نسبت به دوره پایه با استفاده از هر دو طیف مدل AOGCM نزدیک به هم برآورد شده است. باید توجه داشت که گرچه تغییرات زیادی در فصل تابستان و ابتدای فصل پاییز با مدل‌ها شبیه‌سازی شده است ولی به دلیل بارش اندک در این فصول این تغییرات قابل اغماض است. به‌طورکلی با توجه به شبیه‌سازی‌های هر دو طیف از مدل‌ها، می‌توان کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی را برای بارش دو ماه آخر زمستان و دو ماه اول بهار و افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی را برای ماه‌های پاییز



شکل ۶. درصد تغییرات ماهانه بارش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه توسط مدل‌های TAR (چپ) و AR4 (راست).

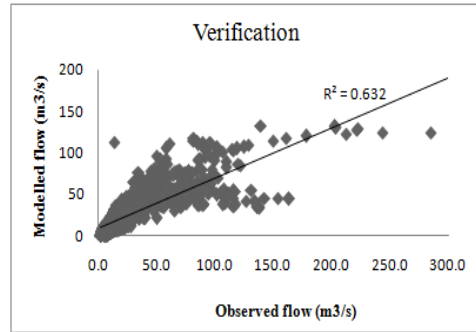
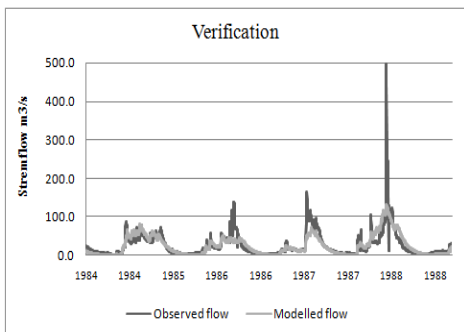
جدول ۴. شاخص‌های عملکرد مدل‌های AOGCM-AR4 نسبت به داده‌های مشاهداتی دما و بارندگی ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) متوسط حوضه.

بارش			دما			معیار عملکرد مدل
<i>Bias (mm)</i>	<i>RMSE (mm)</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Bias (°C)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>R² (%)</i>	AR4
۲۴/۴۶	۹/۷۸	۸۱	۰/۸۸	۰/۴۹	۱۰۰	CCSM3
۹/۲۴	۷/۷۷	۷۰	۴/۲۳	۱/۳۶	۹۹	CGCM3
۱۱/۳۲	۷/۵	۷۶	۲/۴۴	۰/۸۶	۹۹	CSIRO
۳۳/۱۱	۱۲/۴۹	۸۹	-۴/۶۱	۱/۴۱	۹۹	GFDL
۲۱/۳۴	۸/۷۹	۹۲	۰/۱۸	۰/۹۲	۹۹	GISS
-۲/۲۹	۴/۶۹	۸۹	۵/۵۲	۱/۶۱	۱۰۰	HADCM3
۲۱	۸/۳۲	۹۱	-۱/۹	۰/۷	۱۰۰	ECHAM5
۲۳/۸۲	۱۰/۶۹	۷۴	-۳	۱	۹۹	MIRO
۳۱/۸۷	۱۲/۳۸	۸۶	۵	۱/۵۱	۹۹	PCM
۲۰	۹/۲	۸۵	۰/۵۲	۱/۱	۹۹	میانگین



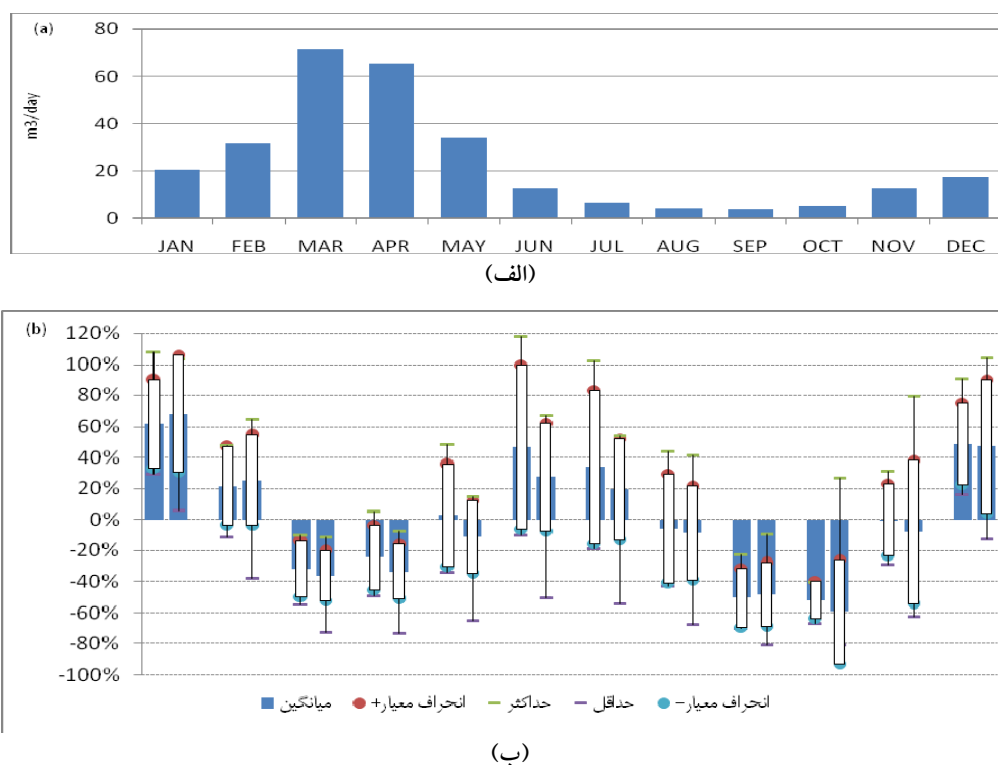
شکل ۸. سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده SIMHYD در دوره واسنجی.

شکل ۷. نمودار پراکندگی عملکرد مدل SIMHYD در دوره واسنجی.



شکل ۱۰. سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده SIMHYD در دوره راستی‌آزمایی.

شکل ۹. نمودار پراکندگی عملکرد مدل SIMHYD در دوره راستی‌آزمایی.



شکل ۱۱. (الف) متوسط ماهانه رواناب در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و (ب) مقایسه درصد تغییرات میانگین بلندمدت رواناب شبیه‌سازی شده تحت خروجی مدل‌های AOGCM-A2 از دو طیف مدل TAR (چپ) و AR4 (راست) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹.

برای منطقه طرح انتظار داشت. این در حالی است که کاهش رواناب برای ماه‌های فصل بهار تا ۴۰ درصد و برای فصل پاییز تا ۶۰ درصد قابل برآورد است.

۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد تا به بررسی تاثیر عدم قطعیت دو طیف متفاوت از مدل‌های AOGCM شامل مدل‌های گروه TAR و مدل‌های گروه AR4 بر رواناب یک حوضه پرداخته شود. بدین منظور در ابتدا خروجی حاصل از ۷ مدل گروه TAR و ۹ مدل گروه AR4 تحت سناریوی انتشار A2 برای حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ کوچک‌مقیاس شدند. با این کار محدوده تغییرات دما و بارش منطقه در دوره آتی نسبت به دوره پایه مشخص شد. سپس مقادیر کوچک‌مقیاس شده به مدل شبیه‌سازی

۲-۳ مقایسه عدم قطعیت مدل‌های TAR و AR4 در شبیه‌سازی رواناب

با معرفی سری‌های زمانی دما و بارش حاصل از ۹ مدل AR4 و ۷ مدل TAR به مدل هیدرولوژی SIMHYD به‌طور جداگانه، سری‌های زمانی رواناب حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تولید شد. شکل ۱۱ تغییرات درازمدت ماهانه رواناب منطقه در دوره آتی را نسبت به دوره پایه با چهار معیار میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که در هر دو طیف از مدل‌های AOGCM، روند تغییرات رواناب در ماه‌های متفاوت سال مشابه است ولی مقدار و دامنه این تغییرات متفاوت است. به‌طور کلی می‌توان افزایش ۲۰ تا ۶۰ درصدی را برای فصل زمستان و افزایش ۲۰ تا ۴۰ درصدی را برای دو ماه اول فصل تابستان

استفاده شود.

منابع

کمال، ع. ر.، و مساح بوانی، ع. ر.، ۱۳۹۰، ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM-AR4 و مدل‌های هیدرولوژی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره‌سو تحت تاثیر تغییر اقلیم، مجله پژوهش آب ایران، سال ۵، شماره ۹، ۵۰-۳۹.

مساح بوانی، ع. ر.، مرید، س.، محمدزاده، م.، و گودس، ک.، ۱۳۸۵، وضعیت آینده اقلیم حوضه زاینده رود تحت تاثیر تغییر اقلیم: مقایسه بین سناریوهای مدل مختلف AOGCM، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب.

Chiew, F. H. S., Peel, M. C., and Western, A. W., 2002, Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In: Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications (Ed. By V. P. Singh & D. K. Frevert), Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA (ISBN 1-887201-35-1), 335-367.

Christensen, N., and Lettenmaier, D. P., 2006, A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin, *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, **3**, 3727-3770.

Gellen, D., and Roulin, E., 1998, Stream flow response of Belgian to IPCC climate change scenarios, *Journal of Hydrology*, **210**, 242-258.

IPCC., 2007, Climate Change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report. The Intergovernmental Panel on Climate Change <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.

IPCC-DDC., 1988, <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>.

IPCC-TGCI.A., 1999, Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, Eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, **1**, 69pp.

Jones, P. D., and Hulme, M., 1996, Calculating regional climatic times series for temperature

بارش - رواناب SIMHYD معرفی شده و محدوده تغییرات رواناب منطقه در دوره آتی نسبت به دوره پایه محاسبه شد.

به‌طور کلی نتایج این تحقیق روشن ساخت که مدل‌های گروه TAR دارای دامنه تغییرات بیشتری نسبت به مدل‌های گروه AR4 در شبیه‌سازی دمای یک منطقه است. همچنین با توجه به مقادیر کمینه و بیشینه دمای شبیه‌سازی شده برای منطقه طرح مشخص شد، مدل‌هایی که مقادیری بیش از سایر مقادیر تولید می‌کنند (داده‌های پرت (Outlier)) در گروه TAR بیش از گروه AR4 است. این در حالی است که مدل‌های هر گروه در شبیه‌سازی بارش منطقه هماهنگی بیشتری با یکدیگر دارند و بنابراین مدل پرت کمتری نسبت به دما به چشم می‌خورد. از طرف دیگر این هماهنگی بین شبیه‌سازی‌های دو گروه نیز وجود دارد و بنابراین دامنه تغییرات هر دو گروه از مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش تفاوت اندکی را با یکدیگر نشان می‌دهد. تفاوت اندک بین شبیه‌سازی‌های بارندگی درون هر گروه و بین دو گروه باعث شده است تا اولاً دامنه تغییرات رواناب ناشی از دو گروه دارای تفاوت کم باشد و ثانیاً برآوردهای پرت نیز در اکثر ماه‌ها مشاهده نشود.

نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، کاهش محدوده تغییرات دما و بارش منطقه در مدل‌های گروه AR4 نسبت به گروه TAR، علی‌رغم به کار بردن ۹ مدل از گروه AR4 در مقابل ۷ مدل از گروه TAR است. این مطلب نشان می‌دهد که روابط استفاده شده در مدل‌های متفاوت AR4 به یکدیگر نزدیک‌اند که این عامل باعث کاهش عدم قطعیت در خروجی‌های این مدل‌های جدید (۲۰۰۷) نسبت به مدل‌های قدیمی‌تر گروه TAR (۲۰۰۱) می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود در صورت در دسترس بودن داده‌ها، برای تحقیقات تاثیر تغییر اقلیم به جای استفاده از مدل‌های گروه TAR از مدل‌های گروه AR4

- and precipitation: methods and illustrations, *International Journal of Climatology*, **16**, 361-377.
- Lane, M. E., Kirshen, P. H., and Vogel, R. M., 1999, Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources, ASCE, *Journal of Water Resource Planning and Management*, **125**(4), 194-204.
- Maurer, E. P., 2007, Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenario, *Climatic Change*, **82**, 309-325.
- Maxino, C. C., McAvaney, B. J., Pitman, A. J., and Perkins, S. E., 2007, Ranking the AR4 climate models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation, *J. Climatol*, **28**, 1097-1112.
- Mitchell, T. D., 2003, Pattern scaling: an examination of accuracy of the technique for describing future climates, *Climatic Change* **60**, 217-242.
- Prudhomme, Ch., Jakob, D., and Svensson, C., 2001, Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments, *Journal of Hydrology*, **277**, 1-23.
- Wilby, R. L., and Harris, I., 2006, A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, **42**, W02419, 10 PP. doi:10.1029/2005WR004065.