



**Investigation of AOGCM Model Uncertainty
and Emission Scenarios of Greenhouse Gases
Impact on the Basin Runoff under Climate
Change, Case study Gharanghu Basin, East
Azerbaijan**

P.S. Ashofteh^{1} and A.R. Massah²*

Abstract

This research was aimed to investigate the changes of runoff considering the uncertainty of AOGCM models and emission scenarios that may occur due to climate change in the period of 2010-2039 (2020s). First, the monthly temperature and precipitation data of AOGCM models (models of TAR reports) were provided for the baseline period (1971-2000) and the future period (2010-2039) under the SRES emission scenarios, namely A2 and B2. Then, these data were spatially and temporally downscaled to Gharanghu basin by proportional and change factor methods. Results showed that the temperature increased and the precipitation decreased in the future compared to the baseline period. The monthly probability distribution function of the temperature and the precipitation in the period of 2020s was constructed using weighting method; comparing observed and modeled temperature and precipitation. A semi- conceptual model (IHACRES) was calibrated for simulation of the monthly runoff of the basin. Using the Monte Carlo approach, 2000 samples of temperature and precipitation were generated by the probability distribution functions and were introduced to IHACRES. Finally 30-year time series of monthly runoff were simulated in 2020s. The results were compared to the baseline result which indicated that the climate change will affect the runoff in the basin.

Keywords: Climate change, Uncertainty, Emission scenario, Monte Carlo, Runoff, Gharanghu Basin.

Received: March 3, 2010
Accepted: October 9, 2012

**بررسی تأثیر عدم قطعیت مدل‌های چرخه عمومی جو و
اقیانوس (AOGCM) و سناریوهای انتشار گازهای
گلخانه‌ای بر رواناب حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم،
مطالعه موردی: حوضه قرنقو، آذربایجان شرقی**

پریسا سادات آشفته^{۱} و علیرضا مساح بوانی^۲*

چکیده

این تحقیق تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قرنقو در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی را با لحاظ نمودن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM^۱ و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، بررسی می‌نماید. ابتدا مقادیر دما و بارش ماهانه هفت مدل AOGCM تحت سناریوهای A2 و B2 در دوره آتی و دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای حوضه، تهیه شده و سپس کوچک مقیاس شدند. نتایج نشان از کاهش بارندگی و افزایش دما در دوره آتی داشته، به‌طوری که دمای حوضه در دوره آتی برای سناریوی A2 بین ۰/۲ تا ۳ و برای B2 بین ۰/۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین حوضه در دوره آتی شاهد افزایش بارندگی برای فصل پاییز و کاهش آن برای فصل تابستان بوده و محدوده تغییرات بارش برای سناریوی A2 بین ۹۳- تا ۱۳۹٪ و برای B2 بین ۶۱- تا ۱۵۷٪ خواهد بود. برای دخالت عدم قطعیت مدل‌های AOGCM، این مدل‌ها وزن‌دهی شدند. با واسنجی مدل IHACRES رابطه بارش - رواناب ماهانه حوضه شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش مونت کارلو تعداد ۲۰۰۰ نمونه از تابع توزیع احتمالاتی ماهانه دما و بارندگی کوچک مقیاس شده حوضه، تولید گردید. با معرفی این مقادیر به IHACRES، ۲۰۰۰ سری رواناب ماهانه در دوره آتی شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهند که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره آتی به میزان ۱/۷۳ برای A2 و ۰/۴۴ متر مکعب بر ثانیه برای B2 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش نشان می‌دهد. این افزایش رواناب برای سناریو A2 بیشتر از سناریوی B2 خواهد بود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، عدم قطعیت، سناریوی انتشار، مونت کارلو، رواناب، حوضه قرنقو

تاریخ دریافت مقاله: ۱۲ اسفند ۱۳۸۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ مهر ۱۳۹۱

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation & Reclamation, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agricultural & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, parisa_ashofteh@yahoo.com

2- Assistant Professor, College of Abureyhan, University of Tehran, Pakdasht, Iran, armassah@yahoo.com

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- استادیار پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران.

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

میانگین دمای سطح زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتباً در حال افزایش است به گونه‌ای که سناریوهای اخیر IPCC^۲ افزایش متوسط جهانی دما را ۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد در قرن گذشته و تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند (IPCC, 2007). این پدیده که به آن تغییر اقلیم اطلاق می‌شود، می‌تواند با احتمال زیاد بر بخش‌های مختلفی تأثیر بگذارد که بخش منابع آب از اصلی‌ترین آنها می‌باشد. از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیانباری برای جوامع بشری داشته باشد، لذا در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد صورت گرفته است. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان جریان‌های کم رودخانه Thames در انگلستان انجام گردید (Wilby and Harris, 2006). در این تحقیق منابع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، روش‌های کوچک مقیاس کردن، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش - رواناب و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای آنها با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف و روش مونت کارلو شبیه‌سازی گردیده است. نتایج نشان داد که عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM بیشترین سهم و سناریوهای گازهای گلخانه‌ای کمترین سهم را در برآورد تابع احتمالاتی رواناب دارند. Steele et al. (2008) تأثیر تغییر اقلیم را بر رواناب با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق که برای ۹ حوضه واقع در کشور ایرلند صورت گرفت، از مدل مفهومی بارش - رواناب HBV-Light برای بررسی وضعیت جریان رودخانه در دوره آتی ۲۰۶۰-۲۰۱۰ استفاده گردید. در ابتدا داده‌های بارش و دمای استخراج شده از مدل ECHAM5 با استفاده از روش کوچک مقیاس کردن مکانی تناسبی، کوچک مقیاس شده و به مدل بارش - رواناب معرفی گردید. نتایج در مجموع نشان دادند که بارش زمستانه و بارش تابستانه به ترتیب افزایش و کاهش دارند. همچنین میزان دبی رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود. در تحقیق دیگری که توسط آشفته (۱۳۸۷) انجام گرفت، تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر دبی پیک حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و برای سناریوی A2 مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از هفت مدل AOGCM استفاده شده بود. نتایج نشان می‌دهند که دمای حوضه در دوره ۲۰۵۰s بین ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش ۸۰- تا ۱۰۰٪ خواهد بود. مقایسه شدت سیلاب‌های نمونه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آتی با وضعیت کنونی آن، نشان داد که دبی پیک حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود. Minville et al. (2008)

به بررسی عدم قطعیت تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کانادا با استفاده از مدل HSAMI پرداخت. در این تحقیق از پنج مدل GCM و دو سناریوی انتشار استفاده شد. نتایج نشان از افزایش ۱ تا ۱۴ درجه‌ای دما و تغییر ۹- تا ۵۵ درصدی بارش فصلی را داد. همچنین میزان رواناب حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود. موارد مشابهی نیز (Christensen et al., 2006, Purkey et al., 2007 و Jiang et al., 2007) به انجام رسیده است.

گرچه تحقیق‌های انجام شده قبلی روش‌های قابل قبولی را به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه ارائه می‌کنند، ولی در اکثر مطالعات، مباحث مربوط به انواع عدم قطعیت که می‌تواند تأثیر بارزی بر نتایج نهایی بگذارد، نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر در تحقیق‌های دیگر علی‌رغم این که سعی شده عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در محاسبات لحاظ شود، اما تمامی مدل‌های AOGCM به کار رفته با وزن یکسان اعمال شده‌اند. در این تحقیق سعی شده است تا علاوه بر لحاظ نمودن تأثیرات عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های AOGCM و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های AOGCM وزن‌دهی شده تا این دو نقیصه با ارائه روشی جدید برطرف گردد.

۲- مواد و روش‌ها

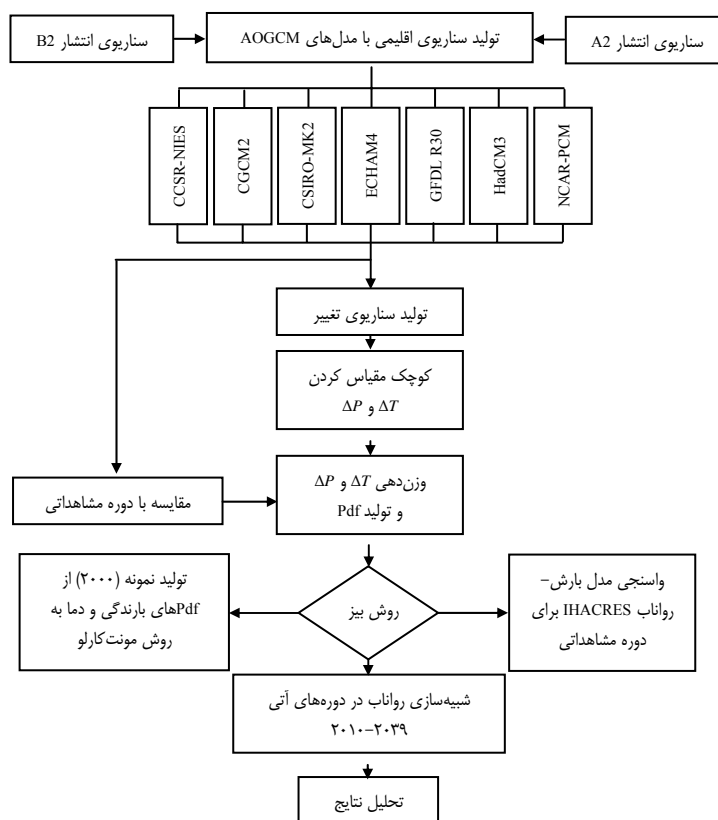
ابتدا منطقه طرح معرفی شده سپس روش‌های مورد نیاز برای تحقیق که شامل تولید سناریوهای تغییر اقلیم (تحت سناریوهای انتشار^۳ A2 و B2)، کوچک مقیاس کردن^۴ خروجی مدل‌های AOGCM، وزن‌دهی مدل‌ها، شبیه‌سازی بارش - رواناب، تحلیل عدم قطعیت و تحلیل نتایج می‌باشد، ارائه می‌شود. مراحل انجام تحقیق در نمودار شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق، حوضه قرنقو است که یکی از زیر حوضه‌های قزل اوزن بوده و در موقعیت جغرافیایی ۲۵°-۴۶° تا ۵۵°-۴۷° طول شرقی و ۵۵°-۳۶° تا ۵°-۳۷° عرض شمالی و در دامنه‌های شرقی کوهستان سهند (استان آذربایجان شرقی) قرار گرفته و دارای وسعت ۳۵۹۰ کیلومتر مربع می‌باشد. قله‌های منفرد متعددی در سطح حوضه پراکنده شده است که کوه بزداغ با ارتفاع ۳۶۰۵ متر، از مرتفع‌ترین آنها بوده و پست‌ترین نقطه آن نیز به ارتفاع ۱۰۴۳ متر، در بخش خروجی حوضه و در نزدیکی شهر میانه قرار گرفته است. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه قرنقو با طول حدود ۱۲۰ کیلومتر و

می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه کل حوضه ۴۰۳/۷ میلی‌متر بوده که از این مقدار به‌طور متوسط ۳۳۲/۶ میلی‌متر تبخیر می‌گردد. با در نظر گرفتن میزان تبخیر و بارش، حجم آب خروجی از حوضه ۲۵۰/۴ میلیون متر مکعب برآورد شده است (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۵). مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه در جدول ۱ آورده شده است.

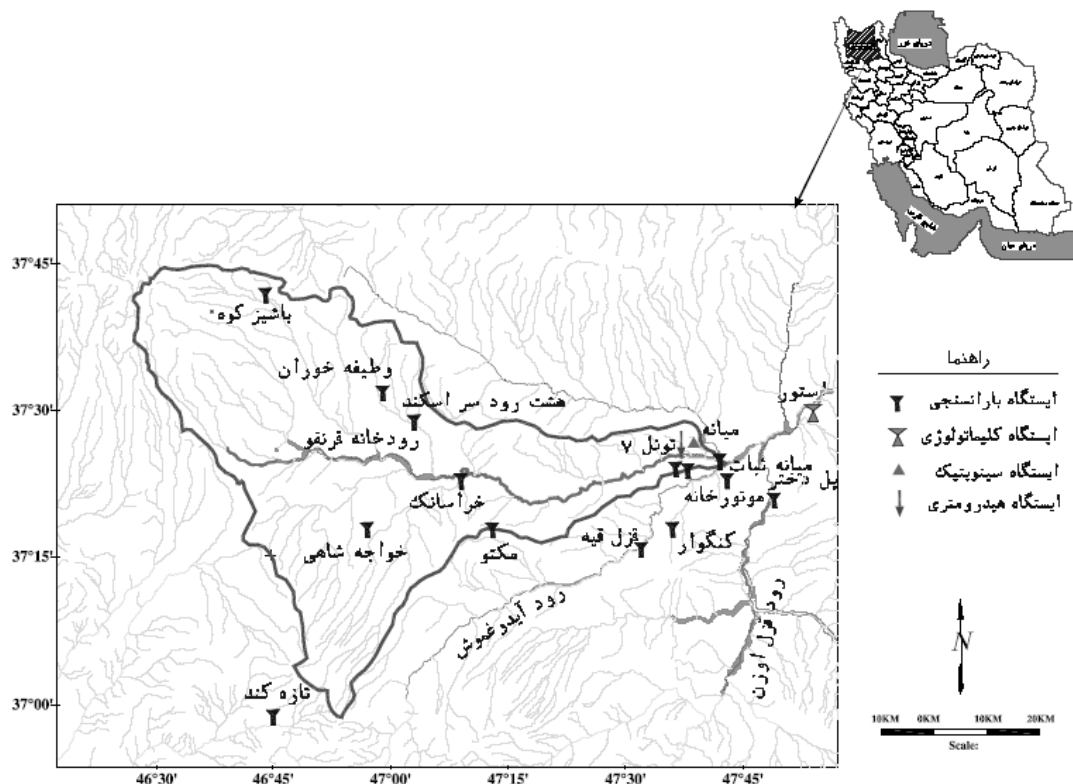
با جهت جریان شرقی- غربی می‌باشد (شکل ۲). اقلیم منطقه متأثر از موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافی محلی است. چرخنده‌های غربی، منبع عمده تزریق رطوبت به محدوده محسوب می‌شوند و با توجه به زمان ورود آنها، ۸۵/۷ درصد بارندگی‌های منطقه طی ماه‌های آبان تا اواخر اردیبهشت و بخش اعظم آن، در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و ۳/۴ درصد آن نیز در فصل تابستان به وقوع می‌پیوندد. ضریب برف‌گیری سالانه حوضه ۲۷ درصد



شکل ۱- نمودار مراحل مختلف انجام تحقیق

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع حوضه (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
وطیفه خوران	باران‌سنجی	۱۷۶۰	۴۶°-۵۹°	۳۷°-۳۲°
میانه ثبات	باران‌سنجی	۱۱۰۰	۴۷°-۴۲°	۳۷°-۲۵°
هشت‌رود سر اسکند	باران‌سنجی	۱۷۵۰	۴۷°-۰۳°	۳۷°-۲۹°
تونل ۷	باران‌سنجی	۱۱۰۰	۴۷°-۳۷°	۳۷°-۲۴°
خواجه‌شاهی	باران‌سنجی	۱۶۰۰	۴۶°-۵۷°	۳۷°-۱۸°
استور	کلیماتولوژی	۱۲۰۰	۴۷°-۵۴°	۴۷°-۳۰°
پل دختر	باران‌سنجی	۱۲۰۰	۴۷°-۴۹°	۳۷°-۲۱°
موتورخانه	باران‌سنجی	۱۰۶۰	۴۷°-۴۳°	۳۷°-۲۳°
تازه کند	باران‌سنجی	۱۸۵۰	۴۶°-۴۵°	۳۶°-۵۹°
کنگوار	باران‌سنجی	۱۳۲۰	۴۷°-۳۶°	۳۷°-۱۸°
قزل قبه	باران‌سنجی	۱۴۹۹	۴۷°-۳۲°	۳۷°-۱۶°
مکتو	باران‌سنجی	۱۶۹۰	۴۷°-۱۳°	۳۷°-۱۸°
میانه	سینوپتیک	۱۲۰۰	۴۷°-۳۸°	۳۷°-۲۴°



شکل ۲- حوزه رودخانه قرنقو و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

۲-۲- تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آتی

معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های AOGCM می‌باشند (Wilby and Harris, 2006). این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی حاکم بر جو که توسط معادله دیفرانسیلی پاره‌ای ارائه می‌شود، استوار هستند. در این تحقیق از خروجی هفت مدل AOGCM شامل CCSR-NIES، CGCM2، CSIRO-MK2، ECHAM4-OPYC3، GFDL-R30، HadCM3 و NCAR DOE PCM استفاده شده است (IPCC-TGCI, 1999). جدول ۲ مشخصات این مدل‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۳- سناریوهای انتشار

از ورودی‌های مورد نیاز مدل‌های AOGCM، مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی می‌باشد. IPCC تاکنون سناریوهای متفاوتی را ارائه نموده که SRES^۵ از جدیدترین آنها می‌باشد. هر کدام از زیر سناریوهای SRES مربوط به یکی از گروه‌های A1، A2، B1 و B2 می‌باشد. در خانواده A2 تأکید بر رسوم خانوادگی، رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت اقتصادی و در خانواده B2 تأکید بر راه حل‌های منطقه‌ای برای تقویت مسائل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیست، با سرعت تغییرات تکنولوژی کمتر، اما با تنوع بیشتر می‌باشد (IPCC, 2007).

جدول ۲- مشخصات مدل‌های AOGCM موجود در سایت IPCC (IPCC-TGCI, 1999)

نام مدل	گروه مؤسس	سناریوی شبیه‌سازی	قدرت تفکیک		مرجع
			اتمسفری	اقیانوسی	
ECHAM4	MPI (Germany)	A2, B2	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	Stendel et al., 2000
HadCM3	HCCPR (UK)	A2, A2b, A2c, B2	$2/5^{\circ} \times 3/75^{\circ}$	$2/5^{\circ} \times 3/75^{\circ}$	Gordon et al., 2000
CSIRO MK2	CSIRO (Australia)	A1, A2, B1, B2	$3/2^{\circ} \times 5/6^{\circ}$	$3/2^{\circ} \times 5/6^{\circ}$	Gordon and O'Farrell., 1997
CGCM2	CCCMA (Canada)	A2, B2	$3/7^{\circ} \times 3/7^{\circ}$	$1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ}$	Flato and Boer., 2001
GFDL-R30	GFDL (USA)	A2, B2	$4/5^{\circ} \times 7/5^{\circ}$	$4/5^{\circ} \times 3/75^{\circ}$	Knutson et al., 1999
NCAR PCM	NCAR (USA)	A2, B2, A1B	$4/5^{\circ} \times 7/5^{\circ}$	$1/0^{\circ} \times 1/0^{\circ}$	Meehl et al., 2001
CCSR NIES	CCSR/NIES (JAPAN)	A1, A1FI, A1T, A2, B1, B2	$5/6^{\circ} \times 5/6^{\circ}$	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	Nozawa et al., 2001

۲-۶- تحلیل عدم قطعیت

در مطالعات تغییر اقلیم، منابع مختلف عدم قطعیت بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد. این منابع شامل عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، عدم قطعیت روش‌های کوچک مقیاس کردن، عدم قطعیت مربوط به سناریوهای مختلف انتشار و عدم قطعیت در روش شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. در این تحقیق در نظر است تا تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و همچنین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای بر رواناب حوضه محاسبه گردد. برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها از رویکرد بیزی^۸ استفاده خواهد شد. مراحل این رویکرد عبارتند از: (۱) تولید توزیع احتمالاتی پیشین^۹ برای پارامترهای آماری، (۲) تعیین تابع درست‌نمایی احتمالاتی^{۱۰} داده‌های مشاهداتی به‌عنوان تابعی از پارامترها و (۳) تعیین توزیع احتمالاتی پسین^{۱۱} یک سیستم. توزیع احتمالاتی پسین بر اساس توزیع‌های پارامترهای ورودی (توزیع پیشین) و تابع احتمالاتی تعیین می‌گردد (Katz, 2002).

بنابراین با لحاظ نمودن رویکرد بیزی لازم است در ابتدا تابع توزیع احتمالاتی^{۱۲} سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی محاسبه شود. برای این کار هر یک از مدل‌ها، براساس مقدار انحراف میانگین دما و بارندگی شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند. روش وزن‌دهی مذکور، روش میانگین مشاهداتی دما و بارندگی^{۱۳} نام دارد که توسط مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵ ب) ارائه شده و طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$R_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{B_{x,i}}} \quad (5)$$

در این رابطه $B_{x,i}$ انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌های AOGCM در دوره پایه در ماه (x) از میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد مدل‌های AOGCM و R_i وزن داده شده به هر یک از این مدل‌ها (i) می‌باشد.

در این تحقیق، با استفاده از روابط (۱) و (۲) و همچنین براساس وزن‌دهی مدل‌ها توسط رابطه (۵) با کمک نرم‌افزار SIMLAB (Giglioli and Saltelli, 2003)، توابع توزیع چگالی احتمال تولید می‌گردد. پس از مشخص شدن pdfهای سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی ماهانه می‌توان با استفاده از روش مونت کارلو و تولید نمونه‌های زیاد (مثلاً ۲۰۰۰ نمونه)، تأثیر این عدم قطعیت را بر رواناب رودخانه محاسبه کرد.

به‌دلیل انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای در خانواده A2 و B2، در این تحقیق از این سناریوها استفاده می‌شود.

۲-۴- تولید سناریوی تغییر اقلیم^۶

به‌منظور حذف نوفه^۷ در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM (جدول ۲)، معمولاً به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های مدل در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای ۳۰ ساله این داده‌ها استفاده می‌شود (روابط (۱) و (۲)) (Jones and Hulme, 1996):

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق ΔT_i و ΔP_i به‌ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای متوسط درازمدت ۳۰ ساله برای هر ماه $(1 \leq i \leq 12)$ $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ متوسط ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا ۲۰۳۹-۲۰۱۰)، $\bar{T}_{GCM, base, i}$ متوسط ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM, fut, i}$ متوسط ۳۰ ساله بارندگی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM, base, i}$ متوسط ۳۰ ساله بارندگی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه می‌باشد.

۲-۵- کوچک مقیاس کردن

به‌منظور کوچک مقیاس کردن داده‌های طرح به لحاظ مکانی از روش تناسبی استفاده می‌شود. در این روش، متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه مورد مطالعه در آن قرار می‌گیرد (روابط (۳) و (۴)) (Wilby and Harris, 2006):

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (3)$$

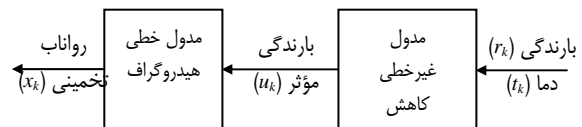
$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (4)$$

در رابطه (۳)، T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (ماهانه) در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰)، T سری زمانی دما حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۳۹-۲۰۱۰) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده دما می‌باشد. در رابطه (۴)، P_{obs} بیانگر سری زمانی بارندگی مشاهداتی (ماهانه) در دوره پایه، P سری زمانی بارندگی حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی و ΔP سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده بارندگی می‌باشد.

۷-۲- شبیه‌سازی بارش- رواناب

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده الگوریتمی که Jakeman and Hornberger (1993) برای شبیه‌سازی بارش- رواناب ارائه کرده است، با توجه به ورودی‌های مورد نیاز و قوام علمی لازم، مناسب تشخیص داده شد. از منطق بارش- رواناب شبیه‌سازی شده در مدل IHACRES استفاده شد و در فرتن براساس این منطق برنامه‌نویسی شد. اساس این روش که در شکل ۳ ارائه شده از دو مدول غیر خطی تلفات^{۱۴} و مدول خطی هیدروگراف واحد^{۱۵} تشکیل می‌شود. بدین شکل که در ابتدا بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی موثر u_k تبدیل شده و سپس به‌وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود.

برای واسنجی مدل برای حوضه از داده‌های مشاهداتی دما و بارش و دبی ماهانه حوضه قرنقو در دوره پایه استفاده گردید. پس از آن، ۲۰۰۰ سری از سری‌های زمانی دما و بارش تولید شده به‌وسیله روش مونت کارلو برای دوره ۲۰۲۰s به مدل IHACRES معرفی شده و تعداد ۲۰۰۰ سری زمانی رواناب ماهانه تولید گردید.



شکل ۳- شبیه‌سازی بارش- رواناب در روش Jakeman and Hornberger (1993)

۸-۲- تجزیه و تحلیل رواناب

به‌منظور برآورد رواناب رودخانه در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و تحت سناریوهای A2 و B2، متوسط رواناب ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) برای ۲۰۰۰ نمونه در دوره آتی با متوسط رواناب ماهانه دوره مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی دما و بارندگی حوضه قرنقو در دوره (۲۰۰۰-۱۹۷۱)

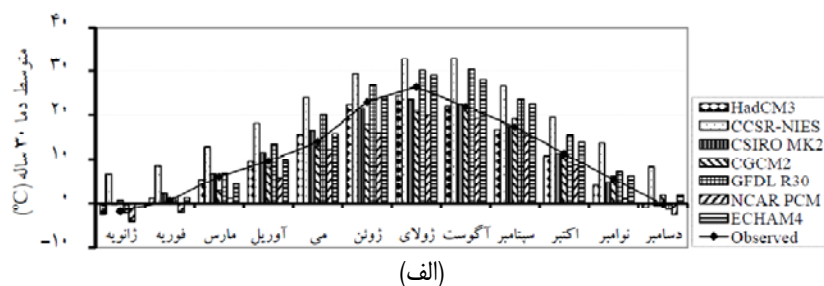
در ابتدا به کمک داده‌های دما و بارش ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی حوضه قرنقو در جدول ۱، سری زمانی متوسط حوضه محاسبه گردید. سپس فایل داده‌های ماهانه دما و بارندگی مدل‌های AOGCM از سایت IPCC در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ (به‌دلیل آن‌که ایستگاه‌های موجود در حوضه داده‌های این دوره را پوشش می‌دهند، لذا این دوره

به‌عنوان دوره پایه انتخاب شد) تهیه گردید (IPCC-DDC, 1988). در این تحقیق از برنامه (GCM-RDP)^{۱۶} که توسط مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵ ب) ارائه گردیده، استفاده شده که می‌تواند پس از وارد کردن مختصات مکانی مورد نظر و طول دوره آماری مورد نیاز، سری زمانی متغیر اقلیمی مربوط به سلولی که منطقه مورد مطالعه در آن واقع شده را استخراج نماید (مساح بوانی و همکاران، ۱۳۸۵ ب). پس از آن، میانگین ۳۰ ساله (۲۰۰۰-۱۹۷۱) ماهانه دما و بارندگی سلول مذکور از مدل فوق محاسبه شد. نهایتاً این مقادیر با میانگین ۳۰ ساله ماهانه دما و بارندگی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۴ و ۵، مقایسه بین داده‌های مدل‌های AOGCM و داده‌های مشاهداتی را برای بارش و دما برای دو سناریوی A2 و B2 نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل‌های AOGCM در تخمین میانگین درازمدت دما و بارش ماهانه منطقه با یکدیگر تطابق نداشته که این خود نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت در خروجی این مدل‌ها می‌باشد. وجود عدم قطعیت در مدل‌های مختلف AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای توسط تحقیقات دیگر نیز به اثبات رسیده است (مساح بوانی و همکاران، ۱۳۸۵ الف؛ قربانی واقعی و همکاران، ۱۳۸۷؛ Wilby and New and Hulme, 2000؛ Harris, 2006). در ادامه به‌منظور بررسی عملکرد مدل‌ها، از معیارهای عملکرد ضریب همبستگی^{۱۷} (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۱۸} و میانگین خطای مطلق (MAE)^{۱۹} استفاده شد.

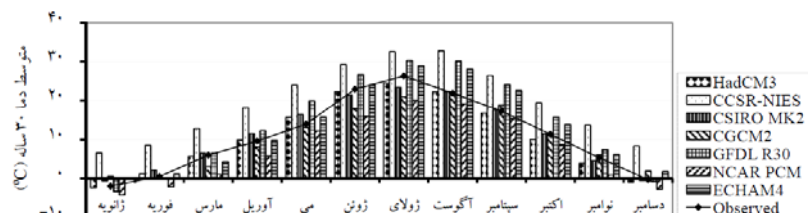
اکثر مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دمای منطقه با ضریب همبستگی بالا و خطای کم می‌باشند (جدول ۳). در میان این مدل‌ها، مدل HadCM3 دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی دما می‌باشد. این در حالی است که شاخص‌های عملکرد، حاکی از توانایی کمتر مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش نسبت به دما دارد. در این میان، مدل‌های GFDL R30 و HadCM3 دارای بهترین عملکرد و مدل NCAR DOE PCM دارای کمترین عملکرد در شبیه‌سازی بارندگی می‌باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که به‌دلیل پایین بودن عملکرد مدل NCAR DOE PCM در شبیه‌سازی بارندگی حوضه قرنقو، از دخالت دادن داده‌های دما و بارش این مدل در محاسبات آتی صرف‌نظر گردید.

۳-۲- محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی حوضه در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰

ابتدا سری زمانی دما و بارش ماهانه شش مدل AOGCM (مدل‌های جدول ۳ به غیر از مدل NCAR DOE PCM) تحت سناریوی A2 و B2 تهیه و برای منطقه طرح، کوچک مقیاس شد.

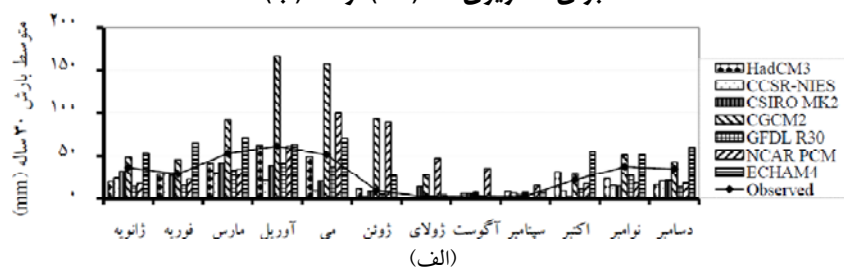


(الف)

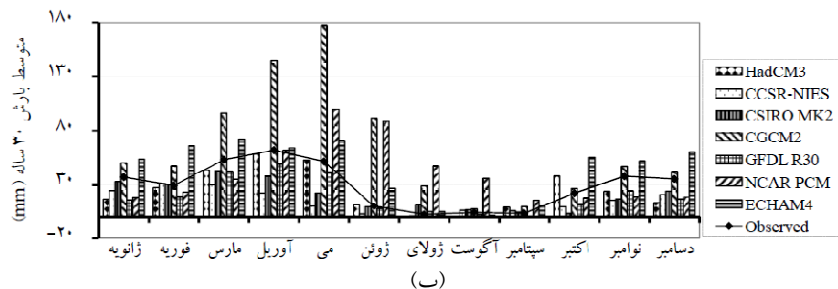


(ب)

شکل ۴- میانگین ۳۰ ساله ماهانه دمای مشاهده‌ای متوسط حوضه و مدل‌های مختلف AOGCM برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)



(الف)



(ب)

شکل ۵- میانگین ۳۰ ساله ماهانه بارندگی مشاهده‌ای متوسط حوضه و مدل‌های مختلف AOGCM برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)

جدول ۳- شاخص‌های عملکرد مدل‌های AOGCM نسبت به داده‌های مشاهداتی

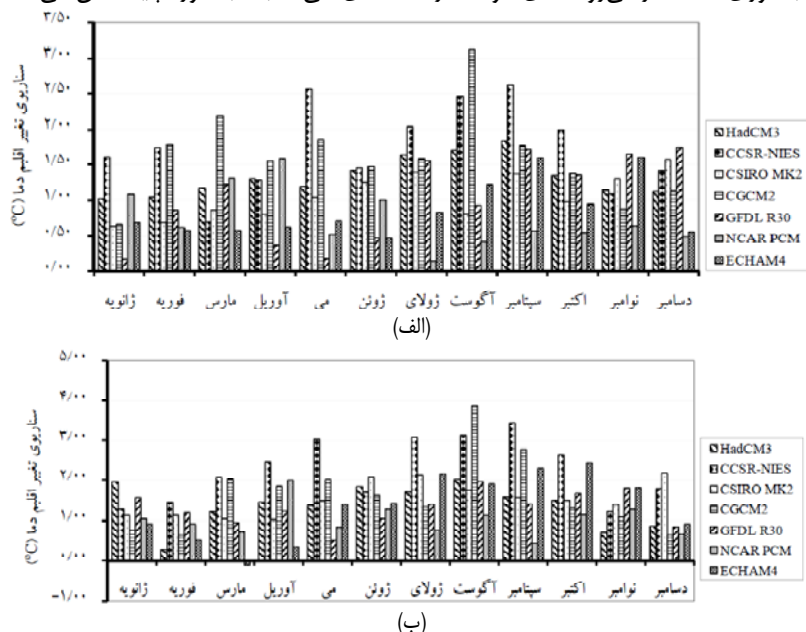
بارندگی			دما			متغیر اقلیمی
MAE (mm)	RMSE (mm)	r (%)	MAE (°C)	RMSE (°C)	r (%)	معیار عملکرد
۷/۱۶	۹/۴۳	۹۰/۰	۰/۸۲	۰/۹۹	۹۹/۵	مدل
۱۵/۰۲	۲۰/۱۶	۷۰/۰	۸/۳۰	۸/۴۰	۹۹/۰	HadCM3
۱۱/۹۰	۱۵/۳۰	۸۰/۰	۱/۲۲	۱/۵۰	۹۸/۹	CCSR-NIES
۳۵/۲۹	۵۱/۶۹	۷۷/۰	۲/۰۴	۲/۶۳	۹۶/۸	CSIRO MK2
۱۱/۶۶	۱۳/۸۲	۹۶/۰	۳/۴۳	۴/۲۳	۹۸/۹	CGCM2
۲۴/۷۵	۳۲/۸۶	۱۸/۰	۳/۵۶	۳/۹۳	۹۸/۵	GFDL R30
۱۶/۰۱	۱۹/۳۹	۸۹/۰	۲/۲۳	۲/۸۳	۹۸/۵	NCAR DOE PCM
						ECHAM4-OPYC3

دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ برای سناریوی A2 بین ۰/۲ تا ۳ و برای B2 بین ۰/۳ تا ۴ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل CCSR-NIES در اکثر ماه‌ها، دمای آبی بیشتری را نسبت به دوره پایه در هر دو سناریو نشان می‌دهد.

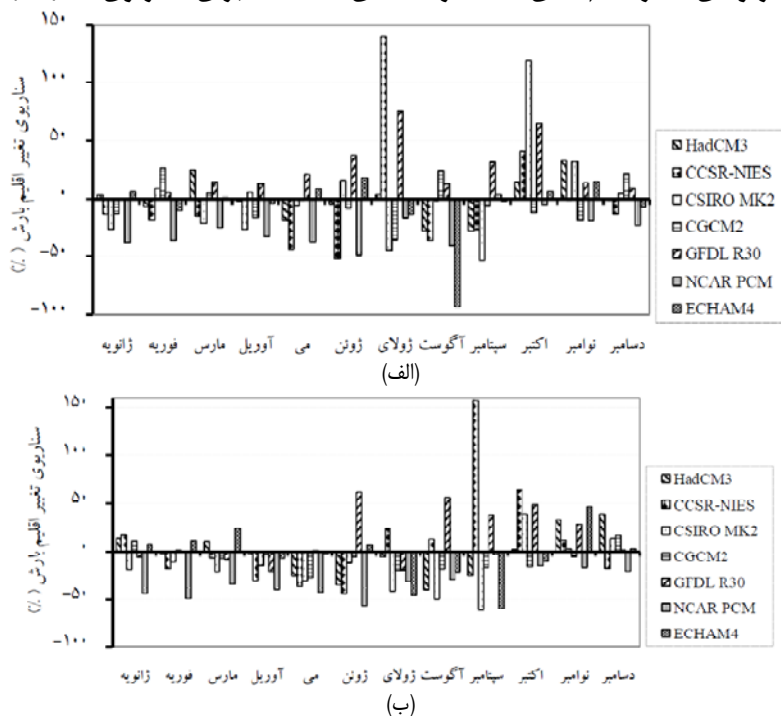
همچنین مدل ECHAM4 برای سناریوی A2 و مدل GFDL-R30 برای سناریوی B2، در اغلب ماه‌ها کمترین افزایش را برای دمای آبی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. از طرف دیگر همانطور

سپس متوسط درازمدت دما و بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل (۱۹۷۱-۲۰۰۰) محاسبه گردید. نهایتاً با استفاده از روابط (۱) و (۲) سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی منطقه برای سناریوی A2 و B2 محاسبه شده که نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

تمامی مدل‌ها دمای بیشتری را برای دوره آبی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند (شکل ۶). به‌طوری که انتظار می‌رود دمای حوضه در

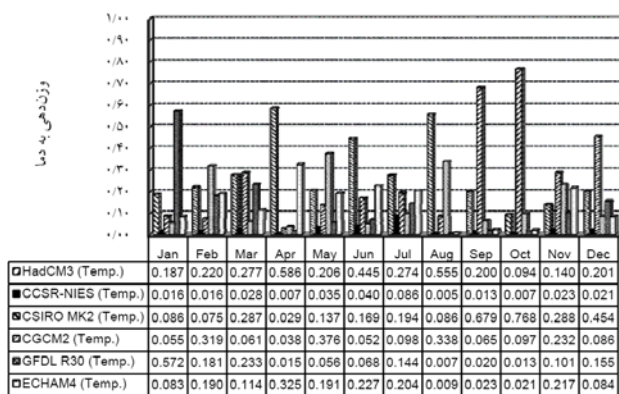


شکل ۶- سناریوهای تغییر اقلیم دمای حاصل از مدل‌های AOGCM برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)

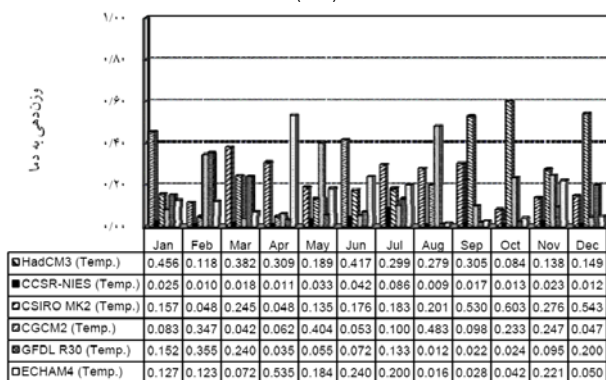


شکل ۷- سناریوهای تغییر اقلیم بارش حاصل از مدل‌های AOGCM برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)

۱۹۷۱-۲۰۰۰ استفاده گردید. در این دوره، سال‌های مختلف برای واسنجی مدل مورد آزمون قرار گرفت. نتایج (شکل ۱۰ الف)) نشان داد که دوره ۱۹۷۱-۱۹۹۰ (اول ژانویه ۱۹۷۱ تا اول دسامبر ۱۹۹۰) با ضریب همبستگی (r) ۰/۷۲ و معیار خطای (RMSE) ۱۷/۷۱ بهترین عملکرد را داشته است. پس از واسنجی مدل، دوره ۱۹۹۱-۲۰۰۰ (اول ژانویه ۱۹۹۱ تا اول دسامبر ۲۰۰۰) برای صحت‌یابی مدل استفاده گردید. نتایج (شکل ۱۰ ب)) نشان از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۸- وزن دهی به مدل‌های مختلف AOGCM برای متغیر دما برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)

۳-۵- بررسی رواناب حوضه در دوره آتی

پس از واسنجی مدل برای هر یک از سناریوهای A2 و B2، تعداد ۲۰۰۰ سری رواناب ماهانه حوضه برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ برای نمونه‌های دما و بارش تولید شده از مراحل قبل، شبیه‌سازی گردید. سپس متوسط رواناب ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) برای ۲۰۰۰ نمونه در دوره آتی با متوسط رواناب ماهانه دوره مشاهداتی در دو سناریوی فوق مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه گردیده است.

که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مدل‌های مختلف در تخمین میزان تغییر بارش دوره آتی نسبت به پایه هماهنگ نبوده و برخی از مدل‌ها بارش دوره آتی را نسبت به دوره پایه بیشتر و برخی نیز کمتر نشان می‌دهند. با این وجود می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی حوضه، در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ شاهد افزایش بارندگی عمدتاً برای فصل پاییز و کاهش آن برای فصل تابستان بوده و همچنین محدوده تغییرات بارش برای سناریوی A2 بین ۹۳- تا ۱۳۹٪ و برای سناریوی B2 بین ۶۱- تا ۱۵۷٪ خواهد بود. در این میان مدل CCSR-NIES در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای بیشترین دامنه نوسان میزان بارش آتی نسبت به پایه بوده و مدل‌های HadCM3 و CGCM2 دارای کمترین دامنه نوسان برای سناریوی A2 و مدل CGCM2 دارای کمترین دامنه نوسان برای B2 می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، گرچه مدل CGCM2 در دوره پایه بارشی بیشتر از مشاهداتی تولید کرده ولی در دوره آتی نسبت به سایر مدل‌ها تغییرات کمتری برای بارش در نظر دارد.

۳-۳- تحلیل عدم قطعیت

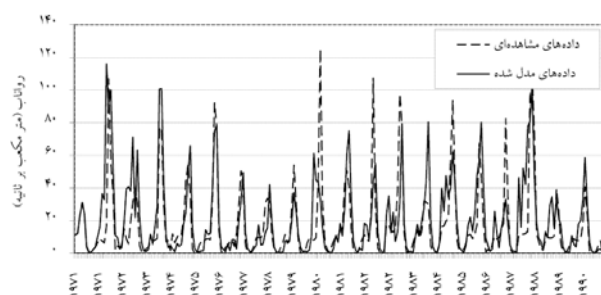
به‌منظور تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، لازم است تا پس از تعیین محدوده‌های سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی ماهانه، هر یک از سناریوها براساس روش میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (رابطه (۵)) وزن دهی شده و pdfهای ماهانه این دو متغیر محاسبه شوند. مقادیر وزن دهی برای متغیرهای دما و بارش در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

مدل HadCM3 نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین وزن را برای هر دو متغیر دما و بارش در هر دو سناریو A2 و B2 به خود اختصاص داده است. همچنین مدل CCSR-NIES کمترین وزن را برای دما و مدل CGCM2 کمترین وزن را برای بارش در سناریوهای A2 و B2 اختیار کرده است. بنابراین مدل HadCM3 می‌تواند بیشترین تأثیر را بر بارش و دما و نهایتاً بر رواناب منطقه طرح داشته باشد. پس از مشخص شدن pdfهای سناریوهای تغییر اقلیم منطقه طرح، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، به تعداد مناسب (۲۰۰۰ عدد) سناریوی تغییر اقلیم دما و بارندگی از هر pdf انتخاب شد. سپس با استفاده از روابط (۳) و (۴)، ۲۰۰۰ سری زمانی ماهانه دما و بارندگی برای حوضه محاسبه گردید.

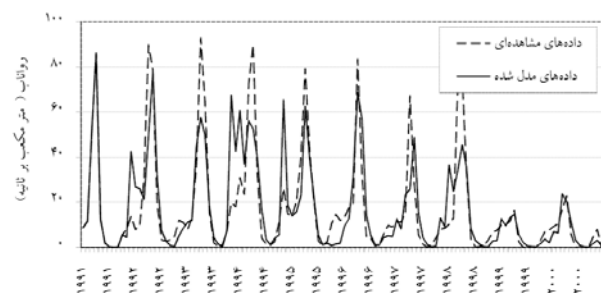
۳-۴- شبیه‌سازی بارش- رواناب

به‌منظور واسنجی و صحت‌یابی مدل IHACRES، از آمار ماهانه دما و بارش متوسط حوضه و آمار دبی ماهانه ایستگاه تونل ۷ در دوره

جریان را نیز در بر خواهد گرفت که این مهم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



(الف)



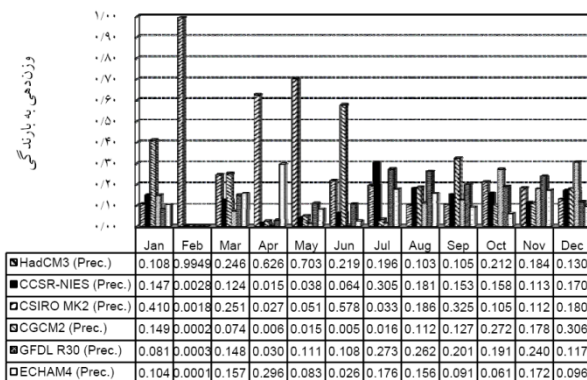
(ب)

شکل ۱۰- مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه با رواناب مدل شده در دوره واسنجی (الف) و صحت‌یابی (ب)

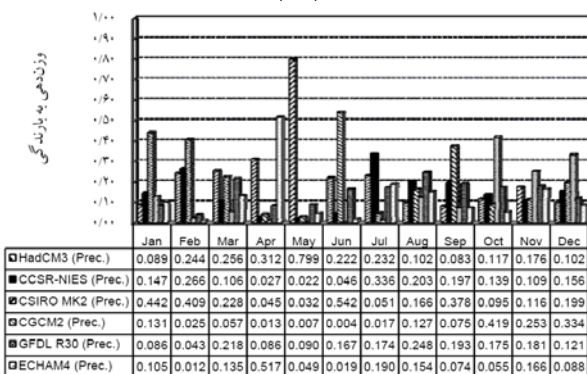
جدول ۴- پارامترهای آماری سالانه دبی تحت سناریوهای A2

و B2

دوره	پارامتر آماری	دبی (m ³ /s)	دبی (m ³ /s)
۱۹۷۱-۲۰۰۰	میانگین	۱۷/۳۲	۱۷/۳۲
	انحراف معیار	۱۹/۵۷	۱۹/۵۷
	ضریب تغییرات	۱۱۲/۹۹	۱۱۲/۹۹
سناریو			
۲۰۱۰-۲۰۳۹	میانگین	۱۷/۷۶	۱۹/۰۵
	انحراف معیار	۱۴/۴۲	۱۵/۷۵
	ضریب تغییرات	۸۱/۱۹	۸۲/۶۸



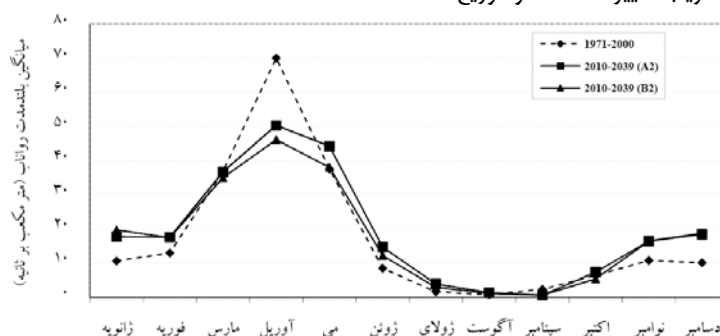
(الف)



(ب)

شکل ۹- وزن‌دهی به مدل‌های مختلف AOGCM برای متغیر بارندگی برای سناریوی A2 (الف) و B2 (ب)

همچنین نتایج نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ به میزان ۱/۷۳ متر مکعب بر ثانیه در A2 و ۰/۴۴ متر مکعب بر ثانیه در B2 نسبت به دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ افزایش نشان می‌دهد (جدول ۴). این افزایش رواناب در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ برای سناریو A2 بیشتر از سناریوی B2 خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان ضریب تغییرات دبی نیز در دوره‌های آبی کاهش خواهد یافت. به‌گونه‌ای که میزان کاهش آن در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ نسبت به دوره مشاهداتی برای سناریوهای A2 و B2 به‌ترتیب برابر ۲۶/۸ و ۲۸/۱ درصد می‌باشد. از طرف دیگر تغییرات جریان، محدود به میانگین و ضریب تغییرات نشده و توزیع سالانه



شکل ۱۱- میانگین درازمدت ماهانه رواناب، طی دوره مشاهده شده و دوره‌های تغییرات اقلیمی سناریوی A2 و B2

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه قرنقو واقع در استان آذربایجان شرقی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های مختلف AOGCM و تحت سناریوهای A2 و B2 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

- با بررسی سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی از داده‌های مدل‌های AOGCM نشان می‌دهد که دمای حوضه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ برای سناریوی A2 بین ۰/۲ تا ۳ و برای B2 بین ۰/۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. این در حالی است که حوضه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ شاهد افزایش بارندگی عمدتاً برای فصل پاییز و کاهش آن برای فصل تابستان بوده و همچنین محدوده تغییرات بارش برای سناریوی A2 بین ۹۳- تا ۱۳۹٪ و برای سناریوی B2 بین ۶۱- تا ۱۵۷٪ خواهد بود.

- نتایج حاصل از وزن‌دهی مدل‌های AOGCM نشان داد که مدل HadCM3 بیشترین وزن را در شبیه‌سازی متغیر دما و بارش برای دو سناریوی A2 و B2 دارا می‌باشد.

- پس از وزن‌دهی مدل‌ها با استفاده از روش مونت کارلو ۲۰۰۰ نمونه از pdfهای ماهانه دما و بارندگی تولید و ضمن معرفی به مدل IHACRES، ۲۰۰۰ سری رواناب ماهانه برای حوضه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره آبی به میزان ۱/۷۳ متر مکعب بر ثانیه در A2 و ۰/۴۴ متر مکعب بر ثانیه در B2 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش نشان می‌دهد. این افزایش رواناب برای سناریو A2 بیشتر از سناریوی B2 خواهد بود. همچنین میزان ضریب تغییرات دبی نیز در دوره‌های آبی کاهش خواهد یافت. به‌گونه‌ای که میزان کاهش آن در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی برای سناریوهای A2 و B2 به‌ترتیب برابر ۲۶/۸ و ۲۸/۱ درصد می‌باشد.

به‌طور کلی در این تحقیق یک روش جدید برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب یک حوضه با لحاظ کردن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM (به‌وسیله وزن‌دهی آن‌ها) و سناریوهای A2 و B2 ارائه شده است. در این تحقیق عدم قطعیت مربوط به روش‌های مختلف کوچک مقیاس کردن در محاسبات لحاظ نگردیده است. این امر می‌تواند بر محدوده تغییرات رواناب تأثیرگذار باشد. لحاظ کردن این منبع عدم قطعیت به همراه عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM و ارائه روش‌های وزن‌دهی دیگر برای منابع عدم قطعیت

احتیاج به ارائه یک متدولوژی جدید دارد که محقق این مقاله در حال تحقیق در این زمینه می‌باشند.

پی نوشت‌ها

- 1- Atmospheric- Ocean General Circulation Model
- 2- Intergovernmental Panel of Climate Change
- 3- Emission Scenarios
- 4- Downscaling
- 5- Special Report on Emission Scenarios
- 6- Climate Change Scenario
- 7- Noise
- 8- Bayesian Approach
- 9- Prior Probability Distribution
- 10- Likelihood
- 11- Posterior Probability Distribution
- 12- Probability Distribution Function
- 13- Mean Observed Temperature-Precipitation
- 14- Non- Linear Loss Module
- 15- Linear Unit Hydrograph Module
- 16- GCM- Retrieve Data Program
- 17- Coefficient of Correlation
- 18- Root Mean Square Error
- 19- Mean Absolute Error

۵- مراجع

آشفته، پ.، (۱۳۸۷)، "آنالیز عدم قطعیت تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب با رویکرد بیزی؛ مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه تهران.

قربانی واقعی، ح. مساح بوانی، ع. ر. و بهرامی، ح.، (۱۳۸۷)، "ارزیابی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی بندرانزلی"، سومین کنفرانس منابع آب ایران، ۲۳ تا ۲۵ مهر ماه ۱۳۸۷، تبریز.

مهندسین مشاور یکم، (۱۳۸۵)، "گزارش هواشناسی مطالعات طراحی کشاورزی آیدوغموش".

مساح بوانی، ع. مرید، س. و محمد زاده، م.، (۱۳۸۵ الف)، "وضعیت آینده اقلیم حوضه زاینده‌رود تحت تأثیر تغییر اقلیم: مقایسه‌ای بین سناریوهای مدل‌های مختلف AOGCM"، دومین کنفرانس منابع آب ایران، ۳ و ۴ بهمن ماه ۱۳۸۵، اصفهان.

مساح بوانی، ع. و مرید، س. و محمد زاده، م.، (۱۳۸۵ ب)، "بررسی تأثیر عدم قطعیت در توزیع تجمعی احتمالاتی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم"، دومین کنفرانس منابع آب ایران، ۳ و ۴ بهمن ماه ۱۳۸۵، اصفهان.

- Katz, R.W., (2002), "Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies," *Climate Research*, 20: pp. 167-185.
- Jones, P.D. and Hulme, M., (1996), "Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations," *International Journal of Climatology*, 16(4), pp. 361-377.
- Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R., (2008), "Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed," *Journal of Hydrology*, 358: pp. 70-83.
- New, M. and Hulme, M., (2000), "Representing uncertainty in climate change scenario: a Monte-Carlo approach," *Integrated Assessment*, 1: pp. 203-213.
- Purkey, D.R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M.W., Dale, L.L., Yates, D. and Dracup, J.A., (2007), "Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley," *Climatic Change*, 87: pp. 109-122.
- Steele- Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, Sh., Hanafin, J. and Nolan, P., (2008), "The impacts of climate change on hydrology in Ireland," *Journal of Hydrology*, 356(1-2), pp. 28-45.
- 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(2), pp. 1-10.
- 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(6), pp. 3727-3770.
- Giglioli, N. and Saltelli, A., (2003), Simlab 2.2, Software for sensitivity and uncertainty analysis. *Simlab Manual*, Joint Research Centre European Commission.
- IPCC-DDC, (1988). <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>.
- IPCC-TGCI, (1999), *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
- IPCC, (2007), "Climate Change 2007: The Physical Science Basis," *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 996.
- Jakeman, A.J. and Hornberger, G.M., (1993), "How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?," *Water Resources Research*, 29(8), pp. 2637-2649.
- Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, Ch., Chen, Xi. and Singh, V.P., (2007), "Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China," *Journal of Hydrology*, 336: pp. 316-333.