



Uncertainty of Climate Change Impact on the
Flood Regime
Case Study: Aidoghmoush Basin, East
Azerbaijan, Iran

P. Ashofteh^{1*} and A.R. Massah²

Abstract

This research was aimed to investigate the changes of flood magnitude and frequency considering the uncertainty of AOGCM models that may occur due to the climate change predicted for the time period of 2040-2069. At first, monthly temperature and precipitation data of AOGCM models (models of TAR reports) were provided in the baseline period (1971-2000) and the target period (2040-2069) under the SRES emission scenario, namely A2. Then, these data downscaled spatially and temporally to Aidoghmoush Basin by proportional and change factor methods. Results showed temperature increase and precipitation variation in the target period compared to the baseline period. Monthly probability distribution function of temperature and precipitation in the period of 2040-2069 was constructed by weighting method; comparing observed and modeled temperature-precipitation. A semi- conceptual model (IHACRES) for simulation of daily runoff was calibrated for the basin. Using the Monte Carlo approach 2000 samples of temperature and precipitation were sampled from probability distribution functions and introduced to IHACRES. Finally 2000 series of daily runoff were simulated for the target period. Theoretical probability distribution was fitted to maximum annual flood series and the flood regime of the target period was compared to that of the baseline. Results indicated that the climate change will affect the flood regime of the basin.

Keywords: Climate Change, Uncertainty, Monte Carlo, Flood, Aidoghmoush basin.

تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب
مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی

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

چکیده

تحقیق حاضر تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM مورد بررسی قرار می‌دهد. ابتدا مقادیر دما و بارندگی ماهانه هفت مدل AOGCM (مدل‌های گزارش TAR) تحت سناریوی A2 در دوره آتی و دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای حوضه تهیه گردید. سپس این مقادیر با روش کوچک مقیاس کردن مکانی و زمانی کوچک مقیاس شدند. نتایج نشان از افزایش ۱ تا ۶ درجه‌ای دما و تغییرات ۸۰- تا ۱۰۰ درصدی بارندگی دوره ۲۰۵۰s نسبت به دوره مشاهداتی دارد. سپس توزیع‌های احتمالاتی (pdf) ماهانه دما و بارش منطقه برای دوره ۲۰۵۰s به‌وسیله وزن‌دهی مدل‌های AOGCM با استفاده از روش Mean Observed Temperature Precipitation تولید گردید. در ادامه با واسنجی مدل IHACRES رابطه بارش- رواناب روزانه حوضه شبیه‌سازی گردید. سپس با استفاده از روش مونت کارلو تعداد ۲۰۰۰ نمونه از pdfهای ماهانه دما و بارندگی کوچک مقیاس شده حوضه تولید گردید. این مقادیر به مدل IHACRES معرفی شده و ۲۰۰۰ سری رواناب روزانه برای حوضه در دوره ۲۰۵۰s شبیه‌سازی گردید. سپس سیلاب حداکثر سالانه هر نمونه محاسبه شده و توزیع احتمالاتی مناسب به آن برازش داده شد. مقایسه شدت سیلاب‌های نمونه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آتی با وضعیت کنونی آن، نشان داد که برای دوره بازگشت‌های کمتر از ۵۰ سال احتمال کاهش شدت سیلاب در دوره‌های آتی بیش از افزایش آن می‌باشد. این وضعیت برای دوره بازگشت‌های بیش از ۵۰ سال متفاوت بوده و با افزایش دوره بازگشت، کاهش و افزایش سیلاب تقریباً شانس مساوی برای رخ دادن پیدا می‌کنند. از طرف دیگر احتمال وقوع سیلاب در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه برای دبی‌های کمتر از ۲۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش و برای دبی‌های بیشتر از ۶۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم- عدم قطعیت- مونت کارلو- سیلاب- حوضه آیدوغموش.

تاریخ دریافت مقاله: ۲ مهر ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۳۱ فروردین ۱۳۸۸

1- MSc Student, Irrigation Group, Abouraihan Campus, Tehran University, Email: parisa_ashofteh@yahoo.com
2- Assistant Professor, Irrigation Group, Abouraihan Campus, Tehran University, Email: armassah@yahoo.com
*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۲- استادیار پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول

تغییرات بارش حداکثر، خروجی مدل گردش عمومی HadRM3 (RCM)، تحت سناریوی A2 از مجموع سناریوی SRES^۱ برای سه دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که شدت سیلاب در یک دوره بازگشت معین، افزایش پیدا می‌کند. Alison et al. (2004) تأثیر تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب در کشور انگلستان تحت خروجی‌های مدل گردش عمومی HadRM3H RCM و سناریوی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که علی‌رغم کاهش متوسط سالانه بارش در اکثر حوضه‌ها در بیشتر دوره بازگشت‌ها، تناوب سیلاب‌ها افزایش یافته است. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روی میزان جریان‌های کم (Low Flow) رودخانه Thames در انگلستان توسط Wilby and Harris (2006) انجام گردید. در این تحقیق منابع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، روش‌های کوچک مقیاس کردن Downscaling، 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 هیدرولوژی جریان رودخانه 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 آبی 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 داد که بارش زمستانه و بارش تابستانه به ترتیب افزایش و کاهش دارند. همچنین میزان دبی رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود.

گرچه تحقیق‌های انجام شده قبلی روش‌های قابل قبولی را به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب رودخانه ارائه می‌کنند ولی در اکثر مطالعات، مباحث مربوط به عدم قطعیت که می‌تواند تأثیر بارزی بر نتایج نهائی بگذارد نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر در تحقیق‌های دیگر (مانند Prudhomme et al. (2001) علی‌رغم این که سعی شده عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در محاسبات لحاظ شود اما تمامی مدل‌های AOGCM به کار رفته با وزن یکسان

صنعتی شدن جوامع بشری موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص گاز CO₂ شده است. این در حالی است که اگر این گازها کاهش نیابد متوسط دمای زمین می‌تواند به میزان ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ افزایش یافته و باعث پدیده تغییر اقلیم شود (IPCC, 2007). طبق گزارش‌های IPCC تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش احتمال وقوع رخداد‌های اکسترمیم اقلیمی مانند سیلاب در بعضی از مناطق کره زمین شود (IPCC, 2007). از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آبی می‌تواند آثار زیانباری برای جوامع بشری داشته باشد در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد صورت گرفته است. Gellen and Roulin (1998) تأثیر این پدیده را بر جریان رودخانه در ۸ حوضه واقع در کشور بلژیک، تحت خروجی‌های شش مدل گردش عمومی جو (AOGCM)^۱ مطالعه کردند. تمام مدل‌ها به جز دو مدل، افزایش فراوانی سیلاب را در ماه‌های زمستان نشان دادند. در تحقیقی که توسط New and Hulme (2000) انجام گردید، تغییرات دما و بارندگی در دوره‌های آبی به‌صورت توابع دو بعدی برای انگلستان و اسکاتلند ارائه شد. بدین منظور محدوده‌های عدم قطعیت در سناریوهای انتشار، حساسیت اقلیم، میانگین دمای اتمسفر زمین و داده‌های ماهانه دما و بارندگی از شش مدل AOGCM مورد بررسی قرار گرفت. سپس با کالیبره کردن یک مدل بارش-رواناب و استفاده از روش‌های مونت کارلو، آنالیز بیز و Pattern Scaling حساسیت رواناب نسبت به توزیع دو بعدی دما و بارندگی مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیق دیگری تأثیر تغییر اقلیم بر سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط و با استفاده از عدم قطعیت‌های خروجی هفت مدل AOGCM توسط Prudhomme et al. (2001) انجام گرفت. در این بررسی شاخص جریان پایه^۲ به‌عنوان شاخصی از نفوذپذیری خاک معرفی گردید که روی هیدروگراف سیلاب تأثیر می‌گذارد. همچنین شاخص کاهش یا تعدیل سیلاب توسط مخازن و رودخانه‌ها^۳ به‌عنوان شاخصی برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شدت سیلاب انتخاب گردید. بیشتر سناریوها نشان از افزایش شدت و فراوانی رخداد‌های سیلاب دارند. در تحقیق دیگری تأثیر پدیده گرم شدن جهانی^۴ و تغییر اقلیم بر احتمال رخداد سیلاب در کشور بنگلادش تحت خروجی‌های چهار مدل AOGCM و سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط Mirza (2001) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده، افزایشی را در میانگین دبی پیک نشان می‌دهد. Ekström et al. (2003) شبیه‌سازی‌هایی را برای بارش حداکثر در کشور انگلستان با مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای^۵ (RCM) انجام دادند. در این تحقیق، برای تعیین

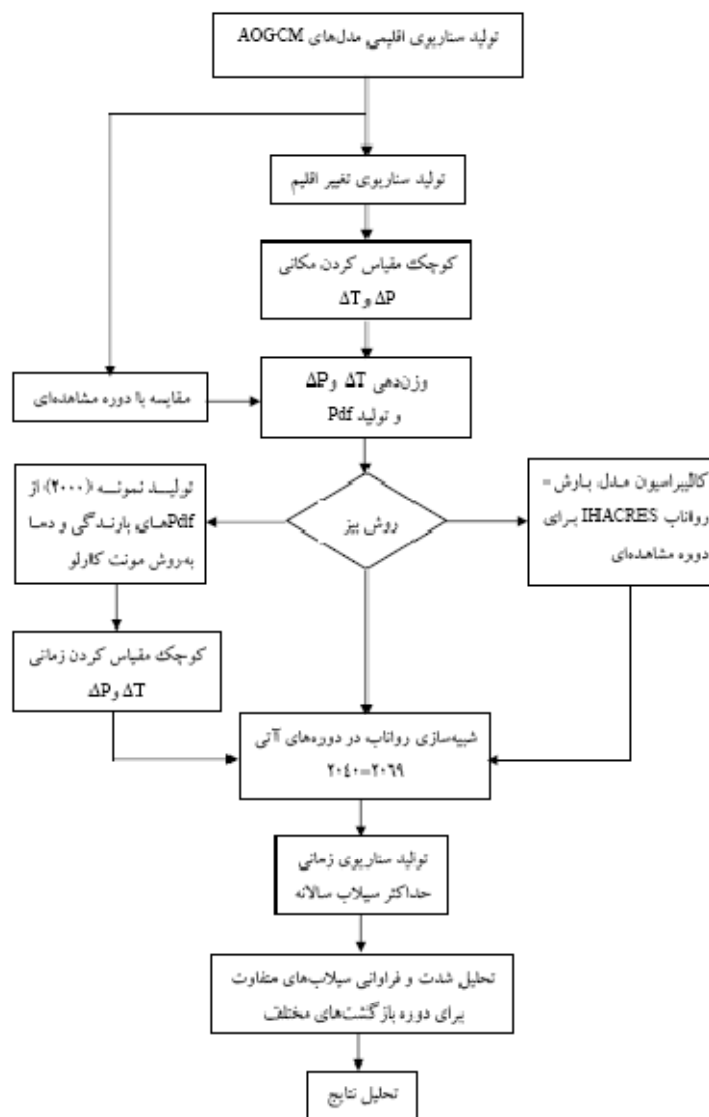
اعمال شده‌اند. در این تحقیق سعی شده است تا این دو نقیصه با ارائه روشی جدید برطرف گردد.

۲- مواد و روش‌ها

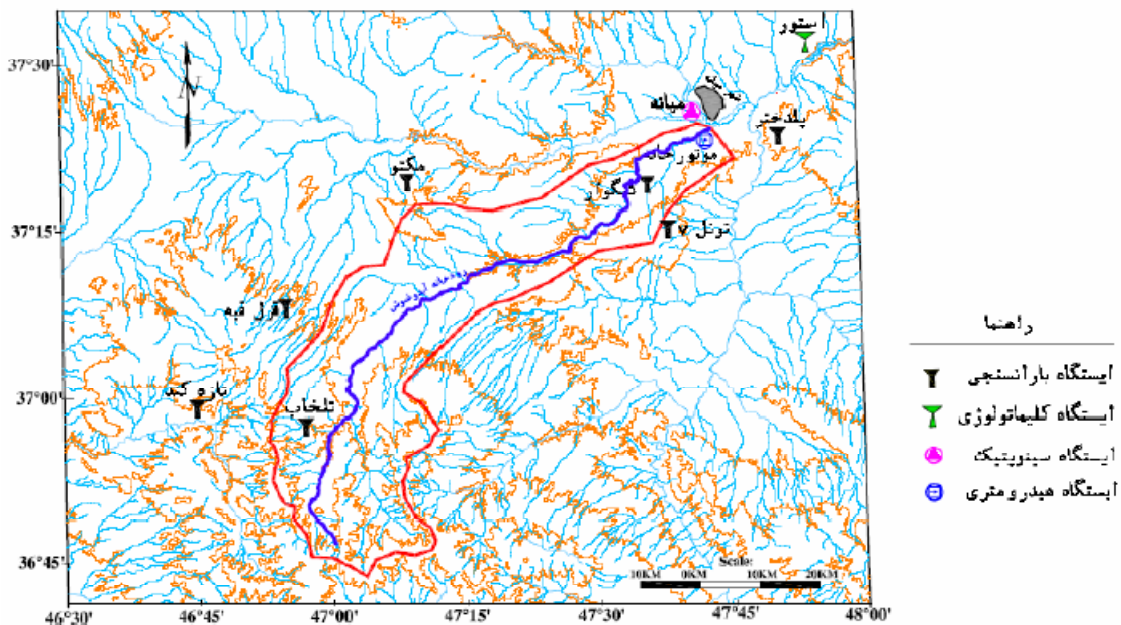
در این قسمت در ابتدا ویژگی‌های منطقه مطالعاتی تحقیق معرفی می‌شود. سپس روش‌های مورد نیاز برای این تحقیق که عبارتند از: تولید سناریوهای تغییر اقلیم و سناریوهای اقلیمی، کوچک مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM، شبیه‌سازی بارش - رواناب، آنالیز عدم قطعیت و تحلیل سیلاب ارائه خواهد شد. برای بهتر دنبال کردن مراحل انجام این تحقیق تصمیم بر آن شد تا از یک نمودار گردشی (فلوچارت) استفاده شود. این فلوچارت در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق، حوضه آیدوغموش است که در استان آذربایجان شرقی و در موقعیت جغرافیایی 52° - 46° تا 45° - 47° طول شرقی و 33° - 36° تا 26° - 37° عرض شمالی قرار گرفته و دارای وسعت 1802 کیلومتر مربع می‌باشد. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه آیدوغموش با طول حدود 80 کیلومتر بوده که از ارتفاعات گرگرد (قور-قور) از توابع هشتروند سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد. متوسط شیب حوضه $24/5$ درصد و ارتفاع این حوضه از 1100 متر تا 2500 متر متغیر است (شکل ۲). همچنین آبدهی سالانه آن 170 میلیون متر مکعب و متوسط بارش در کل حوضه 378 میلی‌متر می‌باشد. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- فلوچارت مراحل مختلف انجام تحقیق



شکل ۲- حوضه رودخانه آیدوغموش و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع حوضه (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
تلخاب	باران سنجی	۲۵۰۰	۴۶°-۵۷'	۳۶°-۵۷'
میانه تونل ۷	باران سنجی	۱۱۰۰	۴۷°-۳۷'	۳۷°-۱۴'
استور	کلیماتولوژی	۱۲۰۰	۴۷°-۵۴'	۴۷°-۳۰'
پل دختر	باران سنجی	۱۲۰۰	۴۷°-۴۹'	۳۷°-۲۱'
موتور خانه	باران سنجی	۱۰۶۰	۴۳°-۴۷'	۲۳°-۳۷'
تازه کند	باران سنجی	۱۸۵۰	۴۶°-۴۵'	۳۶°-۵۹'
کنگوار	باران سنجی	۱۳۲۰	۴۷°-۳۶'	۳۷°-۱۸'
قزل قیه	باران سنجی	۱۴۹۹	۴۷°-۳۲'	۳۷°-۱۶'
مکتو	باران سنجی	۱۶۹۰	۴۷°-۱۳'	۳۷°-۱۸'
میانه	سینوپتیک	۱۱۰۰	۴۷°-۴۲'	۳۷°-۲۷'

(IPCC-TGCI, 1999). جدول ۲ مشخصات این مدل‌ها را نشان می‌دهد.

یکی از ورودی‌های مورد نیاز مدل‌های AOGCM، مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی می‌باشد. در سال ۱۹۹۶ سری جدید سناریوهای انتشار با نام SRES توسط IPCC ارائه شد. در مجموع، ۴۰ زیرسناریوی متفاوت SRES ارائه گردیده است. هر کدام از این زیرسناریوها مربوط به یکی از گروه‌های A1، A2، B1 و B2 می‌باشد. در خانواده A2 تاکید بر رسوم خانوادگی، رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی می‌باشد (IPCC, 2007).

۲-۲- تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آتی

معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو، AOGCM می‌باشند (Wilby and Harris, 2006). این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی که به وسیله روابط ریاضی ارائه می‌شود استوار می‌باشند. در این تحقیق از خروجی هفت مدل AOGCM شامل CCSR-NIES، CGCM2، ECHAM4-OPYC3، CSIRO-MK2، GFDL-R30، HadCM3 و NCAR DOE PCM تحت سناریوهای A2 از مجموعه سناریوهای انتشار استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های AOGCM موجود در DDC مربوط به پایگاه اطلاع رسانی IPCC (IPCC-TGCI, 1999)

CCSR	NCAR	GFDL-R30	CGCM2	CSIRO	HadCM3	ECHAM4	دقت مکانی AGCM (درجه) (طول × عرض)
۵/۶×۵/۶	۴/۵×۷/۵	۴/۵×۷/۵	۳/۷×۳/۷	۳/۲×۵/۶	۲/۵×۳/۷۵	۲/۸×۲/۸	

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

در رابطه (۳)، T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (در اینجا روزانه) در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰)، T سری زمانی دما حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده می‌باشد. در رابطه (۴) برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

۲-۵- تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

در مطالعات تغییر اقلیم منابع مختلف عدم قطعیت بر نتایج نهائی تأثیر می‌گذارد. این منابع عبارتند از: عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، عدم قطعیت روش‌های کوچک مقیاس کردن و عدم قطعیت در روش شبیه‌سازی بارش- رواناب. در این تحقیق در نظر است تا تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM بر سیلاب حوضه محاسبه گردد. بدین منظور از رویکرد بیز استفاده می‌گردد. در این رویکرد سه گام محاسباتی زیر اجرا می‌گردد (Katz, 2002):

- ۱- تولید توزیع احتمالاتی پیشین^{۱۰} برای پارامترهای آماری
- ۲- تعیین تابع درست‌نمایی احتمالاتی^{۱۱} داده‌های مشاهداتی به عنوان تابعی از پارامترها
- ۳- تعیین توزیع احتمالاتی پسین^{۱۲} یک سیستم. توزیع احتمالاتی پسین بر اساس توزیع‌های پارامترهای ورودی (توزیع پیشین) و تابع احتمالاتی تعیین می‌گردد.

بنابراین برای استفاده از قانون بیز لازم است تا در ابتدا pdf 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:

$$R_i = \frac{I}{\sum_{i=1}^N \frac{I}{B_{x,i}}} \quad (۵)$$

به دلیل انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای در خانواده A2 و همچنین محتمل‌تر بودن وضعیت آن برای قرن حاضر، در این تحقیق از این سناریو استفاده می‌شود.

۲-۳- تولید سناریوی تغییر اقلیم^۷

به دلیل بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی در مدل‌های AOGCM (جدول ۲)، شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی با اغتشاش^۸ همراه است. به منظور حذف این اغتشاشات، معمولاً به جای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای ۳۰ ساله این داده‌ها استفاده می‌شود (روابط ۱ و ۲) (Jones and Hulme, 1996):

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

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

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 توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا ۲۰۴۰-۲۰۶۹)، $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای هر ماه می‌باشد. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

۲-۴- کوچک مقیاس کردن^۹ مکانی و زمانی

روش‌های مختلفی جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها کوچک مقیاس کردن گفته می‌شود. در این تحقیق به منظور 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):

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (۳)$$

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 می‌باشد. 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 سیلاب رودخانه محاسبه کرد.

۲-۶- شبیه‌سازی بارش- رواناب

در این تحقیق به دلیل نیاز به تکرارهای بسیار زیاد برای شبیه‌سازی بارش- رواناب، استفاده از بسته‌های نرم افزاری موجود امکان‌پذیر نبود. لذا تصمیم به تهیه مدلی با ویژگی تکرارپذیری بالا شد که بر اساس بررسی‌های به عمل آمده الگوریتمی که توسط Jakeman and Hornberger (1993) برای شبیه‌سازی بارش- رواناب ارائه شده، با توجه به ورودی‌های مورد نیاز و قوام علمی لازم، مناسب تشخیص داده شد. اساس این روش از دو مدول غیر خطی تلفات^{۱۴} و مدول خطی هیدروگراف واحد^{۱۵} تشکیل می‌شود. بدین شکل که در ابتدا بارندگی I_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی موثر u_k تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۳).

به منظور تبدیل بارش به بارش موثر در حوضه، از ضریب رطوبتی حوضه^{۱۶} که با s_k ($0 \leq s_k \leq 1$) نشان داده می‌شود، استفاده می‌گردد:

$$u_k = s_k \times r_k \quad (6)$$

از طرف دیگر ضریب رطوبتی حوضه تابعی از تبخیر و تعرق در حوضه بوده که با روابط زیر بیان می‌گردد:

$$s_k = C \times r_k + \left(I - \frac{I}{\tau_w(t_k)} \right) s_{k-1} \quad s_k = 0 \quad (7)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062 f(R-t_w)} \quad \tau_w(t_k) > I \quad (8)$$

در رابطه (۸)، $\tau_w(t_k)$ مقدار شاخص s_k را در رابطه (۷) در هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد کنترل می‌کند که در آن: R برابر دمای مرجع، τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه^{۱۷} و f فاکتور تعدیل دما^{۱۸} است. در رابطه (۷) پارامتر C به گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارش موثر و رواناب مشاهداتی در دوره کالیبراسیون یکسان گردد.

از طرف دیگر می‌توان هیدروگراف واحد اصلی را به صورت تلفیقی از تعداد مختلفی از هیدروگراف‌های واحد به صورت موازی یا سری و یا به صورت منفرد در نظر گرفت. به عنوان مثال با تقسیم هیدروگراف واحد کل به دو قسمت موازی هیدروگراف سریع q و هیدروگراف s، هیدروگراف واحد اصلی مطابق زیر تعریف می‌گردد:

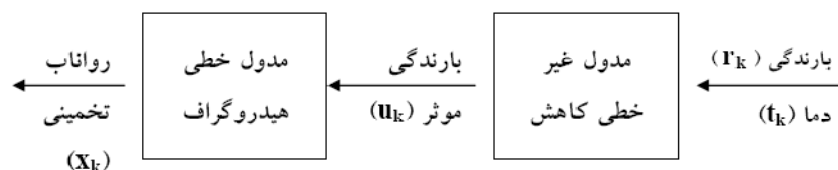
$$\frac{b^q}{1-a^q} + \frac{b^s}{1-a^s} = 1 \quad (9)$$

به طور کلی در این روش، سه پارامتر τ_w ، f و C از مدول غیر خطی کاهش (روابط ۷ و ۸) و سه پارامتر از چهار پارامتر a^q ، a^s ، b^q و b^s از مدول خطی هیدروگراف (رابطه ۹) می‌بایست بر اساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد مطالعه واسنجی گردند.

برای واسنجی مدول در حوضه از داده‌های مشاهداتی دما و بارش و دبی روزانه حوضه آیدوغموش در دوره پایه استفاده گردید. پس از آن، ۲۰۰۰ سری از سری‌های زمانی دما و بارش تولید شده به وسیله روش مونت کارلو برای دوره ۲۰۵۰S به مدل IHACRES معرفی شده و تعداد ۲۰۰۰ سری زمانی رواناب روزانه تولید گردید.

۲-۷- تجزیه و تحلیل سیلاب

در تحلیل رژیم سیلاب، مدل‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند که شامل مدل سری حداکثر سالانه^{۱۹} AM، مدل سری‌های مقادیر جزئی^{۲۰} PD، مدل اوج‌های بالاتر از یک حد آستانه^{۲۱} POT و مدل سری‌های زمانی^{۲۲} TS می‌باشد (راما چاندر، ۱۹۳۹). در سری‌های جریان حداکثر سالانه، در هر سال فقط جریان اوج مربوط به آن سال در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از روش سری حداکثر سالانه استفاده می‌شود. بدین منظور بعد از تولید ۲۰۰۰ سری رواناب روزانه برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰، سری زمانی مقادیر سیلاب حداکثر سالانه مربوط به هر سری محاسبه گردید.



شکل ۳- چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب در روش ارائه شده توسط Jakeman و Hornberger (۱۹۹۳)

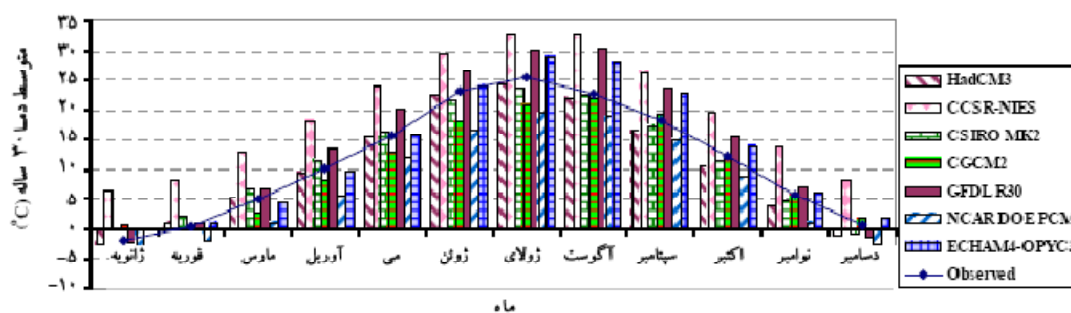
۳- نتایج

۳-۱- بررسی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی دما و بارندگی حوضه آیدوغموش در دوره پایه

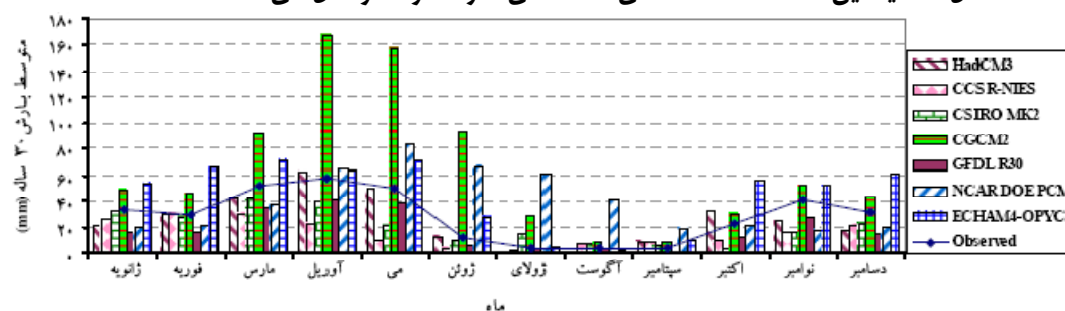
مدل‌های AOGCM در تخمین میانگین دراز مدت دما و بارش ماهانه منطقه با یکدیگر تطابق نداشته که این خود نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت در خروجی این مدل‌ها می‌باشد. وجود عدم قطعیت در مدل‌های مختلف AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای توسط تحقیقات دیگر نیز به اثبات رسیده است (مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵ الف)، قربانی واقعی و همکاران (۱۳۸۷)، New and Hulme (2000)، Wilby and Harris (2006)). در ادامه به منظور بررسی عملکرد مدل‌ها، از معیارهای عملکرد ضریب همبستگی^{۲۴} (r)، جذر میانگین مربعات خطا^{۲۵} (RMSE) و متوسط خطای مطلق^{۲۶} (MAE) استفاده شد.

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی حوضه، در ابتدا داده‌های دما و بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آیدوغموش (جدول ۱) تکمیل شده و پس از آن سری زمانی متوسط حوضه محاسبه گردید. سپس فایل داده‌های ماهانه دما و بارندگی مدل‌های AOGCM که حاوی سری زمانی متغیرهای اقلیمی سلول‌های محاسباتی محاط بر کره زمین است از سایت پایگاه اطلاع رسانی IPCC در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ (به دلیل آن که اکثر ایستگاه‌های موجود در حوضه داده‌های دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ را پوشش می‌دهند لذا این دوره به عنوان دوره پایه انتخاب شد) تهیه گردید (IPCC-DDC, 1988). در این تحقیق از برنامه (GCM-RDP)^{۲۳}، که توسط مساح بوانی و همکاران (۱۳۸۵ ب) ارائه گردیده استفاده شده که می‌تواند پس از وارد کردن مختصات مکانی موقعیت 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. پس از آن، میانگین ۳۰ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۰) 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 دما و بارش نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود

نتایج نشان می‌دهد که اکثر مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دمای منطقه با ضریب تعیین 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 در جدول ۳ 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 به دلیل پایین بودن عملکرد مدل NCAR DOE PCM در شبیه‌سازی بارندگی حوضه آیدوغموش، از دخالت دادن داده‌های دما و بارش این مدل در محاسبات آتی صرف‌نظر گردید.



شکل ۴- میانگین ۳۰ ساله ماهانه دمای مشاهده‌ای معرف حوضه و مدل‌های مختلف AOGCM



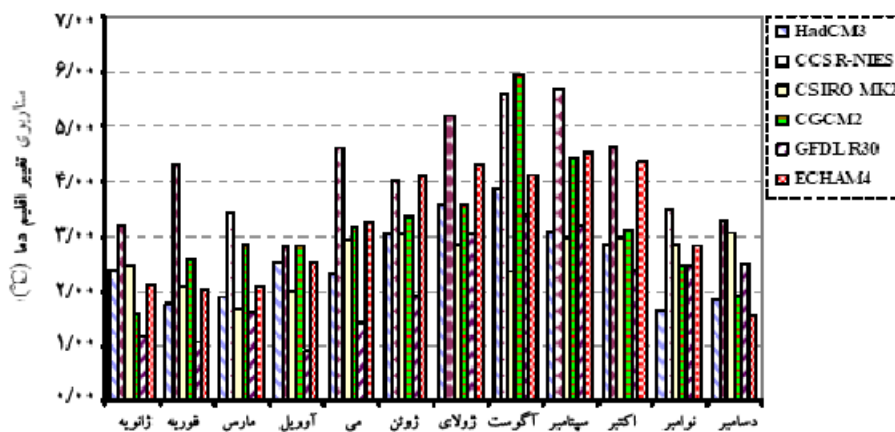
شکل ۵- میانگین ۳۰ ساله ماهانه بارندگی مشاهده‌ای معرف حوضه و مدل‌های مختلف AOGCM

جدول ۳- شاخص‌های عملکرد مدل‌های مختلف AOGCM نسبت به داده‌های مشاهداتی دما و بارندگی

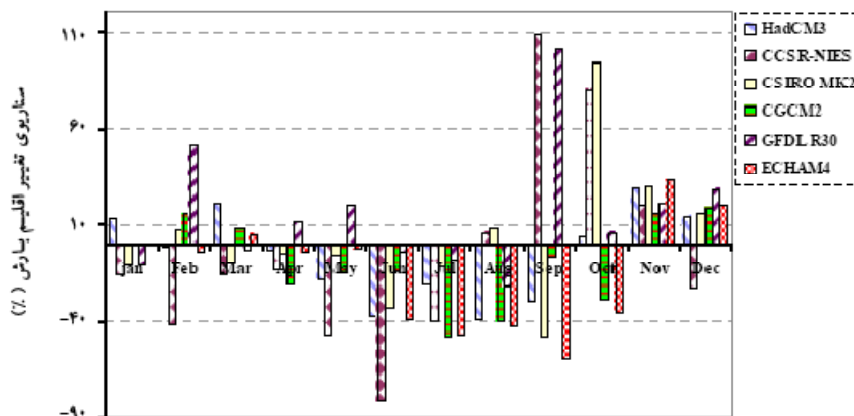
بارندگی			دما			متغیر اقلیمی
MAE (mm)	RMSE (mm)	r (%)	MAE (°C)	RMSE (°C)	r (%)	مدل / معیار عملکرد
۶/۸۲	۸/۶۷	۹۱/۰	۱/۰۰	۱/۱۸	۹۹/۶	HadCM3
۱۴/۳۰	۱۹/۱۲	۶۷/۰	۷/۸۴	۷/۸۹	۹۹/۶	CCSR-NIES
۱۰/۹۳	۱۴/۶۰	۷۷/۰	۱/۲۵	۱/۳۴	۹۹/۱	CSIRO MK2
۳۶/۱۲	۵۲/۶۴	۷۷/۰	۱/۹۴	۲/۵۰	۹۷/۹	CGCM2
۱۰/۶۷	۱۲/۳۰	۹۷/۰	۳/۱۴	۳/۷۴	۹۹/۴	GFDL R30
۲۳/۰۰	۲۸/۹۱	۱۶/۰	۳/۹۹	۴/۲۰	۹۹/۴	NCAR DOE PCM
۱۶/۷۹	۲۰/۲۴	۸۹/۰	۱/۷۲	۲/۳۷	۹۸/۹	ECHAM4

بارندگی هر ماه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ 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 طرح محاسبه گردید که نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

۲-۳- محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹
برای محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم منطقه، ابتدا سری زمانی دما و بارش ماهانه شش مدل AOGCM (مدل‌های جدول ۳ به غیر از مدل NCAR DOE PCM) تحت سناریوی A2 تهیه و برای منطقه طرح کوچک مقیاس گردید. پس از آن متوسط درازمدت دما و



شکل ۶- سناریوهای تغییر اقلیم دمای حاصل از مدل‌های مختلف AOGCM



شکل ۷- سناریوهای تغییر اقلیم بارندگی حاصل از مدل‌های مختلف AOGCM

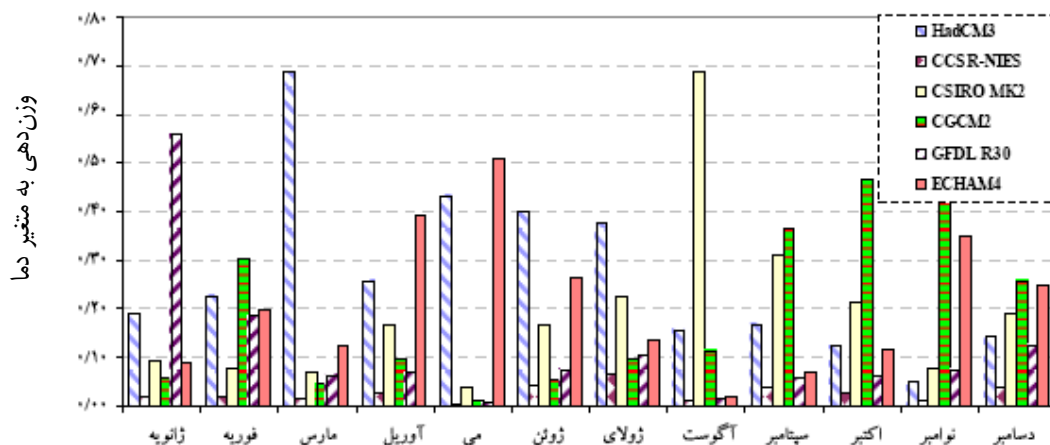
برای دیگر فصول خواهد بود. در این میان مدل CCSR-NIES در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای بیشترین دامنه نوسان میزان بارش آبی نسبت به پایه بوده و مدل CGCM2 دارای کمترین دامنه نوسان می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود گرچه مدل CGCM2 در دوره پایه بارشی بیشتر از مشاهداتی تولید کرده ولی در دوره آبی نسبت به سایر مدل‌ها تغییرات کمتری برای بارش منطقه در نظر دارد.

۳-۳- تحلیل عدم قطعیت

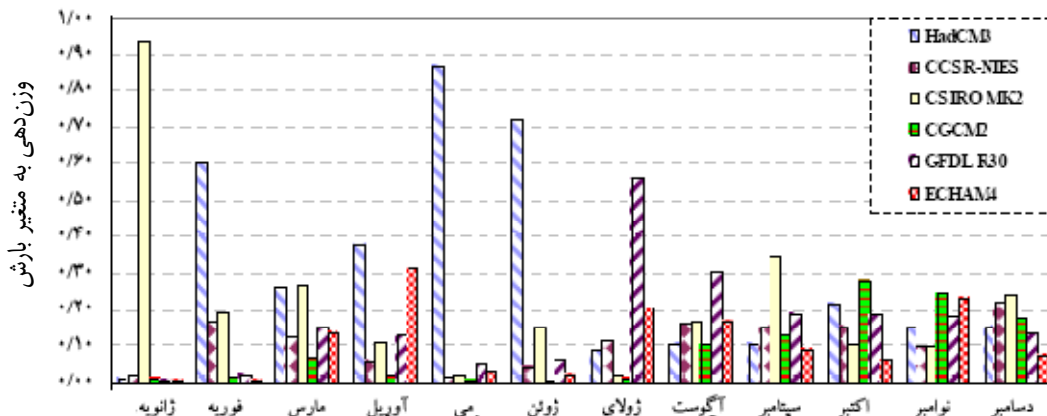
به منظور تجزیه و تحلیل عدم قطعیت به روش بیز، لازم است تا بعد از تعیین محدوده‌های سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی ماهانه، هر یک از سناریوها براساس روش میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (رابطه ۵) وزن دهی شده و pdfهای ماهانه این دو متغیر محاسبه شوند. مقادیر وزن دهی برای متغیرهای دما و بارش در شکل‌های ۸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

همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، تمامی مدل‌ها دمای بیشتری را برای دوره آبی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند. به طوری که انتظار می‌رود دمای حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بین ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. این افزایش برای فصول زمستان و بهار بین ۱ تا ۴/۵ درجه و برای فصول تابستان و پاییز بین ۲ تا ۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل CCSR-NIES در تمامی ماه‌ها، دمای آبی بیشتری را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. همچنین مدل GFDL-R30 در اغلب ماه‌ها کمترین افزایش را برای دمای آبی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد.

از طرف دیگر همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مدل‌های مختلف در تخمین میزان تغییر بارش دوره آبی نسبت به پایه هماهنگ نبوده و برخی از مدل‌ها بارش دوره آبی را نسبت به دوره پایه بیشتر و برخی نیز کمتر نشان می‌دهند. با این وجود می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی حوضه، در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شاهد افزایش بارندگی عمدتاً برای فصول پاییز و زمستان و کاهش آن



شکل ۸- وزن دهی به مدل‌های مختلف AOGCM برای متغیر دما



شکل ۹- وزن دهی به مدل‌های مختلف AOGCM برای متغیر بارندگی

سپتامبر ۱۹۷۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۱) برای صحت‌یابی مدل استفاده گردید. نتایج (شکل ۱۱) نشان از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب و دبی‌های حداکثر حوضه دارد. پس از واسنجی مدل، ۲۰۰۰ سری رواناب روزانه حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ برای نمونه‌های دما و بارش تولید شده از مراحل قبل شبیه‌سازی گردید.

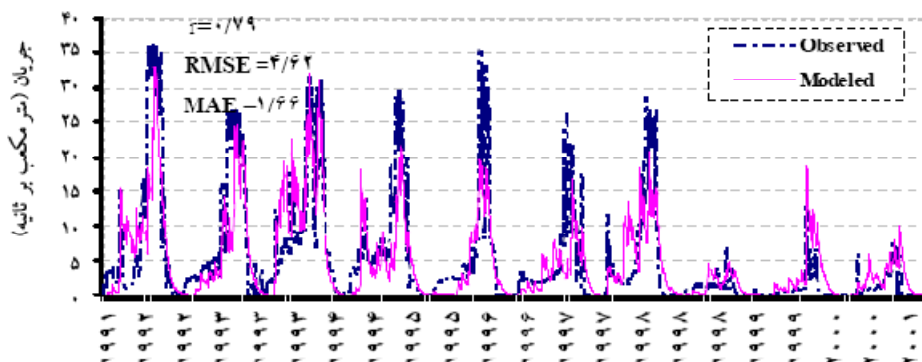
۳-۵- بررسی رژیم سیلاب حوضه در دوره آتی

بعد از تولید ۲۰۰۰ نمونه رواناب روزانه برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹، مقادیر دبی حداکثر سالانه هر نمونه محاسبه شده (۳۰ دبی حداکثر برای هر نمونه) و با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط فرترن، تابع توزیع احتمالاتی (Pdf) هر نمونه تعیین گردید. همین مراحل برای تعیین Pdf سیلاب حداکثر سالانه دوره مشاهده‌ای انجام گردید. نتایج نشان داد که همانند دوره مشاهده‌ای، توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ بهترین برازش را برای نمونه‌های سیلاب حداکثر در دوره آتی، دارد. در ادامه به‌منظور بررسی چگونگی تغییر رژیم سیلاب رودخانه آیدوغموش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰، از دو شاخص شدت سیلاب در دوره بازگشت‌های یکسان و فراوانی سیلاب در دبی‌های یکسان استفاده گردید. شکل ۱۲ محدوده تغییرات شدت سیلاب‌های مختلف دوره آتی و دوره مشاهداتی را برای دوره بازگشت‌های یکسان نشان می‌دهد.

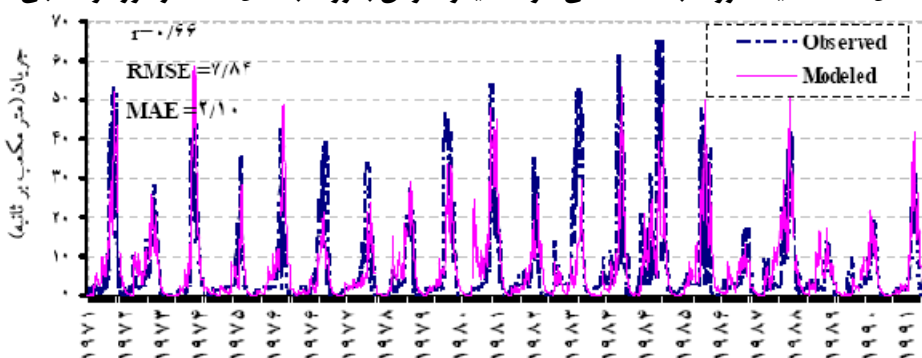
همانطور که ملاحظه می‌شود مدل HadCM3 نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین وزن را برای هر دو متغیر دما و بارش به خود اختصاص داده است. همچنین مدل CCSR-NIES کمترین وزن را برای دما و مدل CGCM2 بیشترین وزن را برای بارش اختیار کرده است. بنابراین مدل HadCM3 می‌تواند بیشترین تأثیر را بر بارش و دما و نهایتاً بر رواناب 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. پس از آن با استفاده از روابط ۳ و ۴، ۲۰۰۰ سری زمانی روزانه دما و بارندگی برای حوضه محاسبه گردید.

۳-۴- شبیه‌سازی بارش- رواناب

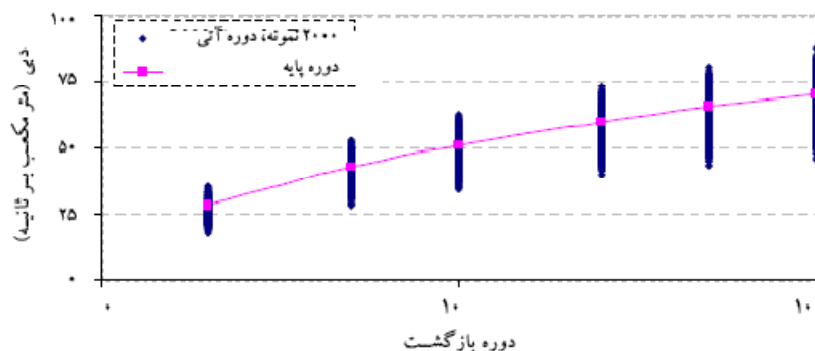
به‌منظور واسنجی و صحت‌یابی مدل IHACRES، از آمار روزانه دما و بارش متوسط حوضه و آمار دبی روزانه ایستگاه موتورخانه در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۱ استفاده گردید. در این دوره، سال‌های مختلف برای واسنجی مدل مورد آزمون قرار گرفت. نتایج (شکل ۱۰) نشان داد که دوره ۱۹۹۱-۲۰۰۱ (۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۱) با ضریب همبستگی (r) ۰/۷۹ و معیار خطای (RMSE) ۴/۶۲ بهترین عملکرد را داشته است. پس از واسنجی مدل دوره ۱۹۹۱-۱۹۷۱ (۲۳



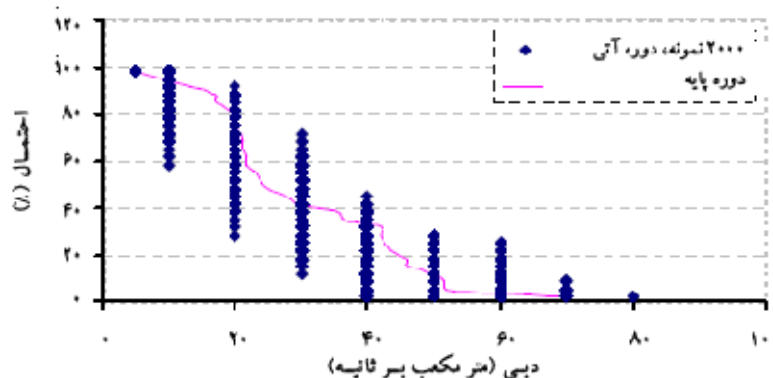
شکل ۱۰- مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه آیدوغموش با رواناب مدل شده در دوره واسنجی



شکل ۱۱- مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه آیدوغموش با رواناب مدل شده در دوره صحت‌سنجی



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات شدت سیلاب حوضه آیدوغموش در دوره آتی و دوره پایه برای دوره بازگشت ثابت



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات دوره بازگشت سیلاب حوضه آیدوغموش در دوره آتی و دوره پایه برای دبی‌های ثابت

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب (شدت و فراوانی) حوضه رودخانه آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های مختلف AOGCM تحت سناریوی A2 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در ابتدا لازم بود تا سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی از داده‌های مدل‌های AOGCM محاسبه گردد. نتایج در مجموع نشان می‌دهد که دمای حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بین ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. این افزایش برای فصول زمستان و بهار بین ۱ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد و برای فصول تابستان و پاییز بین ۲ تا ۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این در حالی است که حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شاهد افزایش بارندگی عمدتاً برای فصول پاییز و زمستان و کاهش آن برای دیگر فصول بوده و همچنین محدوده تغییرات بارش ۸۰- تا ۱۰۰٪ خواهد بود.

همانطور که ملاحظه می‌شود محدوده تغییرات به‌گونه‌ای خواهد بود که هر دو وضعیت افزایش و کاهش سیلاب قابل انتظار می‌باشد. این در حالی است که برای دوره بازگشت‌های کمتر از ۵۰ سال تعداد نمونه‌هایی که کاهش شدت سیلاب را نشان می‌دهند بیش از تعداد نمونه‌هایی است که افزایش آن را در نظر دارند. این وضعیت برای دوره بازگشت‌های بیش از ۵۰ سال متفاوت بوده و با افزایش دوره بازگشت، کاهش و افزایش سیلاب تقریباً شانس مساوی برای رخ دادن پیدا می‌کنند.

شکل ۱۳ محدوده تغییرات فراوانی سیلاب در دوره آتی و دوره پایه حوضه آیدوغموش را در دبی‌های یکسان نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که احتمال وقوع سیلاب در دوره‌های آتی برای دبی‌های کمتر از ۲۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته و به‌طور متوسط بین ۴۰ تا ۱۰۰٪ و برای دبی‌های بیشتر از ۶۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش یافته و بین ۲ تا ۲۰٪ خواهد بود.

۵- تشکر

این تحقیق با حمایت مالی شرکت مدیریت منابع آب ایران با کد WRE1-87013 انجام شده است. که بدینوسیله از این شرکت قدردانی می‌گردد. همچنین از همکاری و مساعدت آقای مهندس ناصر جمالی وردوق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Atmosphere- Ocean General Circulation Model
- 2- Base Flow Index
- 3- Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes
- 4- Global Warming
- 5- Regional Climate Model
- 6- Special Reports on Emission Scenario
- 7- Climate Change Scenario
- 8- Noise
- 9- Downscaling
- 10- Prior Probability Distribution
- 11- Likelihood
- 12- Posterior Probability Distribution
- 13- Mean Observed Temperature- Precipitation
- 14- Non- linear loss module
- 15- Linear unit hydrograph module
- 16- Catchment Wetness Index
- 17- Catchment Drying Time Constant
- 18- Temperature Modulation Factor
- 19- Annual Maximum
- 20- Partial
- 21- Peak Over Threshold
- 22- Time Series
- 23- GCM- Retrieve Data Program
- 24- Coefficient of Correlation
- 25- Root Mean Square Error
- 26- Mean Absolute Error

۶- مراجع

- 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. تبریز.
- مساح بوانی، ع.، مرید، س. و محمدزاده، م. (۱۳۸۵ الف)، "وضعیت آینده اقلیم حوضه زاینده‌رود تحت تأثیر تغییر اقلیم: مقایسه‌ای بین سناریوهای مدل‌های مختلف AOGCM". دومین کنفرانس منابع آب ایران.
- مساح بوانی، ع.، مرید، س. و محمدزاده، م. (۱۳۸۵ ب)، "بررسی تأثیر عدم قطعیت در توزیع تجمعی احتمالاتی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم"، دومین کنفرانس منابع آب ایران.

توزیع‌های احتمالاتی (pdf) ماهانه دما و بارش برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ به‌وسیله وزن‌دهی مدل‌های AOGCM و با استفاده از روش میانگین مشاهداتی دما و بارش تولید گردید. سپس با استفاده از روش مونت کارلو تعداد ۲۰۰۰ نمونه از pdfهای ماهانه دما و بارندگی تولید و ضمن معرفی به مدل IHACRES، ۲۰۰۰ سری رواناب روزانه برای حوضه در دوره مورد نظر شبیه‌سازی گردید. در این تحقیق تغییرات دو شاخص شدت و فراوانی سیلاب تحلیل گردید: مقایسه تغییرات شدت سیلاب‌های مختلف دوره آبی و دوره مشاهداتی در دوره‌های بازگشت ثابت و مقایسه تغییرات دوره‌های بازگشت سیلاب دوره آبی و دوره مشاهداتی در سیلاب‌های با شدت ثابت.

بررسی نتایج مربوط به محدوده تغییرات شدت سیلاب در دوره آبی نسبت به دوره پایه نشان داد که هر دو وضعیت افزایش و کاهش سیلاب برای حوضه قابل انتظار می‌باشد. این در حالی است که برای دوره بازگشت‌های کمتر از ۵۰ سال تعداد نمونه‌هایی که کاهش شدت سیلاب را نشان می‌دهند بیش از تعداد نمونه‌هایی است که افزایش آن را در نظر دارند. این وضعیت برای دوره بازگشت‌های بیش از ۵۰ سال متفاوت بوده و با افزایش دوره بازگشت، کاهش و افزایش سیلاب تقریباً شانس مساوی برای رخ دادن پیدا می‌کنند. از طرف دیگر احتمال وقوع سیلاب در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه برای دبی‌های کمتر از ۲۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته و به‌طور متوسط بین ۴۰ تا ۱۰۰٪ در تغییر بوده و برای دبی‌های بیشتر از ۶۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش یافته و بین ۲ تا ۲۰٪ خواهد بود.

به‌طور کلی در این تحقیق یک روش جدید برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب یک حوضه با لحاظ کردن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM به‌وسیله وزن‌دهی آن‌ها ارائه شده است. در این تحقیق عدم قطعیت مربوط به روش‌های مختلف کوچک مقیاس کردن و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای در محاسبات لحاظ نگردیده است. این امر می‌تواند بر محدوده تغییرات سیلاب تأثیر گذار باشد. لحاظ کردن این دو 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 محققین این مقاله در حال تحقیق در این زمینه می‌باشند.

- Water Resources Research.*, 29(8): pp. 2637-2649.
- Jones, P.D. and Hulme, M. (1996), "Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations". *International journal of climatology*, 16: pp. 361-377
- Katz, R.w. (2002), "Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies". *Climate Research*, 20(2).
- Mirza, M. (2001), Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. *Global Environmental Change*, 12: pp. 137-138
- New, M. and Hulme, M. (2000), "Representing uncertainty in climate change scenario: a Monte-Carlo approach. " *Integrated Assessment*, 1: pp. 203-213
- 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: pp. 1-23
- 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: 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* (in press).
- راماچاندر، ر. (۱۹۳۹)، مترجم اسلامیان س و سلطانی کوپایی س. (۱۳۸۱). تحلیل فراوانی سیل، اصفهان: نشر ارکان.
- Alison, L.K., Richard, G.J. and Nicholas, S.R. (2004), "RCM rainfall for UK flood frequency estimation". II. Climate change results. *Journal of Hydrology*, 318: pp. 163-172
- Ekstrom, M., Fowler, H.J., Kilsby, G.G. and Jones, P.D. (2003), "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations.2. Future estimates and use in impact studies". *Journal of Hydrology*, 300: pp. 234-251
- Gellen, D. and Roulin, E. (1998), "Stream flow response of Belgian to IPCC climate change scenarios". *Journal of Hydrology*, 210: pp. 242-258.
- IPCC (2007), Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2007*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (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, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-18.
- 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.
- Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M. (1993), "How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model? "