تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی

پریسا سادات آشفته* و علیرضا مساح بوانی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۹/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۳)

چکیده

یکی از آثار پدیده تغییر اقلیم، تأثیر بر وقایع حدی (سیلاب و خشکسالی) می‌باشد که در کشورمان کمتر به آن پرداخته شده است. در این تحقیق تلاش شده تا تأثیر این پدیده بر رژیم دبی‌های حداکثر سالانه (شدت و فراوانی) حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی بررسی شود. در ابتدا مقادیر دما و بارش ماهانه مدل **HadCM3** تحت سناریوی **A2** برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. سپس به وسیله روش کوچک مقیاس کردن مکانی تناسبی (**Proportional downscaling**) و روش کوچک مقیاس کردن زمانی عامل تغییر (**Change factor**)، این داده‌ها برای منطقه طرح کوچک مقیاس شدند. نتایج نشان از افزایش ۱/۵ تا ۴/۰ درجه‌ای دما و تغییرات ۳۰ تا ۴۰ درصدی بارندگی دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره مشاهداتی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ دارد. مدل **IHACRES** برای شبیه‌سازی رواناب روزانه حوضه واسنجی گردید. با معرفی مقادیر دما و بارندگی کوچک مقیاس شده دوره آتی به مدل **IHACRES**، رواناب حوضه در این دوره شبیه‌سازی شد. برازش توزیع احتمالاتی به سری دبی‌های حداکثر سالانه و مقایسه رژیم آن (شدت و فراوانی) در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با دوره مشاهداتی نشان از تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم دبی‌های حداکثر این حوضه در دوره‌های آتی دارد. به‌طوری که شدت دبی‌ها برای دوره بازگشت‌های تا ۵۰ سال تفاوت چندانی نکرده و با افزایش دوره بازگشت، شدت آن در دوره آتی افزایش خواهد یافت. هم‌چنین احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، دبی حداکثر، حوضه آیدوغموش، **IHACRES -HadCM3**

۱. به ترتیب کارشناس ارشد و استادیار منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: parisa_ashofteh@yahoo.com

مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای مخصوصا گاز CO_2 در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی، در چند دهه اخیر موجب شده که غلظت این گاز از ppm ۲۸۰ در سال ۱۷۵۰ به ppm ۳۷۹ در سال ۲۰۰۵ افزایش یابد. گزارش‌های Intergovernmental Panel) IPCC (on Climate Change حاکی از آن است که در صورت ادامه روند کنونی مصرف این سوخت‌ها، غلظت این گاز تا قبل از پایان قرن ۲۱ می‌تواند به بیش از ppm ۶۰۰ برسد. این در حالی است که اگر انتشار این گازها کاهش نیابد متوسط دمای سطحی کره زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند به ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد برسد و باعث پدیده تغییر اقلیم شود (۶). طبق گزارش‌های IPCC، تغییر اقلیم باعث ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده به گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی مانند سیلاب افزایش یافته است (۶). از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیانباری را برای جوامع بشری در پی داشته باشد در سال‌های اخیر تحقیق در مورد این موضوع برای حوضه‌های آبریز مختلف در سطح جهان مدنظر قرار گرفته است.

گلن و رولین تأثیر این پدیده را بر جریان رودخانه‌های بلژیک، تحت خروجی‌های شش مدل جفت شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو (Atmospheric- Ocean General (Circulation Model, AOGCM مورد بررسی قرار دادند. تمام مدل‌ها به جز دو مدل، افزایش فراوانی سیلاب را در ماه‌های زمستان در این رودخانه‌ها نشان دادند (۴).

در تحقیق دیگری تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب رودخانه انگلستان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط و با استفاده از خروجی هفت مدل AOGCM توسط پرادهوم و همکاران انجام گرفت. در این بررسی شاخص جریان پایه (Base Flow Index) به‌عنوان شاخصی از نفوذپذیری خاک معرفی گردید که روی هیدروگراف سیلاب تأثیر می‌گذارد. هم‌چنین شاخص کاهش یا افت سیلاب توسط مخازن و رودخانه‌ها (Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes) به‌عنوان شاخصی برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شدت سیلاب انتخاب گردید. بیشتر سناریوها نشان از افزایش شدت رخدادهای سیلاب دارند (۱۴).

در تحقیق دیگری تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر احتمال رخداد سیلاب در کشور بنگلادش تحت خروجی‌های چهار مدل AOGCM توسط میرزا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده، افزایشی را در میانگین دبی پیک نشان می‌دهد، این تغییرات ممکن است منجر به وقوع سیلاب گردد (۱۲).

اکستروم و همکاران بارش‌های حداکثر کشور انگلستان را با مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای Regional Climate Model, RCM مورد شبیه‌سازی قرار دادند. در این تحقیق، برای تعیین تغییرات ممکن در بارش حداکثر، خروجی مدل HadRM3 RCM، تحت سناریوی A2 از مجموع سناریوی (Special Reports on (Emission Scenario, SRES برای سه دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ بررسی و ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که شدت رخدادهای کوتاه‌مدت و بلندمدت در یک دوره بازگشت معین، افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین برای دوره بازگشت‌های بزرگ‌تر از ۲۵ تا ۵۰ سال، شدت سیلاب افزایش بیشتری خواهد داشت (۳).

الیسون و همکاران تأثیر تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب حوضه‌های کشور انگلستان تحت خروجی‌های مدل HadRM3H RCM و سناریوی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد علی‌رغم کاهش متوسط سالانه بارش در حوضه‌ها (به‌استثنای یک حوضه) در بیشتر دوره بازگشت‌ها، تناوب سیلاب‌ها افزایش یافته است. هم‌چنین برای تعدادی حوضه واقع در جنوب و شرق انگلستان علی‌رغم افزایش بارش حداکثر و بارش زمستانه، کاهش‌هایی در پیک سیلاب دیده شده است. هم‌چنین طبق نتایج این تحقیق حوضه‌های شمالی و غربی در چند مورد بیش از ۵۰ درصد افزایش پیک سیلاب را در دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد (۲).

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان جریان‌های کم

(Low Flow) رودخانه Thames در انگلستان توسط ویلبی و هریس (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 (۱۶).

استیل و همکاران 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 آتی ۲۰۶۰-۲۰۱۰ استفاده شد. 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 (۱۵).

با توجه به مطالعات انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که رژیم سیلاب رودخانه‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی دچار تغییراتی نسبت به دوره پایه خواهد شد. از طرف دیگر تغییرات حاصل شده نسبت به زمان و منطقه مورد مطالعه متفاوت است. لذا می‌بایست چگونگی این تغییرات در مناطق مختلف به طور جداگانه بررسی شود. از این رو در این تحقیق تلاش شده است تا تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی (دما و بارندگی) و همچنین رژیم سیلاب (شدت و فراوانی) حوضه آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی در دوره آتی ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و تحت سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 مورد بررسی قرار گیرد. این مقاله در سه بخش ارائه می‌شود. بخش اول به معرفی پدیده تغییر اقلیم و ارائه مطالعات کتابخانه‌ای مربوط به تأثیرات این پدیده بر رژیم سیلاب حوضه‌های مختلف دنیا، اختصاص یافته است. در بخش دوم، مواد و روش‌های مورد نیاز این تحقیق معرفی می‌شود و در بخش آخر، به بحث و نتیجه‌گیری در مورد نتایج به دست آمده از این تحقیق اختصاص داده شده است.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مطالعاتی

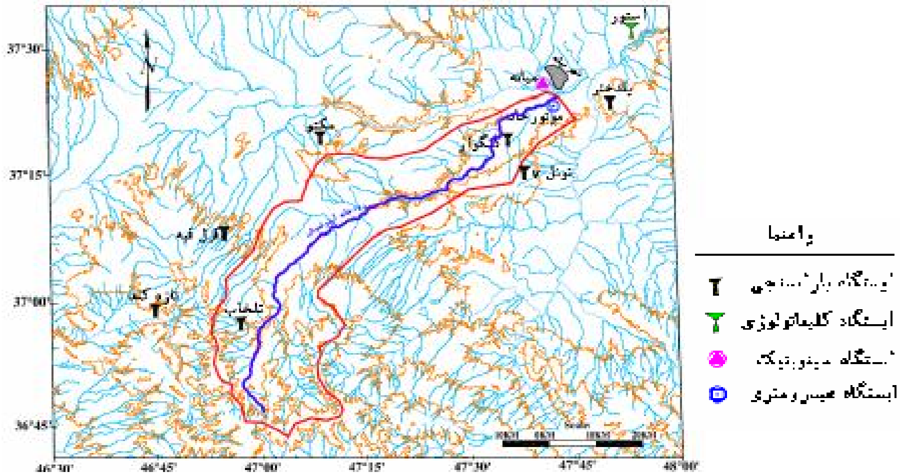
حوضه رودخانه آیدوغموش با مساحت ۱۸۰۲ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه طول‌های شرقی و ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه عرض‌های شمالی قرار گرفته است. رودخانه آیدوغموش به طول حدود ۸۰ کیلومتر از ارتفاعات گرگرد (قور-قور) از توابع هشترود سرچشمه گرفته و به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد. این حوضه در شمال مجاور حوضه آبریز قرنقوچای و در جنوب مجاور حوضه آبریز آجی‌چای است. ارتفاع این حوضه از ۱۱۰۰ متر تا ۲۵۰۰ متر متغیر است. همچنین آبدهی سالانه آن ۱۷۰ میلیون متر مکعب و متوسط بارش سالانه ۳۷۸ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱).

مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه در جدول ۱ آورده شده است.

در ابتدا لازم بود داده‌های دما و بارش و دبی روزانه ایستگاه‌های حوضه آیدوغموش تصحیح و تکمیل شده و سپس متوسط متغیرهای اقلیمی حوضه محاسبه گردد.

برای متغیر دما داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک میانه به عنوان مبنا انتخاب و با توجه به اختلاف رقوم این ایستگاه و رقوم متوسط حوضه آیدوغموش، با استفاده از گرادیان دما و ارتفاع، داده‌های دمای مربوط به متوسط حوضه محاسبه شد. برای متغیر بارش نیز پس از تطویل و تکمیل داده‌های روزانه

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]



شکل۱. حوضه رودخانه آیدوغموش و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

جدول۱. نام و نوع ایستگاه‌ها در محدوده حوضه آیدوغموش

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

برای تمامی ایستگاه‌های موجود، بارندگی روزانه متوسط حوضه از طریق لحاظ نمودن رقوم هر ایستگاه نسبت به رقوم متوسط حوضه به دست آمد. لازم به‌ذکر است به‌دلیل آن که اکثر ایستگاه‌های موجود در حوضه تنها داده‌های مربوط به دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ را پوشش می‌دهند، لذا این دوره به‌عنوان دوره پایه محاسبات انتخاب گردید.

۲- تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آتی

در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود که معتبرترین آنها استفاده از مدل‌های AOGCM است (۱۱، ۱۳ و ۱۶). مدل‌های AOGCM بر پایه قوانین فیزیکی که به‌وسیله روابط ریاضی ارائه می‌شود استوار هستند. این روابط در یک شبکه سه‌بعدی در سطح کره زمین حل می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی اقلیم کره زمین فرآیندهای اصلی اقلیمی (اتمسفر، اقیانوس، سطح زمین، یخ پوسته و زیست کره) در مدل‌های فرعی جداگانه جفت شده و مدل‌های AOGCM را تشکیل می‌دهند. روابط ریاضی این مدل‌ها در شبکه‌های سه بعدی، با مقیاس مکانی افقی ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر و ۱۰ تا ۲۰ لایه در اتمسفر و ۳۰ لایه در اقیانوس حل می‌شوند. تاکنون مدل‌های گردش عمومی مختلفی در مراکز مختلف تحقیقاتی تدوین و طراحی شده است. از آن جمله می‌توان به مدل‌های ECHAM4، HadCM3، CSIRO، CGCM2، GFDL-30، NCAR و CCSR اشاره کرد (۷). از آنجا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی بوده و از طرفی تعیین میزان انتشار این گازها در دوره‌های آتی به طور قطعی امکان‌پذیر نیست، از این رو سناریوهای مختلفی که در برگیرنده چگونگی تغییرات این گازها در آینده می‌باشد ارائه شده که سناریوهای انتشار (Emission Scenario) نامیده می‌شوند. IPCC در سال ۱۹۹۸ سری جدید سناریوهای انتشار را با نام SRES ارائه داد. جدول ۲ برخی از ویژگی‌های چهار سناریوی شاخص از مجموعه این سناریوها را در سال ۲۱۰۰ نشان می‌دهد. در این تحقیق از خروجی مدل HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان، تحت سناریوی A2 از مجموعه سناریوهای انتشار استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات این مدل را نشان می‌دهد (۷).

۳- تولید سناریوی تغییر اقلیم (Climate Change Scenario)

به دلیل بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM، شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی همراه با اغتشاش (Noise) است. به‌منظور حذف این اغتشاشات، معمولاً به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای این داده‌ها استفاده می‌شود. بنابراین 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 (در اینجا ۲۰۶۹-۲۰۴۰) و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (۱، ۷، ۹، ۱۴ و ۱۶).

$$\Delta T_i = \left(\overline{T}_{GCM,fut,i} - \overline{T}_{GCM,base,i}\right) \qquad [۱]$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\overline{P}_{GCM,fut,i}}{\overline{P}_{GCM,base,i}}\right) \qquad [۲]$$

در روابط فوق ΔT_i و ΔP_i به‌ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین دراز مدت۳۰ ساله برای هر ماه (۱۲ ≥ i ≥۱)، $\overline{T}_{GCM,fut,i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا ۲۰۶۹-۲۰۴۰)، $\overline{T}_{GCM,fut,i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای هر ماه است. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

۴- کوچک مقیاس کردن (Downscaling) مکانی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی (Resolution) آنها، به‌لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه مورد مطالعه است. 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 (۱۶).

۵- کوچک مقیاس کردن زمانی

در این تحقیق به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌های طرح به لحاظ زمانی از روش عامل تغییر (Change factor) استفاده می‌شود. در روش عامل تغییر برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) افزوده می‌شود:

$$T = T_{obs} + \Delta T \qquad [۳]$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \qquad [۴]$$

در روابط فوق Tobs بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (در اینجا روزانه) در دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱)، T سری زمانی دما حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]

جدول ۲. مشخصات سناریوهای انتشار SRES در سال ۲۱۰۰ نسبت به ۱۹۹۰ (۷)

خصوصیات سناریو	۱۹۹۰	A1	A2	B1	B2
جمعیت (بیلیون نفر)	۵/۳	۷/۱	۱۵/۱	۷/۰	۱۰/۴
غلظت CO_2 (ppmv)	۳۵۴	۶۸۰	۸۳۴	۵۴۷	۶۰۱
تغییر متوسط دمای میانگین کره زمین (^0C)	-	۲/۵ (۱/۷-۳/۷)	۳/۱ (۲/۱-۴/۴)	۲/۰ (۱/۴-۳/۰)	۲/۱ (۱/۵-۳/۱)
افزایش جهانی سطح آب دریا (cm)	-	۵۸ (۲۳-۱۰۱)	۶۲ (۲۷-۱۰۷)	۵۰ (۱۹-۹۰)	۵۲ (۲۰-۹۳)
GDP جهانی ($10^{12}$$)	۲۱	۵۵۰	۲۴۳	۳۲۸	۲۳۵

جدول ۳. مشخصات مدل HadCM3 (۷)

	دقت مکانی AGCM (درجه) (طول*عرض)	دقت مکانی OGCM (درجه) (طول*عرض)	دوره شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در گذشته	طول دوره شبیه‌سازی (سال)	سناریوهای شبیه‌سازی شده SRES	مرجع
HadCM3	۲/۵*۳/۷۵	۲/۵*۳/۷۵	CO_2: ۱۸۶۰-۱۹۸۹ SO4: ۱۸۶۰-۱۹۸۹	دوره کنترل: ۲۴۰ سناریوهای SRES: ۲۰۹۹-۱۹۵۰	A1, A2, B1, B2	Gorden *et al*, 2000

می‌باشد. در رابطه ۴ برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

۶- شبیه‌سازی بارش- رواناب

به‌منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای اقلیمی بر رواناب استفاده از مدل‌های بارش- رواناب ضروری است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی بارش- رواناب روزانه از روش ارائه شده توسط Jakeman و Hornberger (۱۹۹۳) (مدل IHACRES) استفاده می‌شود (۸). اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش (Non- linear module) و مدول خطی هیدروگراف (Linear unit hydrograph module) تشکیل می‌شود. به این منظور در ابتدا بارندگی (rk) و دما (tk) در هر گام زمانی k توسط مدول غیر خطی، به بارندگی مؤثر uk تبدیل شده و سپس به‌وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۲).

به‌منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر از ضریب رطوبتی حرارتی (Catchment Wetness Index) که با sk (0<sk<1) نشان داده می‌شود، استفاده می‌گردد:

$$u_k = s_k \times r_k \qquad [۵]$$

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

$$s_k = C \times r_k + \left(1 - \frac{1}{t_w(t_k)}\right) s_{k-1} \qquad s0=0 \qquad [۶]$$

$$t_w(t_k) = t_w e^{0/062\, f(R-t_w)} \qquad t_w(t_k) > 1 \qquad [۷]$$

در رابطه ۷ $t_w(t_k)$ مقدار شاخص sk را در رابطه ۶ در هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد کنترل می‌کند که در آن: R برابر دمای مرجع، t_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]

شکل ۲. چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب همراه با مدول‌های خطی و غیرخطی در روش ارائه شده توسط Jakeman و Hornberger (۱۹۹۳)

(Catchment drying time constant) و f فاکتور تعدیل دما (Temperature modulation factor) است. در رابطه ۶ پارامتر C به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره کالیبراسیون یکسان گردد (۸).

در ابتدا می‌بایست مدل IHACRES برای حوضه آیدوغموش مورد واسنجی قرار گیرد. برای این کار از داده‌های مشاهداتی دما، بارش و دبی روزانه حوضه آیدوغموش در دوره پایه استفاده می‌گردد. پس از کالیبراسیون مدل، رواناب روزانه این حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با معرفی داده‌های دما و بارش کوچک مقیاس شده برای حوضه، مورد شبیه‌سازی قرار خواهد گرفت.

۷- تحلیل دبی‌های حداکثر

در تحلیل رژیم دبی‌های حداکثر، رابطه واحدی را بایستی بین بزرگی و دوره برگشت مربوط به آن پیدا کرد. در این تحقیق از روش سری حداکثر سالانه (Annual Maximum, AM) استفاده می‌شود (۱۰). بدین منظور بعد از تولید سری زمانی رواناب روزانه برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰، مقادیر دبی حداکثر سالانه مربوط به این سری مشخص شده و تابع توزیع احتمالاتی (Probability Distribution Function, Pdf) آن تعیین می‌گردد. در نهایت با مقایسه Pdf دبی‌های حداکثر دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با Pdf دبی‌های حداکثر دوره مشاهداتی، چگونگی تغییرات رژیم دبی حداکثر حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه تعیین می‌گردد. در این تحقیق، تغییرات دو شاخص شدت و فراوانی دبی حداکثر به صورت زیر تحلیل می‌شود:

۱- شدت دبی: مقایسه تغییرات شدت دبی‌های حداکثر مختلف دوره آتی و دوره مشاهداتی، در دوره‌های بازگشت ثابت

۲- فراوانی دبی: مقایسه تغییرات دوره‌های بازگشت دبی‌های حداکثر دوره آتی و دوره مشاهداتی، در دبی‌های با شدت ثابت

نتایج و بحث

۱- بررسی عملکرد مدل HadCM3 در شبیه‌سازی دما و بارندگی حوضه آیدوغموش در دوره پایه

به‌منظور بررسی عملکرد مدل HadCM3 در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی حوضه آیدوغموش، مقادیر دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط این مدل در دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید. جدول ۱ نام ایستگاه‌های انتخابی و شکل ۱ موقعیت آنها را برای انجام محاسبات دما، بارش و دبی نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی وضعیت متغیرهای اقلیمی HadCM3 در دوره پایه، در ابتدا فایل داده‌های ماهانه دما و بارندگی این مدل در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ تهیه گردید. این فایل حاوی سری زمانی متغیرهای اقلیمی سلول‌های محاسباتی محاط بر کره زمین است که توسط مدل HadCM3 شبیه‌سازی شده‌اند (۵). در این تحقیق از برنامه (GCM-RDP, GCM- Data Program) استفاده شده است. این برنامه 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 میان آن واقع شده (سلول اصلی) را استخراج نماید. پس از آن، میانگین ۳۰ ساله (۲۰۰۰-۱۹۷۱) ماهانه دما و بارندگی منطقه از مدل فوق محاسبه شد. نهایتاً این مقادیر با میانگین ۳۰ ساله ماهانه

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]

دما و بارندگی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه بین مدل و داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند مدل HadCM3، میانگین دمای کمتری را در ماه‌های تابستان و پاییز نسبت به داده‌های مشاهداتی تخمین زده است. از طرف دیگر تفاوت مقادیر شبیه‌سازی شده دما و داده‌های مشاهداتی در فصل‌های زمستان و بهار بسیار کم و قابل اغماض است. این در حالی است که عملکرد مدل HadCM3 در شبیه‌سازی داده‌های بارش منطقه ضعیف‌تر از دما بوده به‌گونه‌ای که اختلاف مقادیر بارش شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی، بیش از مقادیر اختلاف دما در اکثر ماه‌ها بوده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که مدل تنها داده‌های بارش ماه‌های بهار را به‌خوبی تخمین زده و در فصل پاییز تخمین‌ها کمتر از مقادیر واقعی هستند. در صورتی که با در نظر گرفتن فصول زمستان و بهار به‌عنوان فصول پر بارش منطقه، مدل نتایج قابل قبولی را برای ماه‌های این دو فصل شبیه‌سازی کرده است.

جهت بررسی کمی عملکرد مدل، از معیارهای عملکرد ضریب همبستگی (Correlation Coefficient, ρ)، جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE) و متوسط خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE) استفاده شد:

$$r = \frac{\frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}(X_s - m_s)(X_o - m_o)}{s_s \times s_o} \qquad [8]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{m=1}^{n}\frac{(X_s - X_o)^2}{n}} \qquad [9]$$

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^{n}|X_s - X_o|}{n} \qquad [10]$$

در این روابط X داده‌ها، μ میانگین داده‌ها، σ انحراف معیار داده‌ها و n برابر تعداد داده‌هاست. اندیس s بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس o بیانگر داده‌های مشاهداتی است. جدول ۴ معیارهای عملکرد مدل در شبیه‌سازی دما و بارندگی حوضه مطالعاتی در دوره پایه را نشان می‌دهد.

عملکرد مدل در شبیه‌سازی مقادیر دما و بارندگی برای منطقه مورد مطالعه، نشان از بالا بودن ضریب همبستگی و پایین بودن نسبی شاخص‌های خطا دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی (دما و بارندگی) حوضه آیدوغموش داشته و می‌توان به خروجی‌های آن برای این حوضه اعتماد داشت.

۲- محاسبه سناریوهای اقلیمی دما و بارندگی در دوره آتی

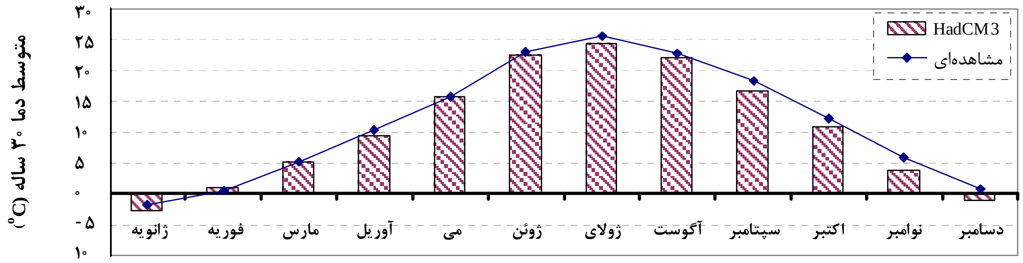
برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم حوضه، ابتدا سری زمانی دما و بارش ماهانه حاصل از مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ به‌وسیله برنامه GCM-RDP تهیه شد. پس از آن متوسط درازمدت ماهانه این دو متغیر در دوره آتی و دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) شبیه‌سازی شده توسط همان مدل محاسبه گردید. نهایتا با استفاده از روابط ۱ و ۲ سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی منطقه محاسبه گردید. نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انتظار می‌رود دمای حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ بین ۱/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. این افزایش برای فصول زمستان و بهار بین ۱/۵ تا ۳ درجه و برای فصول تابستان و پاییز بین ۱/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد است. این در حالی است که حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ شاهد افزایش بارندگی برای فصول پاییز و زمستان و کاهش آن برای دیگر فصول خواهد بود. پس از به‌دست آوردن سناریوهای تغییر اقلیم حوضه، با استفاده از روابط ۳ و ۴، سری زمانی روزانه دما و بارندگی حوضه محاسبه شد. لازم به‌ذکر است که در روابط ۳ و ۴، از سری زمانی روزانه متوسط حوضه برای متغیرهای مشاهداتی استفاده شد.

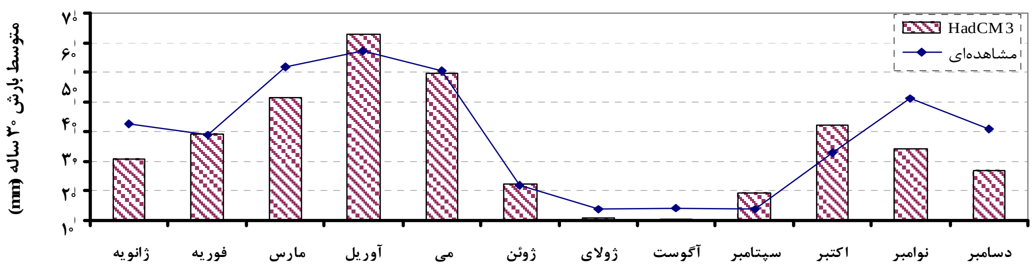
۳- شبیه‌سازی بارش- رواناب

برای شبیه‌سازی رواناب روزانه حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰، در ابتدا مدل IHACRES برای دوره

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]



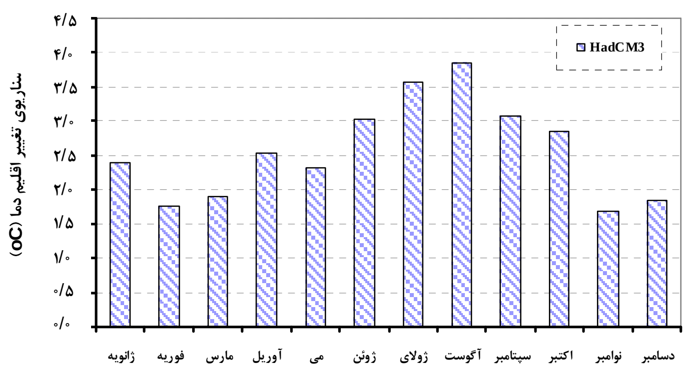
شکل ۳. میانگین ۳۰ ساله ماهانه متوسط دمای مشاهداتی حوضه و مدل HadCM3



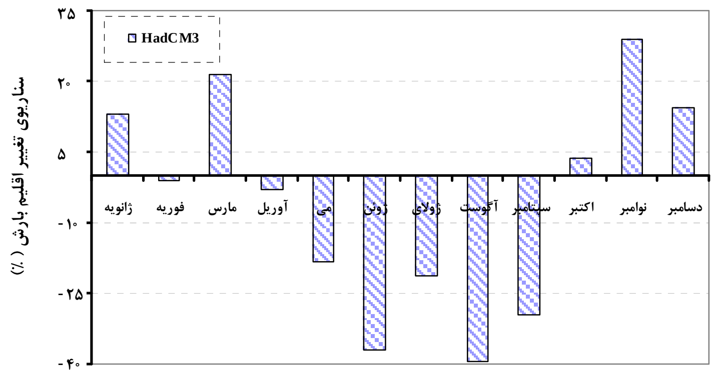
شکل ۴. میانگین ۳۰ ساله ماهانه بارندگی مشاهداتی حوضه و مدل HadCM3

جدول ۴. شاخص های عملکرد مدل HadCM3 نسبت به داده‌های مشاهداتی دما و بارندگی

متغیر اقلیمی	دما			بارش		
معیارعملکرد / مدل	ρ (%)	RMSE (oC)	MAE (oC)	ρ (%)	RMSE (mm)	MAE (mm)
HadCM3	۹۹/۶	۱/۲	۱/۰	۹۱/۰	۸/۷	۶/۸



شکل ۵ . سناریوهای تغییر اقلیم دما از مدل HadCM3



شکل ۶. سناریوهای تغییر اقلیم بارندگی از مدل HadCM3

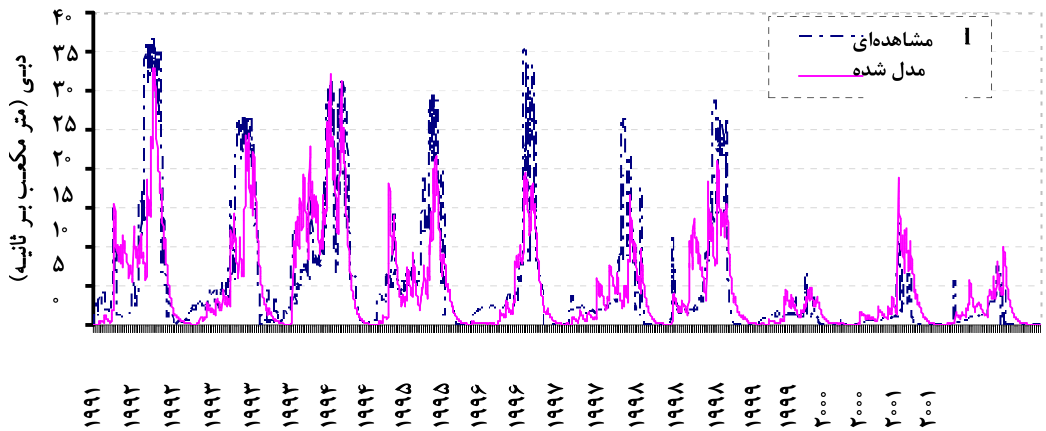
۲۰۰۱-۱۹۹۱ مورد واسنجی و برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۷۱ مورد صحت‌یابی قرار گرفت. برای این‌کار از آمار روزانه دما و بارش معرف حوضه و آمار دبی روزانه ایستگاه موتورخانه استفاده گردید. نتایج عملکرد مدل در دوره‌های واسنجی و صحت‌یابی، به‌وسیله مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و استفاده از معیارهای عملکرد (روابط ۸، ۹ و ۱۰) محاسبه و نتایج نهایی در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که دوره ۲۰۰۱-۱۹۹۱ (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 سپتامبر ۱۹۷۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۱) برای صحت‌یابی مدل استفاده گردید. نتایج شکل ۸ نشان از عملکرد قابل قبول مدل (با ضریب هم‌بستگی (r) ۰/۷۰ و معیار خطای (RMSE) ۶/۸۴ در شبیه‌سازی رواناب و دبی‌های حداکثر حوضه دارد. با توجه به نتایج به دست آمده باید توجه داشت که مدل واسنجی شده برای حوضه به‌طور کلی جریان‌های کم حوضه را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. اما در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر که مورد نظر این مقاله نیز می‌باشد، در بعضی از سال‌ها ناتوان بوده و مقادیر کمتری را شبیه‌سازی کرده است. در این راستا متوسط خطای ۶ متر مکعب بر ثانیه در دوره واسنجی نیز بیشتر به‌دلیل عدم تطابق در دبی‌های حداکثر بوده است. با این وجود بررسی تعداد سال‌هایی که مدل، دبی حداکثر کمتری را نسبت به مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده، نشان می‌دهد که مدل در بیش از ۷۰ درصد موارد (۷ سال از بین ۱۰ سال در دوره واسنجی) موفق عمل کرده که نشان از قابل قبول بودن استفاده از آن در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر آینده است.

پس از واسنجی مدل IHACRES، سری زمانی روزانه دما و بارندگی حوضه در دوره آتی (حاصل از بخش ۳-۲) به مدل معرفی شده و سری زمانی روزانه رواناب حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد.

شکل ۹ مقایسه میانگین دراز مدت ماهانه دبی دوره آتی و دوره مشاهداتی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل ملاحظه می‌شود که دبی حوضه در ماه آخر فصل تابستان و زمستان و ماه اول فصل بهار در دوره آتی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر تمامی ماه‌های فصل پاییز، دو ماه ابتدایی فصل زمستان و دو ماه انتهائی فصل بهار شاهد افزایش دبی در دوره‌های آتی خواهد بود. باید توجه داشت که تغییرات دبی در فصل تابستان قابل توجه نمی‌باشد. در مجموع نتایج نشان می‌دهد که دبی حوضه در دوره‌های آتی افزایش می‌یابد. هم‌چنین می‌توان انتظار داشت که دبی‌های حداکثر نیز در دوره‌های آتی افزایش یابد.

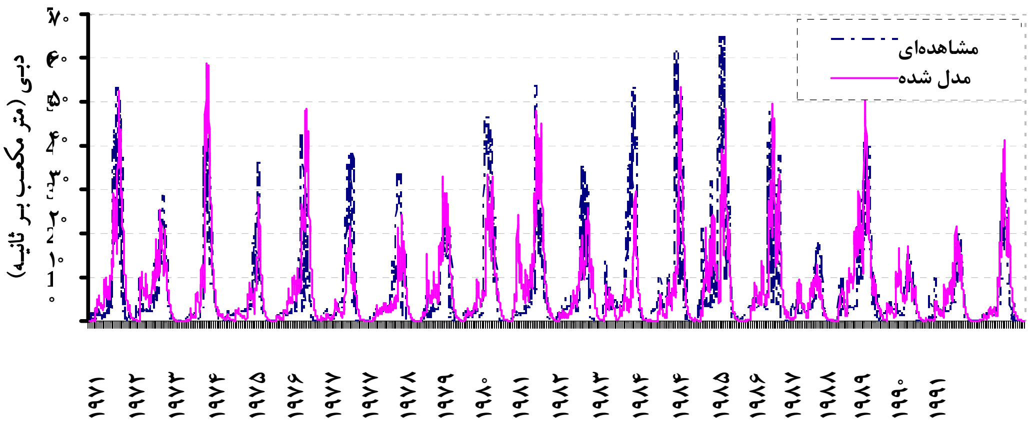
۴- بررسی رژیم دبی‌های حداکثر در دوره آتی

بعد از تولید رواناب روزانه دوره آتی، سری زمانی مقادیر دبی حداکثر سالانه این دوره محاسبه شده و تابع توزیع احتمالاتی (Pdf) آن تعیین گردید. همین مراحل برای تعیین Pdf دبی



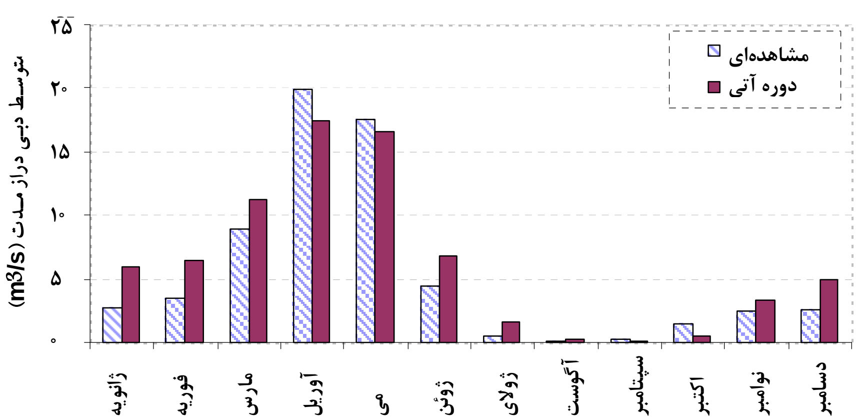
r=۰/۷۹ RMSE =۴/۶۲ MAE =۱/۶۶

شکل ۷. مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه آیدوغموش با رواناب مدل شده در دوره واسنجی ۲۰۰۱- ۱۹۹۱

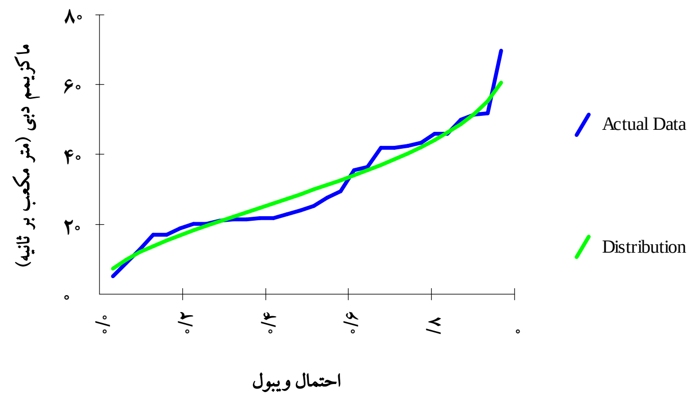


r=۰/۷۰ RMSE =۶/۸۴ MAE =۲/۱۰

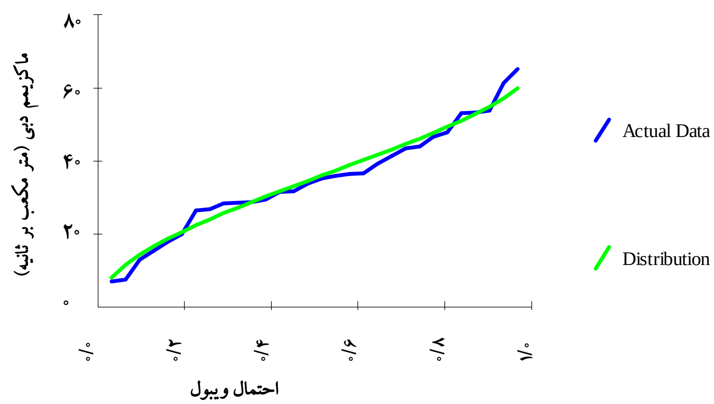
شکل ۸ . مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه آیدوغموش با رواناب مدل شده در دوره صحت‌یابی ۱۹۹۱- ۱۹۷۱



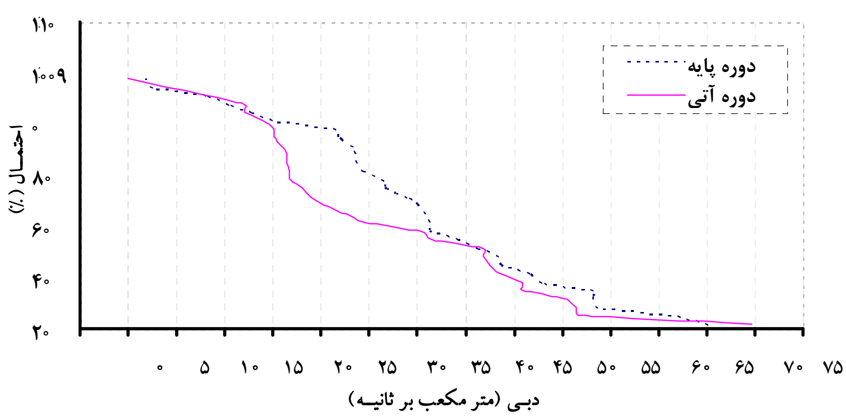
شکل ۹. مقایسه میانگین دراز مدت ماهانه رواناب دوره آتی و دوره مشاهداتی



شکل ۱۰. تعیین cdf مقادیر دبی حداکثر سالانه دوره ۲۰۶۹- ۲۰۴۰

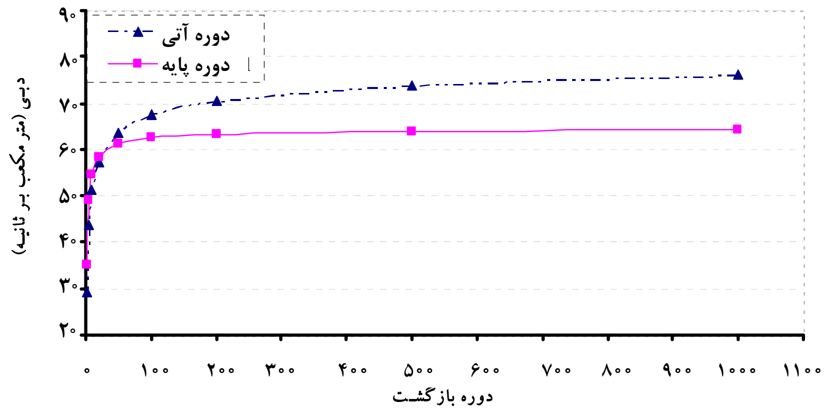


شکل ۱۱. تعیین cdf مقادیر دبی حداکثر سالانه دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات دوره بازگشت دبی‌های حداکثر حوضه آیدوغموش در دوره آتی و دوره پایه برای دبی‌های ثابت

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات شدت دبی‌های حداکثر حوضه آیدوغموش در دوره آتی و دوره پایه برای فراوانی وقوع ثابت

حداکثر سالانه دوره پایه انجام گردید. نتایج نشان داد که توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ بهترین برازش را برای داده‌های دبی حداکثر در هر دو دوره آتی و پایه دارد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

به‌منظور بررسی چگونگی تغییر رژیم دبی‌های حداکثر رودخانه آیدوغموش در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ از دو شاخص شدت دبی در دوره بازگشت‌های برابر و دوره بازگشت‌های دبی در شدت‌های یکسان استفاده گردید. شکل ۱۲ چگونگی تغییر دوره بازگشت دبی‌های حداکثر در دوره آتی و دوره پایه حوضه آیدوغموش را در دبی‌های یکسان نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل مشخص است که احتمال وقوع دبی حداکثر سالانه با مقدار معین در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود.

شکل ۱۳ تغییرات شدت دبی‌های حداکثر مختلف دوره آتی و دوره مشاهداتی را برای دوره بازگشت‌های ثابت نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که شدت دبی‌های حداکثر برای دوره بازگشت‌های تا ۵۰ سال تفاوت چندانی نکرده و با افزایش دوره بازگشت، شدت آن در دوره آتی افزایش خواهد یافت. البته باید توجه داشت که این مقدار افزایش، قابل توجه نبوده و حداکثر به ۱۰ متر مکعب بر ثانیه خواهد رسید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم دبی‌های حداکثر حوضه رودخانه آیدوغموش آذربایجان شرقی در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت سناریوی A2 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج در مجموع نشان از افزایش دمای دوره آتی نسبت به دوره پایه دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود، دمای ماه‌های مختلف، بین ۱/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته باشد. این در حالی است که فصول پاییز و زمستان شاهد افزایش بارندگی و فصول تابستان و بهار شاهد کاهش بارندگی خواهند بود. شبیه‌سازی رواناب روزانه حوضه در دوره آتی و مقایسه مقادیر دبی‌های حداکثر دوره آتی و دوره مشاهداتی حاکی از تغییر رژیم دبی حداکثر رودخانه است. اما باید توجه داشت که مقدار افزایش دبی حداکثر منطقه در دوره بازگشت‌های بیش از ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه حداکثر به ۱۰ متر مکعب خواهد رسید. بنابر این، این امر نمی‌تواند روی سازه‌هایی که براساس شدت دبی‌های گذشته طراحی شده‌اند، تأثیر چندانی بگذارد. البته باید توجه داشت که تغییرات به دست آمده برای دبی‌های حداکثر، تنها یک جواب از محدوده تغییرات ممکن برای دبی حداکثر است.

به‌طور کلی در این مقاله یک روش برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم دبی‌های حداکثر یک حوضه ارائه شده است. با

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.53.3.0]

این وجود باید توجه داشت که به‌دلیل استفاده از روش کوچک مقیاس کردن تناسبی و عامل فاکتور، در این تحقیق تنها میانگین دراز مدت پارامترهای دما و بارش دوره آتی نسبت به دوره پایه تغییر کرده و نوسانات اقلیمی دوره آتی ثابت مانده است. بنابراین تغییرات رژیم دبی‌های حداکثر حوضه تنها تحت تأثیر تغییرات میانگین‌های دراز مدت پارامترهای اقلیمی قرار گرفته است. بدین منظور می‌بایست با استفاده از روش‌های آماری کوچک مقیاس کردن، علاوه بر تغییرات میانگین پارامترهای اقلیمی تأثیر نوسانات این متغیرها را نیز بر دبی‌های حداکثر حوضه بررسی کرد. از طرف دیگر به‌دلیل وجود عدم قطعیت در مدل‌های مختلف AOGCM، روش‌های مختلف کوچک مقیاس کردن و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، پارامترهای اقلیمی مؤثر بر رژیم دبی‌های حداکثر حوضه تنها یک سناریو نبوده و سناریوهای مختلفی را در بر خواهد گرفت. این در حالی است که پارامترهای اقلیمی ارائه شده در این تحقیق تنها حاصل از یک مدل AOGCM و تحت یک سناریوی انتشار اقلیمی می‌باشد. لذا مقادیر دبی‌های حداکثر شبیه‌سازی شده برای دوره آتی تنها نمایانگر یک جواب از محدوده جواب قابل انتظار است. بنابراین عدم لحاظ عدم قطعیت‌های مؤثر بر متدولوژی تحقیق، می‌تواند بر قطعیت نتایج نهائی تأثیر گذاشته و برنامه‌ریزی‌های حاصل از این نتایج را با شک و تردید مواجه سازد. هم‌چنین باید توجه داشت که چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب و روابط استفاده شده در مدلسازی آن، می‌تواند بر نتایج نهایی رواناب تأثیر گذار باشد. به‌عنوان مثال در مدل بارش- رواناب استفاده شده در این تحقیق، ذوب برف که می‌تواند بر میزان رواناب تأثیر بگذارد نادیده گرفته شده است. در این راستا می‌توان از مدل‌های مفهومی مانند SWAT استفاده کرد. نهایتاً باید ذکر شود که در حال حاضر محققین این مقاله در حال تحقیق روی ارائه یک متدولوژی جدید برای بررسی تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم دبی‌های حداکثر یک حوضه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف هستند که نتایج آن در مقالات آتی ارائه خواهد شد.

منابع مورد استفاده

۱. مساح بوانی، ع. ر. و س. مرید. ۱۳۸۴. اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۹(۴):۱۷-۲۷.

2. Alison, L.K., G.J. Richard and S.R. Nicholas. 2004. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. J. Hydrol. 318: 163-172
3. Ekstrom, M., H.J. Fowler, G.G. Kilsby and P.D. Jones. 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. J. Hydrol. 300: 234-251
4. Gellen, D. and E. Roulin. 1998. Stream flow response of Belgian to IPCC climate change scenarios. J. Hydrol. 210: 242-258.
5. IPCC-DDC. 1988. http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/
6. IPCC. 2007. Climate Change 2007. PP.1-8. *In*: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (Eds.), The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
7. IPCC-TGCIA, 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Carter, T.R., M. Hulme and M. Lal (Eds.), Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
8. Jakeman, A. J. and G. M. Hornberger. 1993. How Much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? Water Resour. Res. 29(8): 2637-2649.
9. Jones, P.D. and M. Hulme. 1996. Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations. Intl. J. Climatol. 16: 361-377
10. Kite, G.W. 1977. Frequency and Risk Analysis in Hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins CO., USA.

11. Lane, M.E., P. H. Kirshen and R.M. Vogel. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. ASCE, J. Water Resour. Planning and Manag. 125(4): 194-204
12. Mirza, M. 2001. Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. Global Environ. Change 12: 137-138
13. Mitchell, T.D. 2003 Pattern Scaling: An Examination of Accuracy of the Technique for Describing Future Climates. Climatic Change 60: 217-242
14. Prudhomme, CH., D. Jakob and C. Svensson. 2001. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. J. Hydrol. 277: 1-23
15. Steele- Dunne, S., P. Lynch, R. McGrath, T. Semmler, SH. Wang, J. Hanafin and P. Nolan. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. J. Hydrol. 356: 28-45.
16. Wilby R.L. and I. Harris. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resour. Res. 42:10 pp.