

شبیه‌سازی جریان سطحی از طریق کوچک‌مقیاس‌سازی آماری داده‌های اقلیمی: حوضه دریاچه ارومیه

مهسا میردشتوان^۱، آرش ملکیان^{۲*}، محسن محسنی ساروی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۰۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۸/۳۰)

چکیده

با توجه به اهمیت بررسی پدیده تغییر اقلیم، حوضه دریاچه ارومیه به عنوان یکی از حوضه‌های مهم آبخیز کشور به لحاظ اهمیتی که از جنبه‌های گوناگون زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و غیره دارد، برای مطالعه تغییر اقلیم و آثار آن بر جریان سطحی انتخاب شد. در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی، خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 با استفاده از روش SDSM برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی کوچک‌مقیاس شد و سپس با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES جریان سطحی در مقیاس محلی شبیه‌سازی شد. نتایج کوچک‌مقیاس‌سازی نشان داد بارندگی در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی به میزان ۰/۱ میلی‌متر در روز تحت سناریوی A2 کاهش خواهد یافت و تحت سناریوی B2 افزایشی معادل ۰/۰۳ میلی‌متر خواهد داشت. کاربرد مدل HadCM3 در حوضه نشان داد دما در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی به میزان ۱/۲ و ۱/۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب تحت سناریوهای A2 و B2 افزایش خواهد یافت. نتایج شبیه‌سازی جریان سطحی توسط مدل IHACRES نشان داد جریان سطحی در دوره آتی به میزان ۲۴/۶ درصد تحت سناریوی A2 افزایش و به میزان ۴/۶ درصد تحت سناریوی B2 کاهش می‌یابد. بر اساس ارزیابی‌های سناریوهای اقلیمی، تغییر اقلیم آثار متفاوتی بر منابع آب حوضه خواهد داشت که مطالعه آثار با روش‌های مختلف نتایج بهتری را برای تصمیم‌گیران به منظور مدیریت حوضه فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌گان: حوضه دریاچه ارومیه، کوچک‌مقیاس‌سازی، IHACRES، SDSM.

مقدمه

در گرم شدن سیستم اقلیمی هیچ ابهامی وجود ندارد، به طوری که در حال حاضر شواهد بیان کننده افزایش میانگین دمای جو و اقیانوس هاست؛ همچنین ذوب گسترده برفها و یخها و افزایش سطح متوسط آب دریاها به طور جهانی شاهد دیگری بر این مدعاست. از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۵ میلادی، بارندگی به طور معناداری در بخش‌های شرقی آمریکای شمالی و جنوبی، اروپای شمالی و آسیای شمالی و مرکزی افزایش یافته، اما در منطقه مدیترانه و بخش‌هایی از آسیای جنوبی کاهش یافته است. تغییر متغیرهای اقلیمی سیستم‌های هیدرولوژیک را تحت تأثیر قرار خواهد داد که این تغییرات در سیستم‌های هیدرولوژیک مناطق خشک و نیمه خشک محسوس تر است [۱ و ۲].

برای درک ماهیت پیچیده اتمسفر و پیش‌بینی تغییرات آن در آینده، باید مدلی از اقلیم با استفاده از قوانین و روابط ریاضی شبیه سازی کرد. مدل‌های گردش عمومی جو در دهه ۱۹۵۰ به منظور شبیه‌سازی همه ویژگی‌های سه بعدی اقلیم، از ریشه مشابهی تشکیل شده‌اند و این مدل‌ها تا کنون جامع‌ترین مدل‌های اتمسفری هستند. مدل‌های گردش عمومی جو، معادلات اولیه را که بیان کننده چگونگی و اندازه حرکت و حفظ پهنه آب و بخار آن است تحلیل کرده و فرایندهای فیزیکی مانند تشکیل ابر و انتقال رطوبت و گرما را در جو و سطح زمین تشریح می‌کنند. در مدل‌های یادشده، وضعیت جو زمین در پاره‌ای از نقاط شبکه از یک شبکه منظم واقع در روی زمین و سطوح معین جو تعیین شده و سپس به کمک روش‌های عددی، معادلات اولیه در هر یک از نقاط آن حل می‌شود. با وجود تعدد روش‌های موجود، کلیه مدل‌های گردش عمومی از یک روش زمانی پله‌ای و یک برنامه درونیابی بین نقاط شبکه استفاده می‌کنند [۳].

اگرچه مدل‌های گردش عمومی جو ابزار پیش‌بینی ارزشمندی هستند، به دلیل قدرت تفکیک مکانی کم، برای بررسی تغییرپذیری^۲ و تغییر اقلیم در مقیاس‌های کوچک مناسب نیستند [۳ و ۴]. در نتیجه، تصمیم‌گیری که به اطلاعاتی درباره آثار بالقوه تغییر اقلیم بر تولید گیاهی،

هیدرولوژی، پراکنش گونه‌ها و غیره در مقیاس‌های کوچک نیاز دارند، باید داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس را، که در واقع خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو هستند، به طریقی کوچک مقیاس کنند. یکی از روش‌هایی که برای کوچک مقیاس سازی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است، کوچک مقیاس سازی آماری است [۵]. کوچک مقیاس کردن آماری شامل توسعه روابط بین متغیرهای بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها^۴) و متغیرهای سطحی محلی (پیش‌بینی شده‌ها^۵) می‌شود. در شکل عمومی، پیش‌بینی شده‌ها به عنوان تابعی از پیش‌بینی کننده‌ها مطرح می‌شوند، اما انواع دیگری مانند رابطه بین پیش‌بینی کننده‌ها و پارامترهای توزیع آماری پیش‌بینی شده‌ها و یا فراوانی مقادیر حدی پیش‌بینی شده‌ها نیز به کار رفته‌اند [۶]. سناریوهای انتشار^۶ برای مطالعه آثار تغییر اقلیم در زمینه‌های مختلف ارائه شده‌اند. در این سناریوها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به پیش‌بینی محرک‌هایی^۷ مانند میزان جمعیت، میزان رشد اقتصادی و میزان اهمیت به محیط زیست برای دوره‌های آتی تعیین می‌شود [۲]. در این مطالعه، سناریوهای A2 و B2 برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر جریان سطحی استفاده می‌شوند.

با توجه به اهمیت بحث تغییر اقلیم و آثار این پدیده بر سیستم‌های گوناگون، در سال‌های اخیر و در کشورهای مختلف، پژوهشگران بسیاری درباره این مقوله مهم بررسی و تحقیق کرده‌اند [۷-۱۰]. در ایران نیز پژوهشگران متعددی مطالعاتی در زمینه ارزیابی تغییرات اقلیمی در سطوح حوضه‌ای و منطقه‌ای انجام داده‌اند. عباس‌پور و همکارانش [۱۱] مدل CGCM3.1 را تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 برای پیش‌بینی بارش و دما در ایران استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد تغییرات بارش در ماه‌های پاییز بیشتر از ماه‌های تابستان خواهد بود. آنها برای دو دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ تحت همه سناریوهای استفاده شده افزایش بارش را در قسمت‌های شمالی و کاهش ۴۰ درصدی بارش را برای مناطق جنوب شرقی کشور پیش‌بینی کردند. آنها میزان افزایش دما را از ۳/۲ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای سناریوهای B2 و A2 پیش‌بینی کردند، همچنین نشان دادند

4. Predictors
5. Predictands
6. Emission Scenarios
7. Drivers

1. General Circulation Models(GCMs)
2. Variability
3. Change

است. امروز و همکارانش [۴] آثار تغییر اقلیم بر بیشترین بارش محتمل در حوضه رودخانه چنار - راهدار در جنوب ایران را مطالعه کردند. آنها به این منظور از خروجی‌های مدل‌های HadCM3 و CGCM3 تحت سناریوی A2 و روش‌های کوچک‌مقیاس‌سازی SDSM، CF و LARS-WG استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد بارش‌های حدی و بیشترین بارش محتمل در دهه ۲۰۲۰ میلادی نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱۸/۲ درصد و ۲۷/۳ درصد افزایش خواهد یافت. عباس‌نیا و همکارانش [۱۴] طی پژوهشی به ارزیابی تغییرات دمای بیشینه در دوره‌های آبی با استفاده از مدل‌های HadCM3 و CGCM3 تحت سناریوهای انتشار A2، A1B، B1 و B2 پرداختند. نتایج تحقیق آنها بیان‌کننده افزایش دمای بیشینه به میزان یک تا دو درجه سانتی‌گراد در میانه و پایان قرن ۲۱ میلادی است؛ همچنین نتایج نشان دادند تغییرات دمای بیشینه بر اساس مدل HadCM3 شدیدتر از مدل CGCM3 است.

همان‌گونه که نتایج تحقیقات نشان می‌دهد، روند گرمایش جهانی طی قرن ۲۱ ادامه می‌یابد؛ علاوه بر این مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک نسبت به کمترین تغییرات متغیرهای اقلیمی نظیر بارش و دما حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، درک روابط میان متغیرهای اقلیمی و رژیم‌های هیدرولوژیک در این‌گونه مناطق اهمیت زیادی دارد. هدف مطالعه حاضر ارزیابی و برآورد هیدرولوژیک حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از کوچک‌مقیاس‌سازی آماری خروجی‌های اقلیمی مدل گردش عمومی جو استفاده شده بر اساس سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

مواد و روش‌ها

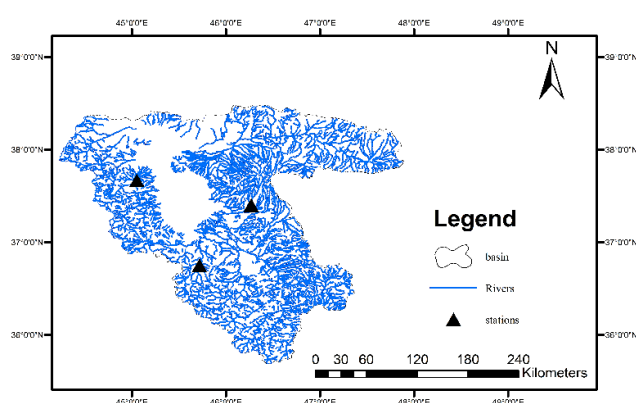
منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، با وسعت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع، حدود سه درصد از مساحت ایران را تشکیل می‌دهد. حوضه یادشده جزء حوضه‌های آبخیز بسته به شمار می‌آید به طوری که کلیه آب‌های سطحی و زیرزمینی، از مناطق پیرامون به سمت دریاچه ارومیه سرازیر می‌شوند. حوضه در ارتفاع بین ۱۲۸۰ تا ۳۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است که پست‌ترین نقطه آن دریاچه ارومیه و دشت‌های وسیع اطراف آن است و مرتفع‌ترین نقطه آن، قله کوه سلان است. از لحاظ

سناریوی A2 بحرانی‌ترین وضعیت را در آینده نشان خواهد داد. صمدی و همکارانش [۱۲] با استفاده از مدل گردش عمومی جو HadCM3 و روش کوچک‌مقیاس‌سازی آماری و نیز شبکه عصبی مصنوعی، جریان رواناب رودخانه را در حوضه کرخه طی سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ میلادی بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد انتخاب الگوریتم کوچک‌مقیاس‌سازی تأثیر مهمی بر برآوردهای رواناب در حوضه یادشده دارد که به ترتیب متأثر از بارش و دمای پیش‌بینی شده است. بر اساس پیش‌بینی‌های SDSM و ANN دمای روزانه به ترتیب تا ۰/۵۸ درجه سانتی‌گراد (۳/۹ درصد) و ۰/۴۸ درجه سانتی‌گراد (۳/۴۸ درصد) افزایش خواهد یافت و نیز بارش روزانه به ترتیب ۰/۱ میلی‌متر (۲/۵۶ درصد) و ۰/۴ میلی‌متر (۲/۸ درصد) نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. نتایج تحقیق بیان‌کننده کاهش متوسط جریان سالانه به میزان ۳/۷ مترمکعب بر ثانیه و ۹/۴۷ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب بر اساس خروجی‌های SDSM و ANN خواهد بود. اشرف واقفی و همکارانش [۱۳] طی تحقیقی آثار تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های منابع آب در حوضه رودخانه کرخه در ایران را بررسی کردند. سناریوهای اقلیمی آینده برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ میلادی با استفاده از مدل جهانی کانادایی^۱ برای سناریوهای A1B، B1 و A2 تولید شدند. سپس، برای پیش‌بینی دسترسی به منابع آب مدل هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب^۲ ساخته شد. نتایج تحقیق نشان داد در قسمت‌های شمالی حوضه آب شیرین در دسترس از ۱۷۱۶ مترمکعب به ازای هر نفر به ۲۶۷۰ مترمکعب به ازای هر نفر افزایش می‌یابد که این امر به‌رغم افزایش ۲۸ درصدی جمعیت در سال ۲۰۲۵ میلادی بر اساس سناریوی B1 است. در بخش جنوبی حوضه، جایی که تعداد زیادی اراضی کشاورزی وجود دارد، دسترسی به آب شیرین تا ۴۴ درصد کاهش می‌یابد. نتایج حسابگر روزهای متوالی بحرانی^۳ بیان‌کننده افزایش ۲۵ درصدی در تکرار و طول دوره‌های خشک در جنوب حوضه است در حالی که افزایش وقایع سیلاب در بخش‌های شمالی و غربی حوضه قابل انتظار است. نتایج تحقیق یادشده نشان‌دهنده تأثیرات مثبت و منفی تغییرات اقلیمی در بخش‌های مختلف حوضه

1. Canadian Global Coupled Model
2. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
3. Critical continuous day calculator

عنوان مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبخیز دریاچه تلقی می‌شوند و در استان کردستان گسترش دارند. ضریب جریان سطحی متوسط سالانه حوضه، ۳۰/۱ درصد است. بیشترین دبی متعلق به سیمینه‌رود است، پس از آن، به ترتیب آجی‌چای و زرینه‌رود قرار می‌گیرند. این سه رودخانه در مجموع ۶۰ درصد همه آبی را که توسط رودخانه‌ها و مسیل‌ها به دریاچه ارومیه می‌ریزند را تشکیل می‌دهند [۱۵]. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را در ایران و ایستگاه‌های بررسی شده نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز دریاچه ارومیه در ایران و ایستگاه‌های بررسی شده در حوضه

متعلق به وزارت نیرو نیز برای واسنجی مدل هیدرولوژیک برای شبیه‌سازی جریان سطحی در دوره آتی نیز استفاده شدند. از مهم‌ترین خصوصیات ایستگاه‌های یادشده آمار بلندمدت و صحت آماری در میان سایر ایستگاه‌های موجود در حوضه است. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های بررسی شده را نشان می‌دهد.

شرایط اقلیمی، حوضه زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل دارد. متوسط میزان بارش در منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که بخش عمده بارش از فصل پاییز تا اواسط بهار رخ می‌دهد. در ماه‌های تابستان در مقایسه با دیگر فصول سال، میزان بارش بسیار اندک است. متوسط دمای سالانه بر حسب ارتفاع بین ۶/۵ تا ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. ماه‌های مرداد و شهریور گرم‌ترین و دی و بهمن سردترین ماه‌های سال هستند. بخش عمده حوضه، دو رودخانه سیمینه‌رود و زرینه‌رود هستند که به



با مطالعه‌ای که روی ایستگاه‌های مختلف حوضه صورت گرفت، داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، مهاباد و مراغه متعلق به سازمان هواشناسی کل کشور، به عنوان ایستگاه‌های مبنا برای کوچک‌مقیاس‌سازی و پیش‌بینی دما و بارش در دوره‌های آتی استفاده قرار شدند. همچنین، داده‌های دبی روزانه متعلق به ایستگاه‌های پل بهراملو، تازه‌کند و پل ازبک

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های بررسی شده

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تأسیس	طول (درجه-دقیقه)	عرض (درجه-دقیقه)	ارتفاع از سطح دریاهای آزاد (متر)
۱	ارومیه	سینوپتیک	۱۹۵۱	۰۵-۴۵	۳۲-۳۷	۱۳۱۵/۹
۲	مهاباد	سینوپتیک	۱۹۸۵	۴۳-۴۵	۴۶-۳۶	۱۳۸۵
۳	مراغه	سینوپتیک	۱۹۸۳	۱۶-۴۶	۲۴-۳۷	۱۴۷۷/۷
۴	پل بهراملو	هیدرومتری	۱۹۵۷	۳۹-۴۵	۵۴-۳۶	۱۲۸۵
۵	تازه‌کند	هیدرومتری	۱۹۷۴	۰۲-۴۶	۵۹-۳۶	۱۲۹۰
۶	پل ازبک	هیدرومتری	۱۹۸۲	۱۱-۴۵	۳۹-۳۷	۱۲۸۵

جدول ۲. مشخصات مدل HadCM3 [۱۶]

مدل	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
HadCM3	۲/۵*۳/۷۵	۲/۵*۳/۷۵	CO2: ۱۹۸۹-۱۸۶۰ SO4: ۱۹۸۹-۱۸۶۰	دوره کنترل: ۲۴۰ سناریوهای: SRES ۲۰۹۹-۱۹۵۰	A1,A2,B1,B2

میلادی) و سرعت کمتر در پیشرفت اقتصادی است. در سناریوی B2 تأکید بر راه حل‌های منطقه‌ای برای تقویت مسائل اجتماعی، اقتصادی و محیط زیست است. جهان تعریف‌شده در این سناریو جهانی ناهمگن با سرعت تغییرات و پیشرفت فناوری کمتر، اما متنوع‌تر است. در این سناریو بر ابتکار عمل جامعه برای یافتن راه حل‌های منطقه‌ای نسبت به راه حل‌های جهانی تأکید شده است [۱۷].

کوچک‌مقیاس‌سازی آماری

استفاده از اطلاعات سلول‌های مدل‌های گردش عمومی جو برای موقعیت‌های مختلفی که درون آن واقع می‌شوند (مانند ایستگاه‌های هواشناسی)، سبب ایجاد خطای بسیار در متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی آن موقعیت می‌شود. SDSM روش کوچک‌مقیاس‌سازی است که بر روابط آماری تکنیک‌های رگرسیون چندگانه خطی میان متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای مشاهده‌ای محلی پایه‌گذاری شده است؛ در واقع SDSM یک روش نمونه‌برداری دومرحله‌ای است، این روش ابتدا متغیر پیش‌بینی‌کننده را با استفاده از روش‌های رگرسیونی ترکیبی و یک روش مولد هواشناسی تصادفی کوچک‌مقیاس کرده و در مرحله دوم بارش را دوباره در محل ایستگاه تولید می‌کند. این روش هیبریدی از روش مولدهای هواشناسی تصادفی و توابع انتقال است. روش SDSM طی مراحل اقدام به کوچک‌مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی روزانه می‌کند که به ترتیب عبارت‌اند از: ۱. کنترل کیفی و تبدیل داده‌ها؛ ۲. انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده؛ ۳. واسنجی مدل؛ ۴. تولید مدل اقلیمی با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های مشاهداتی؛ ۵. تجزیه و تحلیل آماری؛ ۶. خروجی گرافیکی مدل و ۷. تولید سناریوی اقلیمی با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی مدل [۱۸].

در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما برای دوره‌های آبی تحت اثر پدیده تغییر اقلیم، از مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 از مجموعه سناریوهای SRES استفاده می‌شود. در ادامه، برای زیاد کردن وضوح مکانی اطلاعات، روش کوچک‌مقیاس‌سازی SDSM به کار برده می‌شود و در نهایت پس از کوچک‌مقیاس‌سازی داده‌های خروجی مدل HadCM3 به منظور بررسی اثر تغییرات بارش و دما بر جریان سطحی منطقه اقدام به شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES می‌شود.

مدل گردش عمومی جو HadCM3

مدل گردش عمومی جو HadCM3 یک مدل GCM (جفت‌شده جو- اقیانوسی) است که توسط Gordon و همکارانش [۱۶] در مرکز تحقیقاتی HCCPR^۱ در انگلستان ارائه شده است. این مدل شبکه‌ای با ابعاد ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی و ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی دارد. جدول ۲ مشخصات این مدل را نشان می‌دهد.

سناریوهای انتشار

از آنجا که مهم‌ترین ورودی مدل‌های گردش عمومی جو، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آبی است و از طرفی محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره‌های آبی به طور قطعی امکان‌پذیر نیست، سناریوهای انتشار مختلفی برای آنها ارائه شده است. برای مدل گردش عمومی جو HadCM3، چهار سناریوی A1، A2، B1 و B2 ارائه شده است که در پژوهش حاضر دو سناریوی A2 و B2 استفاده می‌شوند. موضوع دربرگیرنده سناریوی A2، تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تأکید بر ارزش خانواده‌ها و رسوم خانوادگی، رشد زیاد جمعیت (۱۵ میلیارد نفر تا سال ۲۱۰۰

پیش‌بینی‌کننده مشابهی برای کوچک‌مقیاس‌سازی W_i و P_i به کار می‌روند و همه پیش‌بینی‌کننده‌ها (v_{ij}) با توجه به میانگین اقلیم‌شناسی (\bar{V}_j) و انحراف استاندارد (σ_j) خود استاندارد می‌شوند:

$$X_{ij} = \frac{v_{ij} - \bar{V}_j}{\sigma_j} \quad (3)$$

برای فرایندهای غیر مشروط مانند دما یا سرعت باد، یک رابطه مستقیم خطی میان پیش‌بینی‌شونده‌ها (U_i) و پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب (X_{ij}) وجود دارد:

$$U_i = \gamma + \sum_{j=1}^n \gamma_j X_{ij} + e_i \quad (4)$$

فرض می‌شود که خطای مدل (e_i) از توزیع گوسین^۶ تبعیت می‌کند و به طور تصادفی از اعداد تصادفی که توزیع نرمال دارند تولید می‌شود و به طور روزانه به مؤلفه^۷ قطعی اضافه می‌شود. این اختلال سفید^۸ به وجود آمده سبب نزدیک‌تر شدن واریانس توزیع‌های مشاهداتی و کوچک‌مقیاس شده می‌شود، با این حال می‌تواند مهارت تکرار خود همبستگی را به طور ضمنی در متغیرهای پیش‌بینی‌کننده روزانه کاهش دهد. همچنین، فرایند تصادفی امکان تولید مجموعه‌هایی از سری‌های زمانی را برای بازتاب عدم قطعیت مدل فراهم می‌کند [۶].

مدل هیدرولوژیک IHACRES

مدل بارش - رواناب IHACRES به طور مشترک توسط هیدرولوژیست‌های مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضه^۹ آبخیز^{۱۰} دانشگاه ملی استرالیا^{۱۱} و مرکز بوم‌شناسی و آب‌شناسی^{۱۲} انجمن تحقیقات زیست‌محیطی انگلستان^{۱۳} توسعه یافته است. اساس این مدل از دو مدول غیرخطی کاهش^{۱۲} و مدول خطی هیدروگراف^{۱۳} تشکیل شده است. ابتدا بارش و دما در هر گام زمانی توسط مدول غیرخطی به بارش مؤثر تبدیل شده و سپس به وسیله مدول غیرخطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود [۱۹].

الگوریتم به کاررفته در SDSM یک تولیدکننده آب و هوایی مشروط^۱ است، زیرا شاخص‌های گردش اتمسفر و متغیرهای منطقه‌ای رطوبت را برای برآورد پارامترهایی که در زمان متغیر هستند و آب و هوای روزانه را در مکان‌های منفرد (برای مثال، وقوع بارش یا دماهای بیشینه) توصیف می‌کنند، به کار می‌برد. فرایند کوچک‌مقیاس شده هم غیرمشروط (وقوع روز مرطوب^۲ یا دمای هوا) و هم مشروط به یک رویداد^۳ (مقادیر بارش) است.

برای وقوع روز مرطوب (W_i) یک همبستگی خطی مستقیم میان n متغیر پیش‌بینی‌کننده (X_{ij}) در روز i وجود دارد:

$$W_i = \alpha + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_{ij} \quad (1)$$

که در این معادله مقدار W_i بین مقادیر صفر و یک محدود می‌شود ($0 \leq W_i \leq 1$). بارش زمانی رخ می‌دهد که مقدار یکنواخت تصادفی r کوچک‌تر و یا مساوی W_i باشد. مقدار آستانه (بر حسب میلی‌متر) برای یک روز مرطوب، بر حسب منطقه متفاوت است و به تعریف بارش‌های ردیابی^۴ یا دقت اندازه‌گیری‌ها بستگی دارد. در زمان واسنجی مدل، تأیید این نکته که مجموع بارش روزانه در روزهای متعدد تجمع پیدا نکرده است حائز اهمیت است، زیرا در غیر این صورت برای درک فرکانس‌های بارش با مشکل مواجه خواهیم شد. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (X_{ij}) ممکن است هم‌زمان و یا با تأخیر موجب افزایش تداوم دوره‌های مرطوب و خشک شوند. زمانی که یک روز مرطوب دوباره به وقوع می‌پیوندد، مجموع بارش (P_i) با استفاده از رابطه^۲ کوچک‌مقیاس می‌شود:

$$P_i^k = \beta + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij} + e_i \quad (2)$$

که در آن k (معمولاً ۰/۲۵ است) برای تبدیل مقادیر روز مرطوب در مقیاس روزانه به منظور تطابق بهتر با توزیع نرمال به کار می‌رود. با این حال، ممکن است سایر تبدیل‌ها (برای مثال، لگاریتم‌گیری یا معکوس طبیعی^۵) روی P_i صورت گیرد. به این نکته باید توجه شود که مجموعه

6. Gaussian
7. White noise
8. The Integrated Catchment Assessment and Management (ICAM)
9. The Australian National University
10. Centre for Ecology and Hydrology (CEH)
11. National Environment Research Council
12. Non-linear module
13. Linear unit hydrograph module

1. Conditional weather generator
2. Wet-day
3. Event
4. Trace rainfalls
5. Inverse normal

نتایج

شبیه‌سازی اقلیم آینده (دهه ۲۰۵۰ میلادی)

برای کوچک‌مقیاس‌سازی خروجی‌های دمای مدل گردش عمومی جو، ابتدا مدل SDSM با استفاده از داده‌های مشاهداتی دما و بارش در مقیاس زمانی روزانه واسنجی و صحت‌سنجی شد. برای واسنجی مدل SDSM ابتدا از میان متغیرهای بزرگ‌مقیاس موجود، متغیرهایی که بیشترین ارتباط را با متغیرهای اقلیمی دما و بارش منطقه دارند، انتخاب شدند؛ پس از واسنجی مدل برای دوره پایه، اقدام به تولید داده‌های اقلیمی دما در دوره صحت‌سنجی شد. جدول‌های ۳-۴ متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ای را نشان می‌دهد که بیشترین همبستگی آماری را به ترتیب با متغیرهای دما و بارش منطقه دارند.

به منظور بررسی و تحلیل تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای تحت سناریوهای مختلف، متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل HadCM3 در دهه ۲۰۵۰ میلادی برای منطقه مطالعه شده کوچک‌مقیاس شدند. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود به طور کلی دمای متوسط روزانه حوضه تحت دو سناریوی A2 و B2 به ترتیب ۱/۲ و ۱/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. از لحاظ تغییرات فصلی نیز به طور متوسط در دوره آتی بیشترین افزایش دمای روزانه حوضه در فصل زمستان و به میزان ۱/۵ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی A2 و در فصل تابستان و به میزان ۱/۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی B2 خواهد بود. درخور یادآوری است که با توجه به تفاوت اندک میان تغییرات میانگین دمای متوسط روزانه در فصول تابستان و زمستان (۱/۴ و ۱/۵ درجه سانتی‌گراد)، تحت هر دو سناریوی انتشار می‌توان این‌گونه بیان کرد که در واقع بیشترین افزایش دمای میانگین روزانه در حوضه در فصول زمستان و تابستان رخ خواهد داد.

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، به طور متوسط در هر دو سناریوی استفاده شده بارش روزانه در فصول زمستان و بهار کاهش و در فصول تابستان و پاییز افزایش خواهد یافت. همچنین، به طور کلی بارش روزانه در دهه آتی تحت سناریوی A2 ۰/۱ میلی‌متر کاهش و تحت سناریوی B2 ۰/۳ میلی‌متر افزایش خواهد یافت.

مدل IHACRES شش پارامتر دارد که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی است که شامل ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه^۱، مدت زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود^۲ و فاکتور تعدیل دمای حوضه^۳ است. سه پارامتر دیگر مربوط به بخش تابع تبدیل خطی است که شامل مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریان سریع کاهش یابد^۴، مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریان آهسته کاهش یابد^۵ و حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد^۶، است [۲۰]. برای اطلاعات بیشتر درباره الگوریتم‌های استفاده شده در مدل به منابع مرتبط [۱۹] مراجعه شود. شکل ۲ ساختار کلی مدل را نشان می‌دهد.

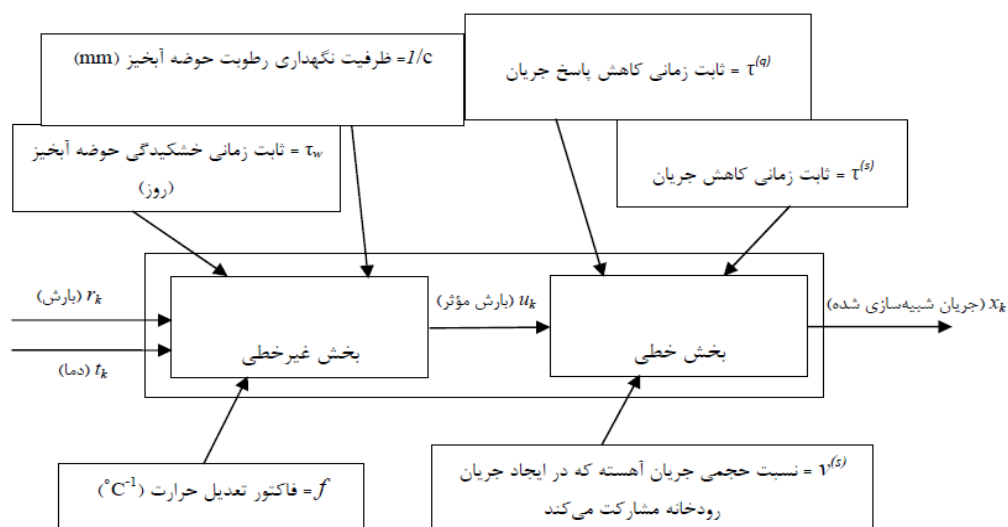
ارزیابی کارایی مدل

به‌رغم پیشرفت‌هایی که در زمینه مدل‌سازی از طریق درک بهتر سیستم‌های هیدرولوژیک در سال‌های اخیر به دست آمده است، همچنان مدل‌ها ضرایبی از خطا دارند. علاوه بر این، همچنان ارزیابی مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی از ضروریات است. در این پژوهش معیار نش-ساتکلیف برای ارزیابی توانایی مدل هیدرولوژیک استفاده شده در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیک استفاده شد.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (5)$$

ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف برای ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیک استفاده می‌شود و دامنه آن از $-\infty$ تا یک متغیر است. ضریب نش-ساتکلیف برابر با یک نشان‌دهنده تطابق کامل جریان سطحی مدل شده با داده‌های مشاهداتی است و ضریب برابر با صفر نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های مدل به صحت میانگین داده‌های مشاهداتی است، در حالی که مقادیر کمتر از صفر زمانی به دست می‌آیند که واریانس باقی‌مانده بزرگ‌تر از واریانس داده‌ها باشد. به طور کلی، هر چه ضریب به دست آمده از روش نش-ساتکلیف به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده صحت بیشتر مدل است [۲۱].

1. 1/c
2. Catchment drying time constant
3. Temperature modulation factor
4. Picks of the quick UHs
5. Picks of the slow UHs
6. The slow flow index



شکل ۲. ساختار کلی مدل هیدرولوژیکی IHACRES [۱۹]

جدول ۳. متغیرهای غالب در شبیه‌سازی میانگین دمای روزانه حوضه دریاچه ارومیه

ایستگاه	متغیرهای پیش‌بینی‌کننده
ارومیه	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، متوسط دما در ارتفاع دومتری
مهاباد	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، متوسط دما در ارتفاع دومتری
مراغه	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، متوسط دما در ارتفاع دومتری

جدول ۴. متغیرهای غالب در شبیه‌سازی میانگین بارش روزانه حوضه دریاچه ارومیه

ایستگاه	متغیرهای پیش‌بینی‌کننده
ارومیه	سرعت مدیترانه‌ای در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، واگرایی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
مهاباد	سرعت مدار سطحی، سرعت مدیترانه‌ای سطحی، جهت باد سطحی
مراغه	ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، متوسط دما در ارتفاع دومتری، رطوبت ویژه سطحی

جدول ۵. مقایسه تغییرات مقادیر بارندگی و دما در دوره سناریوسازی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) نسبت به دوره پایه

پارامتر	بارش روزانه (میلی‌متر در روز)		دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)		زمان
	A2	B2	A2	B2	
زمستان	-۰/۱	-۰/۴	۱/۵	۱/۴	
بهار	-۰/۵	-۰/۶	۰/۷	۰/۹	
تابستان	۰/۰۲	۰/۰۱	۱/۴	۱/۵	
پاییز	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۷	۰/۸	
سالانه	۰/۰۳	-۰/۱	۱/۱	۱/۲	

شبیه‌سازی هیدرولوژیک

هدف نهایی پژوهش حاضر بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر جریان سطحی است. در این تحقیق مدل IHACRES برای شبیه‌سازی این فرایند استفاده شود. نخستین اقدام برای این فرایند واسنجی مدل برای ایستگاه‌های منتخب است که برای این امر داده‌های دما، بارندگی و جریان سطحی ایستگاه‌های

یادشده در جدول ۱ به کار برده شد. بررسی آمار ایستگاه‌های یادشده نشان داد دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۱ میلادی دربرگیرنده سال‌های متنوع وقوع خشک‌سالی و ترسالی است که شرایط را برای واسنجی مطلوب مدل بارش - رواناب فراهم می‌سازد. نتایج عملکرد هر ترکیب از ایستگاه‌ها با استفاده از معیارهای R^2 و Bias مقایسه شد و با انجام آزمون و خطا بهترین دوره

تازه‌کند، تحت سناریوی A2 به ترتیب به میزان ۴۶ و ۷۶ درصد کاهش خواهد یافت در حالی که در ایستگاه پل بهراملو حدود ۸۶ درصد افزایش خواهد یافت. متوسط جریان سطحی روزانه تحت سناریوی A2 در ایستگاه‌های پل ازبک، پل بهراملو و تازه‌کند به ترتیب ۳۷، ۷ و ۹۳ درصد کاهش خواهد یافت. به طور کلی، میانگین جریان سطحی روزانه حوضه در دوره آتی تحت سناریوی A2 ۲۴/۶ درصد افزایش و تحت سناریوی B2 ۴/۶ درصد کاهش خواهد یافت (جدول ۷).

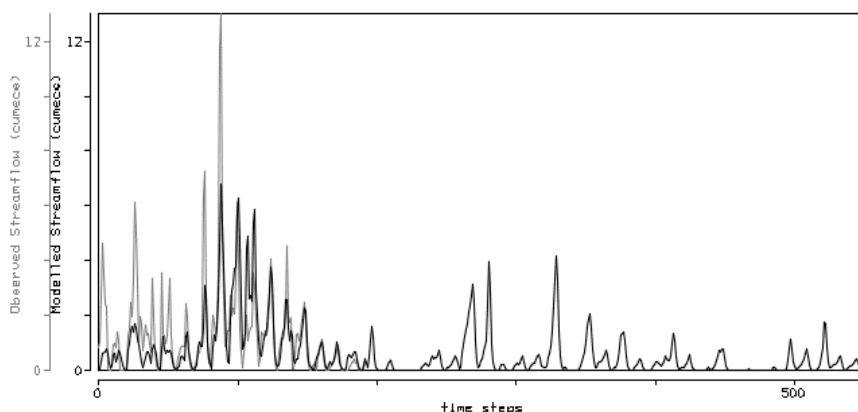
جدول ۶. ضرایب نش - ساتکلیف ایستگاه‌های هیدرومتری

منتخب در دوره واسنجی مدل IHACRES

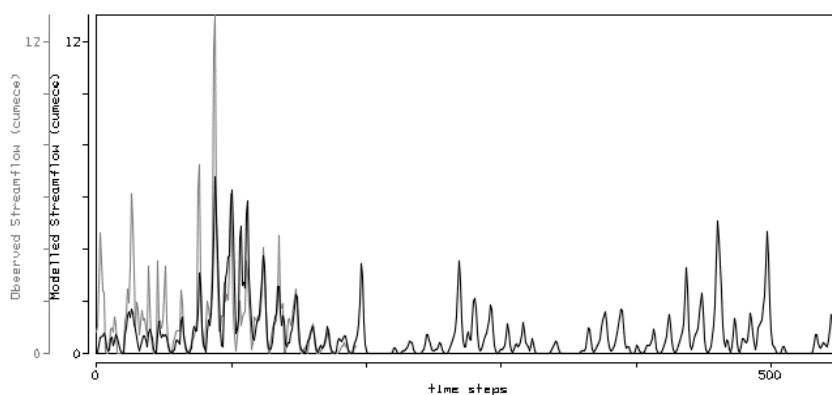
ضریب نش - ساتکلیف	ایستگاه	ردیف
۰/۶۸	پل ازبک	۱
۰/۱۷	پل بهراملو	۲
۰/۶۵	تازه‌کند	۳

واسنجی برای هر ایستگاه بر اساس دو معیار یادشده انتخاب شد و اقدام به تعیین مقادیر آغازی، پایانی و گام پارامترهای f و T_w شد. نتایج بررسی ضریب نش - ساتکلیف در دوره واسنجی مدل در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج واسنجی مدل نشان می‌دهد گرچه مدل مد نظر نتوانسته است برخی حداکثرها^۱ را به خوبی شبیه‌سازی کند، در مجموع عملکرد قابل قبولی را از خود در شبیه‌سازی جریان سطحی ایستگاه‌های هیدرومتری مد نظر نشان داده است. در نهایت، با استفاده از خروجی مدل SDSM برای هر سناریوی انتشار مد نظر در تحقیق حاضر اقدام به شبیه‌سازی رواناب برای دوره میانی تغییر اقلیم شد.

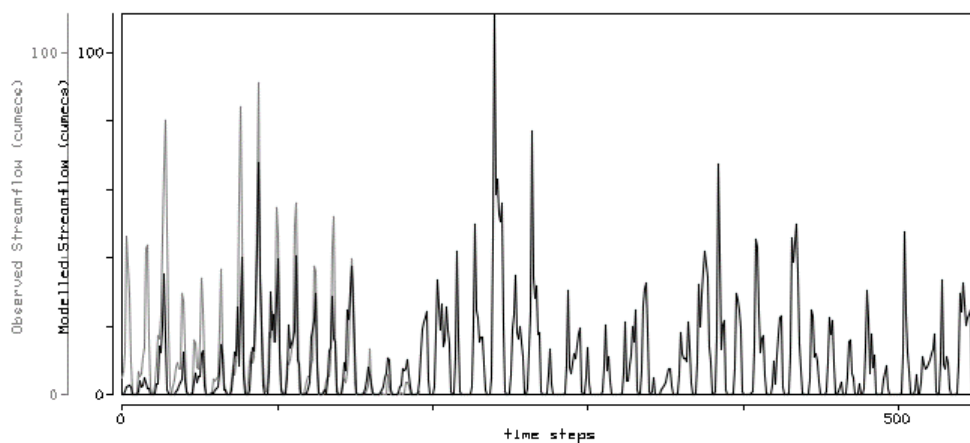
همان طور که در شکل‌های ۳- ۸ نشان داده شده است، میانگین جریان سطحی روزانه در حوضه طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد به طوری که متوسط رواناب روزانه در ایستگاه‌های پل ازبک و



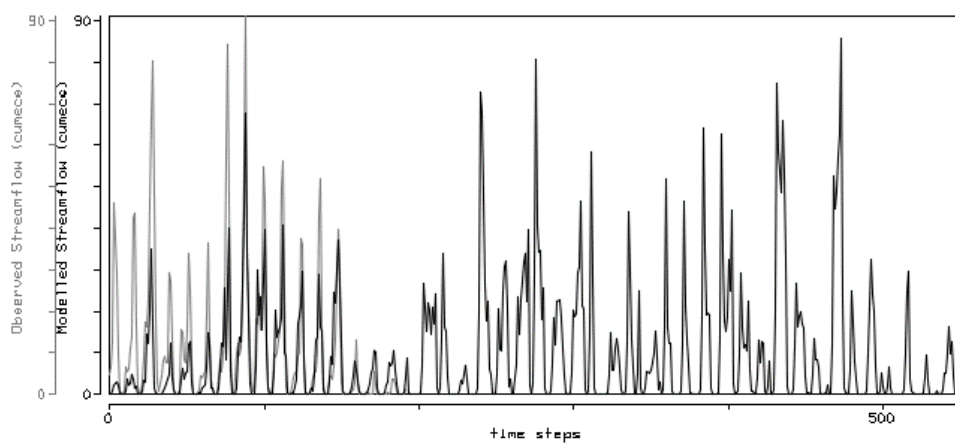
شکل ۳. میانگین جریان سطحی ایستگاه پل ازبک طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی A2 در گام زمانی ماهانه



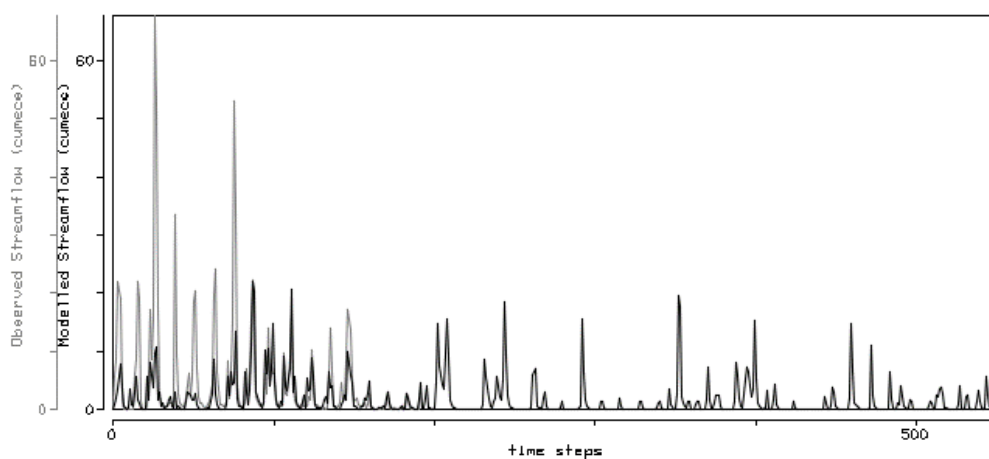
شکل ۴. میانگین جریان سطحی ایستگاه پل ازبک طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی B2 در گام زمانی ماهانه



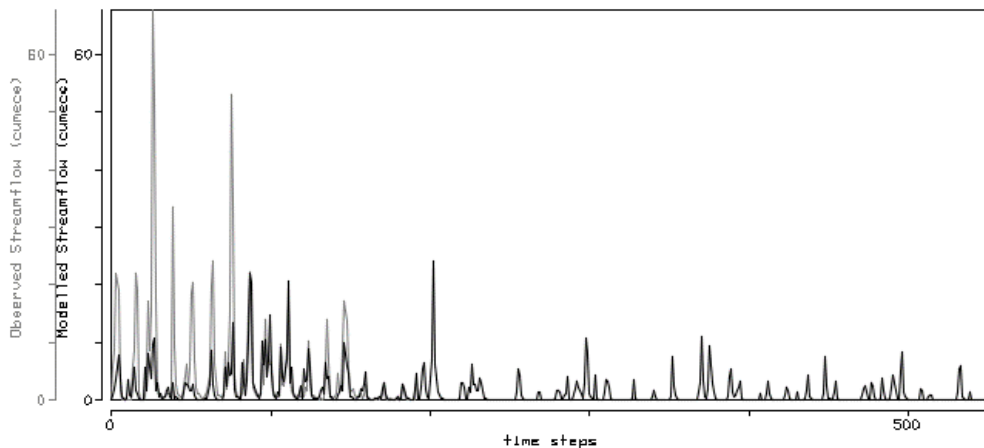
شکل ۵. میانگین جریان سطحی ایستگاه پل بهراملو طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی A2 در گام زمانی ماهانه



شکل ۶. میانگین جریان سطحی ایستگاه پل بهراملو طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی B2 در گام زمانی ماهانه



شکل ۷. میانگین جریان سطحی ایستگاه تازه‌کند طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی A2 در گام زمانی ماهانه



شکل ۸. میانگین جریان سطحی ایستگاه تازه‌کند طی دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) تحت سناریوی B2 در گام زمانی ماهانه

در تحقیق حاضر روش‌شناسی^۱ تعریف شد که در آن با استفاده از خروجی‌های بزرگ‌مقیاس مدل HadCM3 و ابزار کوچک‌مقیاس‌سازی آماری SDSM، تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 و B2، مقادیر دما و بارش در دوره میانی تغییر اقلیم (۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی) شبیه‌سازی شد. در بیشتر مطالعات کوچک‌مقیاس‌سازی معمولاً متغیرهای بزرگ‌مقیاس به تعداد حداقل سه و حداکثر شش متغیر انتخاب و به مدل معرفی می‌شوند که نوع و تعداد آنها بر اساس شرایط منطقه مطالعاتی متفاوت است و انتخاب آنها بر نتایج تحقیق اثرگذار است. آنچه مسلم است هرچه مقادیر بارندگی روزانه حوضه‌ای بیشتر باشد روابط همبستگی بهتری با داده‌های بزرگ‌مقیاس خواهد داشت. همه تحقیقات علمی صورت گرفته در مجامع علمی نشان از تغییر متغیرهای بارندگی و دما در آینده دارد [۷-۱۰] به طوری که حوضه‌های مرطوب دارای روندی به سمت نیمه‌مرطوب، حوضه‌های نیمه‌مرطوب به سمت نیمه‌خشک و حوضه‌های نیمه‌خشک روند تغییراتی به سمت خشک خواهند داشت [۱۲]. با توجه به یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که مدل SDSM توانایی خوبی در تولید مجدد متغیرهای اقلیمی در دوره کنونی و نیز دوره آتی در حوضه دارد که این نتیجه با نتایج تحقیقات صمدی و همکارانش [۱۲]، افروز و همکارانش [۴] و عباس‌نیا و همکارانش [۱۴] در ارزیابی کارایی مدل یادشده همخوانی دارد. پس از کوچک‌مقیاس‌سازی داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل HadCM3، به منظور بررسی

جدول ۷. مقایسه تغییرات رواناب حوضه در دوره آتی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) نسبت به دوره پایه

ایستگاه	سناریوی A2 (درصد)	سناریوی B2 (درصد)
پل ازبک	-۴۶ درصد	-۳۷ درصد
پل بهراملو	+۸۶ درصد	-۷ درصد
تازه‌کند	-۷۶ درصد	-۹۳ درصد
حوضه	+۲۴/۶ درصد	-۴/۶ درصد

بحث و نتیجه‌گیری

طبق شواهد بسیار با توجه به سیاست‌های کنونی تعدیل تغییرات اقلیمی و همچنین اقدامات مرتبط با توسعه پایدار، انتظار می‌رود که انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای طی چند دهه آینده نیز به رشد خود ادامه دهد. گزارش ویژه هیئت بین دول تغییرات اقلیمی درباره سناریوهای انتشار، افزایش انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای را از ۲۵ تا ۹۰ درصد بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۰ میلادی پیش‌بینی می‌کند که در این میان سوخت‌های فسیلی تا سال ۲۰۳۰ میلادی و حتی پس از آن موقعیت غالب خود را به عنوان سوخت غالب در جهان و مهم‌ترین منبع تولید گاز دی‌اکسید کربن حفظ می‌کنند. ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای با سرعت فعلی گرمایش بیشتری را به دنبال خواهد داشت که به تبع آن تغییرات بسیاری در سیستم اقلیمی جهانی طی قرن بیست و یکم رخ خواهد داد و احتمالاً بسیار شدیدتر از تغییراتی خواهد بود که طی قرن بیستم شاهد آن بوده‌ایم [۱].

پیش‌بینی‌کننده‌ها این است که عوامل مختلفی بر متغیر اقلیمی بارش مؤثر است و دیگر اینکه بارش یک پارامتر گسسته است، بنابراین مسئله همبستگی بارش با داده‌های بزرگ‌مقیاس در توسعه مدل‌های تغییر اقلیم در آینده باید مد نظر قرار گیرد [۱۲]. نتایج این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق عباس‌پور و همکارانش [۱۱] که مبین افزایش دما و کاهش بارش در بیشتر نقاط ایران در دوره‌های آبی و تحت سناریوی انتشار A2 است همخوانی دارد؛ ضمن اینکه نتایج هر دو تحقیق به طور ضمنی به شرایط بحرانی‌تر تحت سناریوی A2 نسبت به سناریوی B2 اشاره دارند؛ همچنین نتایج تحقیق حاضر با نتایج به‌دست‌آمده توسط صمدی و همکارانش [۱۲] و عباس‌نیا و همکارانش [۱۴] درباره افزایش دما در میانه قرن ۲۱ تطابق دارد.

اجرای طرح‌های عمرانی، اقتصادی و اجتماعی به مطالعه و شناخت تغییرات اقلیمی نیاز دارد تا بتوان برنامه‌ریزی صحیحی را در زمینه‌های یادشده انجام داد که این مسئله ضرورت مطالعات اقلیمی در کالبد برنامه‌ریزی در سطوح خرد و کلان کشوری، منطقه‌ای، استانی و شهری را مشخص می‌سازد. از نتایج تحقیق حاضر می‌توان برای برآورد میزان تغییرات در منابع آب، وضعیت پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر خشکسالی‌ها و عملکرد محصولات کشاورزی در منطقه مطالعه شده برای برنامه‌ریزی منابع مختلف منطقه در دوره‌های آبی بهره برد.

منابع

- [1]. Field CB, Barros VR, Dokken D, Mach K, Mastrandrea M, Bilir T, et al. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014.
- [2]. Qin D, Chen Z, Averyt K, Miller H, Solomon S, Manning M, et al. IPCC, 2007: Summary for Policymakers. 2007.
- [3]. Kabiri R, Bai VR, Chan A. Assessment of hydrologic impacts of climate change on the runoff trend in Klang Watershed, Malaysia. Environmental Earth Sciences. 2015;73(1):27-37.

اثر تغییرات بارش و دما بر جریان سطحی اقدام به شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES شد.

کاربرد مدل HadCM3 در حوضه نشان داد مقدار دما در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی به میزان ۱/۲ و ۱/۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب تحت سناریوهای A2 و B2 افزایش خواهد یافت. همچنین بیشترین افزایش دما تحت سناریوی A2 در فصل زمستان به میزان ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی B2 در فصل تابستان به میزان ۱/۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر با نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های هیئت بین دول تغییرات اقلیمی [۱] که مبین افزایش میانگین دمای جو است همخوانی دارد. در بیشتر ماه‌های سال در دوره سناریوسازی افزایش دما وجود دارد، بنابراین به کارگیری تصمیماتی برای کاهش آثار منفی افزایش دما ضروری به نظر می‌رسد؛ همچنین به دلیل افزایش دمای هوا در زمستان از بارش‌های جوی به شکل برف کاسته خواهد شد؛ کاهش نزولات جوی به صورت برف موجب کاهش جریان آب رودخانه‌ها در فصول بهار و تابستان شده و موجب کمبود منابع آب سطحی در این دو فصل می‌شود. کاربرد مدل HadCM3 در حوضه نشان داد که میزان بارندگی در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ میلادی ۰/۱ میلی‌متر در روز تحت سناریوی A2 کاهش خواهد یافت و برای سناریوی B2 دارای افزایشی معادل ۰/۳ میلی‌متر خواهد بود. همچنین میزان بارندگی تحت هر دو سناریوی انتشار مد نظر در فصول زمستان و بهار کاهش و در فصول تابستان و پاییز افزایش خواهد یافت، در نتیجه تدابیر مدیریت منابع به منظور حفظ آبخوان‌ها و تغذیه آب‌های زیرزمینی نیز اهمیت دارد. نتایج شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از خروجی‌های مدل SDSM نشان می‌دهند که به طور میانگین در منطقه مطالعه‌شده، جریان سطحی در دوره آبی به میزان ۲۴/۶ درصد تحت سناریوی A2 افزایش و به میزان ۴/۶ درصد تحت سناریوی B2 کاهش می‌یابد.

نتایج نشان دادند داده‌های دما همبستگی بهتری را با متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مقایسه با داده‌های بارندگی از خود نشان می‌دهند. این مسئله به آن دلیل است که تغییرپذیری دما نسبت به بارش کمتر است. از جمله عوامل کاهش همبستگی در داده‌های بارش با

- [4]. Afrooz A, Akbari H, Rakhshandehroo G, Pourtouserkani A. Climate change impact on probable maximum precipitation in Chenar-Rahdar River Basin. *Watershed Management* 2015. 2015:36.
- [5]. Liu J, Yuan D, Zhang L, Zou X, Song X. Comparison of three statistical downscaling methods and ensemble downscaling method based on Bayesian Model averaging in upper Hanjiang River Basin, China. *Advances in Meteorology*. 2015;2016.
- [6]. Wilby RL, Dawson CW. The statistical downscaling model: insights from one decade of application. *International Journal of Climatology*. 2013;33(7):1707-19.
- [7]. Bozkurt D, Sen OL. Climate change impacts in the Euphrates–Tigris Basin based on different model and scenario simulations. *Journal of hydrology*. 2013;480:149-61.
- [8]. Etemadi H, Samadi S, Sharifikia M. Uncertainty analysis of statistical downscaling models using general circulation model over an international wetland. *Climate dynamics*. 2014;42(11-12):2899-920.
- [9]. Farzaneh MR, Eslamian S, Samadi SZ, Akbarpour A. An appropriate general circulation model (GCM) to investigate climate change impact. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 2012;2(1):34-47.
- [10]. Ficklin DL, Luo Y, Luedeling E, Zhang M. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 2009;374(1):16-29.
- [11]. Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS, Yang H. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*. 2009;45(10).
- [12]. Samadi S, Carbone GJ, Mahdavi M, Sharifi F, Bihamta M. Statistical downscaling of river runoff in a semi arid catchment. *Water resources management*. 2013;27(1):117-36.
- [13]. Ashraf Vaghefi S, Mousavi S, Abbaspour K, Srinivasan R, Yang H. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *Hydrological Processes*. 2014;28(4):2018-32.
- [14]. Abbasnia M, Tavousi T, Khosravi M. Assessment of future changes in the maximum temperature at selected stations in Iran based on HADCM3 and CGCM3 models. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2016;52(4):371-7.
- [15]. Zarghami M, Abdi A, Babaeian I, Hassanzadeh Y, Kanani R. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*. 2011;78(3):137-46.
- [16]. Gordon C, Cooper C, Senior CA, Banks H, Gregory JM, Johns TC, et al. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate dynamics*. 2000;16(2):147-68.
- [17]. Houghton JT, Albritton D, Meira Filho L, Cubasch U, Dai X, Ding Y, et al. Technical summary of working group 1: Cambridge University Press; 2001.
- [18]. Wilby R, Dawson C. Using SDSM Version 4.1 SDSM 4.2. 2—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *User Manual*, Leicestershire, UK. 2007.
- [19]. Croke B, Littlewood I. Comparison of alternative loss modules in the IHACRES model: an application to 7 catchments in Wales. 2005.
- [20]. Littlewood I. Down., K, Parker, JR & Post, DA 1999. IHACRES V1 0 User Guide.
- [21]. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007;50(3):885-900.