



بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز قره‌چای در استان مرکزی

هادی ثانی‌خانی^۱، محمدرضا گوهر دوست^۲ و مرتضی صادقی^۳

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه،

(نویسنده مسؤل: hsanikhani12@gmail.com)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۱۷

چکیده

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در مناطق خشک حایز اهمیت است. در بخش اول این تحقیق از مدل LARS-WG به منظور ریز مقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی شامل بارش، تشعشع خورشیدی، دمای حداقل و دمای حداکثر در یک دوره آماری ۳۱ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۲) در حوزه آبخیز قره‌چای واقع در استان مرکزی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که مدل LARS-WG با موفقیت می‌تواند برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی به کار گرفته شود. با به کارگیری سناریوهای مختلف انتشار شامل A1B، A2 و B1 روند کاهشی برای متغیر بارش و روند افزایشی برای متغیر دما در افق‌های زمانی آتی مشاهد شد. در بخش دوم تحقیق به شبیه‌سازی رواناب در سطح حوزه در افق‌های آتی شامل ۱۴۰۰، ۱۴۳۵ و ۱۴۷۰ با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی پرداخته شد. سامانه استنتاج فازی عصبی تطبیقی در قالب دو روش افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی به کار گرفته شد. روش دسته‌بندی تفریقی عملکرد نسبی بهتری در مقایسه با افراز شبکه در پیش‌بینی رواناب داشت. هم‌چنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار حداکثر دبی جریان در افق‌های ۱۴۰۰، ۱۴۳۵ و ۱۴۷۰ به ترتیب به میزان ۱۴، ۲۷ و ۴۳ درصد در مقایسه داده‌های تاریخی کاهش خواهد یافت. به نظر می‌رسد با توجه به وقوع تغییر اقلیم در حوزه و تشدید آن در سال‌های آتی لازم است راه‌کارهایی به منظور سازگاری و مقابله با تغییر اقلیم به منظور حفاظت از منابع آب در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریز مقیاس‌نمایی، LARS-WG، رواناب، فازی-عصبی

مقدمه

تغییر اقلیم در مناطق مختلف دنیا ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات چرخش عمومی رخ می‌دهد (۱۳). در دهه‌های اخیر وضعیت منابع آب در سراسر دنیا با چالش‌های جدی روبه‌رو گشته است و این شرایط با روند افزایش دما و کاهش بارش تشدید شده است. طبق گزارشات هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ انتظار می‌رود که اغلب مناطق دنیا اثرات منفی تغییر اقلیم بر منابع آب و اکوسیستم‌ها را تجربه کنند (۱۱). البته ویژگی‌های این تغییرات از ناحیه‌ای به ناحیه‌ای دیگر متفاوت می‌باشد. پیش‌بینی‌های انجام شده با مدل‌های گردش عمومی (GCMs)^۲ وقوع تعداد زیادی از تغییرات متغیرهای اقلیمی نظیر بارش را در نقاط مختلف جهان تأیید نموده است که این مسأله تأثیر به سزایی بر وضعیت منابع آب دارد.

به منظور بررسی اثرات کمی و هیدرولوژیکی تغییر اقلیم مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی در این خصوص با به کارگیری اطلاعات مدل‌های گردش عمومی جو توسعه یافتند. چالش اصلی در این باره این است که شفافیت مکانی بین مدل‌های گردش عمومی و مدل‌های هیدرولوژیکی کافی نیست. برای حل این مسأله مدل‌های اقلیمی ناحیه‌ای و مدل‌های ریز مقیاس‌نمایی

آماري توسعه یافتند. مشکل اصلی در به‌کارگیری مدل‌های ناحیه‌ای، گرانی و پر هزینه بودن این دسته از مدل‌ها است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. علاوه بر این به کارگیری آن‌ها در حوزه‌های آبخیز با وسعت کم، مشکل‌ساز بوده و لازم است تا سناریوهایی متناسب با مقیاس حوزه در نظر گرفته شوند. مدل‌های ریز مقیاس‌نمایی آماری برای برطرف کردن مشکلات ذکر شده، توسعه پیدا کردند. در واقع این دسته از مدل‌ها در قالب واسطه‌ای بین مدل‌های گردش عمومی و متغیرهای اقلیمی در سطح محدوده مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مدل‌ها به لحاظ هزینه، ارزان قیمت بوده و می‌توانند به آسانی در مقیاس کوچک نظیر حوزه‌های آبخیز به کار گرفته شوند (۲۲). مدل LARS-WG از جمله مدل‌های ریز مقیاس‌نمایی آماری می‌باشد. کاربردهای موفق و قابل قبول این مدل در مطالعات مختلف آرایه شده است (۲۴،۲۱).

اهمیت موضوع تغییر اقلیم و اثرات آن از جنبه‌های مختلف نظیر منابع آب موجب شده تا پژوهشگران مختلف توجه ویژه‌ای به این موضوع داشته و دامنه مطالعات در این زمینه افزایش قابل توجهی داشته باشد. چپو و همکاران (۳) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب و رطوبت خاک در حوزه‌های آبخیز استرالیا

سری زمانی در پیش‌بینی رواناب رودخانه پرداختند. این مقایسه نشان داد که مدل فازی-عصبی در مقایسه با سایر روش‌ها از لحاظ خطای پیش‌بینی، سرعت اجرا و پیش‌بینی مقادیر حداکثر جریان، کارایی بیش‌تری دارد. فیرات و گونگور (۶) کارایی و قابلیت سامانه استنتاجی فازی-عصبی را در پیش‌بینی رواناب رودخانه‌ای در ترکیه مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل شده نشان از دقت مناسب و کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی رواناب داشت. طالع و همکاران (۲۳) برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب از سامانه استنتاجی فازی-عصبی استفاده کردند و نتایج مدل را مناسب گزارش نمودند. ثانی‌خانی و کیسی (۱۷) از دو روش مختلف فازی-عصبی شامل افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی برای پیش‌بینی میزان جریان رودخانه استفاده نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از دقت قابل قبول هر دو روش در پیش‌بینی میزان جریان بود.

این تحقیق با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم روی رواناب حوزه قره‌چای در استان مرکزی انجام شد. مدل LARS-WG برای ریزمقیاس نمایی متغیرهای اقلیمی با به‌کارگیری سناریوهای مختلف در افق‌های زمانی آینده استفاده شد. همچنین در این تحقیق از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در قالب دو روش افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی به منظور پیش‌بینی رواناب حوزه در افق‌های آینده استفاده شد.

مواد و روش‌ها مدل LARS-WG

مدل LARS-WG از جمله مدل‌های آماری ریزمقیاس نمایی بوده که در واقع مولد داده‌های آب و هوایی از نوع سریالی می‌باشد. این مدل اولین بار از سوی راسکو و همکاران (۱۶) ارائه شد و در ادامه از سوی سیمونوفو همکاران (۲۱) آن را کامل کردند. برای به‌کارگیری این مدل لازم است داده‌های بارش، تشعشع خورشیدی، دمای حداقل و حداکثر در مقیاس زمانی روزانه موجود باشند. البته چنان‌چه داده‌های تشعشع خورشیدی موجود نباشد می‌توان از داده‌های ساعت آفتابی در ورودی مدل استفاده کرد که این مزیت در کشور ایران که داده‌های تشعشع خورشیدی در ایستگاه‌های محدودی اندازه‌گیری می‌شود، حایز اهمیت است. در این مدل به منظور مدل‌سازی بارش و احتمال وقوع آن از روش توزیع نیمه تجربی و زنجیره مارکوف استفاده می‌شود. همچنین برای مدل‌سازی تشعشع خورشیدی از توزیع نیمه‌تجربی و برای متغیر دما از سری‌های فوریه استفاده شد (۱۹).

در این مدل فرض بر این است که دما دارای توزیع نرمال بوده و متوسط و انحراف معیار دمای روزانه مطابق

پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حوزه‌های آبخیز تاسمانیا در سال ۲۰۳۰ رواناب به میزان ده درصد افزایش خواهد یافت، در حالی که در خلیج جنوبی استرالیا رواناب به میزان ۳۵ درصد در سال ۲۰۳۰ نسبت به زمان حال کاهش خواهد یافت. ماتوندو و همکاران (۱۴) اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و منابع آب را در چندین حوزه از آفریقای جنوبی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ۱۱ مدل مختلف گردش عمومی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم استفاده کردند که در این میان، سه مدل توانسته است به خوبی بارش را در منطقه شبیه‌سازی کنند. فوجی هارا و همکاران (۷) از داده‌های ریزمقیاس شده برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه‌ای در کشور ترکیه استفاده کردند.

نتایج اولیه نشان می‌دهد که مقدار بارش و دمای ریزمقیاس شده هم‌خوانی قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی دارند. همچنین نتایج شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حاکی از آن بود که در افق‌های آینده، مقدار دما افزایش و مقدار بارش روند کاهشی خواهد داشت. چانگ و همکاران (۲) به بررسی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب رودخانه وی در کشور چین پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از کاهش میزان بارش و روتاب در محدوده مورد بررسی بود. میزان درصد کاهش در رواناب ناشی از تغییر اقلیم در سطح منطقه در دهه‌های ۱۹۷۰، ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ به ترتیب برابر ۳۶، ۲۸، ۵۳ و ۱۰ درصد بود. میزان کاهش رواناب ناشی از فعالیت‌های انسانی در این دهه‌ها به ترتیب برابر ۶۴، ۷۲، ۴۷ و ۹۰ درصد به دست آمد.

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوشمند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی فرآیندهای پیچیده و غیرخطی هیدرولوژیکی نظیر رواناب همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است. قابلیت مهم این قبیل مدل‌ها درک رفتار غیرخطی پدیده مورد نظر می‌باشد و بنابراین بیش‌ترین کاربرد آن مربوط به فرآیندهایی است که تعریف دقیق و درک خاصی از رفتار آن‌ها وجود ندارد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و برنامه‌ریزی ژنتیک نمونه‌های بارزی از مدل‌های هوشمند هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این میان، سامانه‌ی استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به دلیل استفاده از قابلیت هر دو روش شبکه‌های عصبی و تئوری فازی، کارایی بالایی در مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی دارد که در ادامه به تعدادی از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

نایاک و همکاران (۱۵) به مقایسه‌ی عملکرد سیستم فازی-عصبی تطبیقی با شبکه‌های عصبی و مدل‌های

در شکل ۱ مدل فازی مرتبه اول نوع سوگنو با دو ورودی (x و y)، یک خروجی f به همراه دو قانون فازی و هم‌چنین مدل فازی-عصبی معادل آن نشان داده شده است. لازم به توضیح است که سامانه استنتاجی فازی-عصبی موجود در جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB از نوع سوگنو بوده و برای طبقه‌بندی داده‌ها از دو روش افراز شبکه^۱ و دسته‌بندی تفریقی^۲ استفاده می‌کند.

روش افراز شبکه

این مدل ترکیبی از روش افراز شبکه و سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی است. افراز شبکه، فضای داده‌های ورودی را به تعدادی ناحیه فازی موضعی با استفاده از بخش‌های محوری و موازی بر مبنای توابع عضویت در هر بعد تقسیم می‌کند (۱). روش تخمین کم‌ترین مربعات بر مبنای هر بخش و نوع تابع عضویت برای محاسبه مجموعه‌های فازی برتر و پارامترهای مربوطه استفاده می‌شود. سیستم استنتاج فازی-عصبی از خروجی صفر شروع کرده و به تدریج، در حین آموزش قوانین فازی یادگیری شده و توابع شناسایی گشته و پارامترها اصلاح می‌گردند. تعداد قوانین فازی با افزایش متغیرهای ورودی به صورت نمایی افزایش می‌یابد (۱۰).

روش دسته‌بندی تفریقی

این مدل ترکیبی از دسته‌بندی تفریقی و سامانه استنتاج فازی-عصبی است. روش دسته‌بندی تفریقی شکل توسعه یافته روش دسته‌بندی نقاط مرتفع می‌باشد. چپو (۵) روش اصلاح شده دسته‌بندی نقاط مرتفع را برای کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی روش قبلی پیشنهاد نمود. در این روش نقاط مربوط به داده‌ها با تعیین پتانسیل هر نقطه در فضای مورد نظر دسته‌بندی می‌گردند. تعداد دسته‌ها و مرکز هر دسته با استفاده از روش دسته‌بندی نقاط مرتفع تعیین می‌گردند. در این روش هر نقطه در فضا، تعیین‌کننده مرکز دسته با توجه به چگالی و تراکم نقاط موجود در اطراف آن است. نقطه با بیش‌ترین پتانسیل مرکز اولین دسته انتخاب می‌گردد. بعد از این‌که پتانسیل نقاط نزدیک به مرکز دسته اول از بین رفت، مرکز دسته بعدی با اصلاح پتانسیل نقاط برای از بین بردن اثر مرکز دسته قبلی تعیین می‌گردد. برای مشخص نمودن تعداد دسته‌ها تعیین شعاع مؤثر لازم است. انتخاب مقداری کوچک برای آن، موجب کوچک شدن بیش از حد دسته‌ها در فضای داده‌ها و به تبع آن موجب افزایش قوانین می‌گردد. بنابراین انتخاب صحیح شعاع مؤثر برای دسته‌بندی داده‌ها ضروری است. پس از تعیین شعاع مؤثر، باید قوانین فازی و توابع عضویت تعیین گردد. سپس روش مربعات خطا برای تعیین نتیجه توابع عضویت خروجی و سیستم انطباقی فازی به کار گرفته می‌شود (۴).

با سری فوریه محدود، تغییر کند. برای دماهای حداکثر و حداقل، فرض می‌شود که خود هم‌بستگی زمانی در طول سال برای یک ایستگاه معین به صورت ثابت باشد (۲۰). برای تولید داده‌ها با مدل LARS-WG لازم به نظر می‌رسد مشخصات ایستگاه شامل موقعیت مکانی و فایل داده‌های هواشناسی در دوره مبنا است، برای ورودی مدل به کار گرفته شوند. سپس مدل پس از تحلیل داده‌های ورودی، مشخصات آماری داده‌ها را بررسی و نتایج را در قالب فایل متنی ارائه می‌دهد.

به منظور ارزیابی دقت مدل، آزمون‌های آماری شامل t -آستیدونت، F و کای اسکوتر در مدل به کار گرفته می‌شوند. برای ریز مقیاس نمایی از مدل $HADCM_3$ با سناریوهای مختلف انتشار شامل $A1B$ ، A_2 و B_1 استفاده شد. به دلیل نبودن کفایت طول دوره آماری مقادیر تشعشع خورشیدی در ایستگاه سینوپتیک اراک، از داده‌های ساعت آفتابی در بخش ورودی مدل استفاده شد.

سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) برای اولین بار از سوی ژانگ (۹) معرفی شد. این سامانه ابزاری جامع برای تخمین توابع پیوسته حقیقی در دامنه‌ای محدود می‌باشد که به ازای هر درجه‌ای از صحت قابل استفاده است. بخش فازی مدل فازی-عصبی، رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده که اصطلاحاً تابع عضویت نامیده می‌شود. پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و بر اساس دو روش زیر تعیین می‌شوند:

(۱) روش پس انتشار خطا برای همه پارامترهای توابع عضویت.

(۲) روش ترکیبی شامل پس انتشار خطا برای پارامترهای توابع عضویت ورودی و روش حداقل مربعات برای پارامترهای توابع عضویت خروجی.

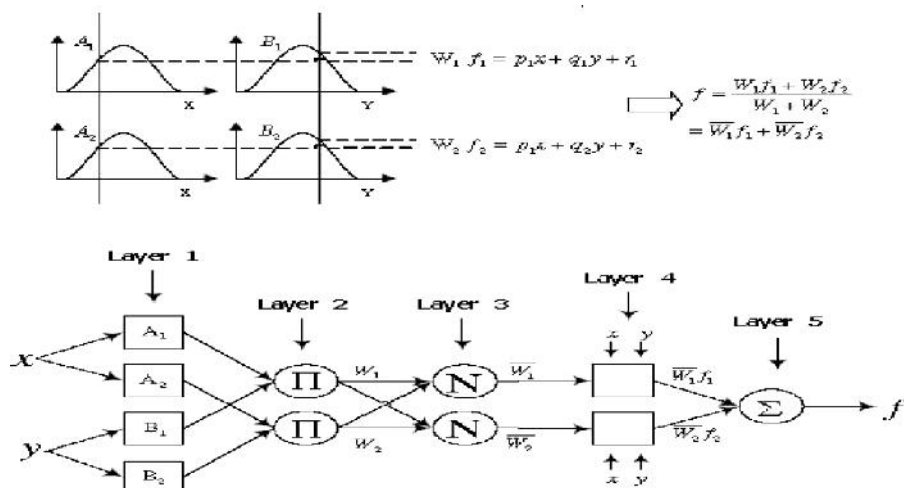
به‌طور کلی، در جعبه ابزار منطق فازی دو نوع سامانه استنتاج فازی موسوم به الف) سامانه استنتاجی نوع ممدانی و ب) سامانه استنتاجی نوع سوگنو وجود دارد. تفاوت اصلی آن‌ها در تابع عضویت است، به‌گونه‌ای که تابع عضویت خروجی در روش ممدانی غیرخطی است ولی در روش سوگنو خطی یا ثابت است. اگر فرض کنیم یک سامانه استنتاج فازی دارای دو ورودی x و y و یک خروجی z باشد، مدل فازی مرتبه اول سوگنو با دو قانون فازی If-Then به صورت زیر بیان می‌شود:

قانون ۱- اگر x برابر A_1 و y برابر B_1 باشد آنگاه:

$$z_1 = p_1x + q_1y + r$$

قانون ۲- اگر x برابر A_2 و y برابر B_2 باشد آنگاه:

$$z_2 = p_2x + q_2y + r$$



شکل ۱- مدل فازی مرتبه اول سوگنو با دو قانون فازی و مدل فازی- عصبی معادل آن.

فازی-عصبی با ۶ الگوی ورودی مطابق جدول ۱، برای بررسی اثرات تغییر اقلیم روی رواناب استفاده شد. الگوهای در نظر گرفته شامل ترکیب‌های متفاوتی از متغیرهای بارش (P)، دمای حداقل (T_{min})، دمای حداکثر (T_{max})، دمای میانگین (T_{mean}) و تشعشع خورشیدی (SR) در زمان‌های فعلی و پیشین بودند. ۷۰ درصد از داده‌های مشاهداتی برای واسنجی و ۳۰ درصد باقی مانده برای صحت سنجی مدل فازی-عصبی استفاده شدند.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

برای بررسی خطای مدل به ازای الگوهای ورودی در نظر گرفته شده از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) مطابق روابط زیر استفاده شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این روابط Q_o دبی مشاهداتی، Q_s دبی پیش‌بینی شده از طریق مدل، \bar{Q}_o میانگین مقادیر دبی مشاهداتی و N تعداد مشاهدات است.

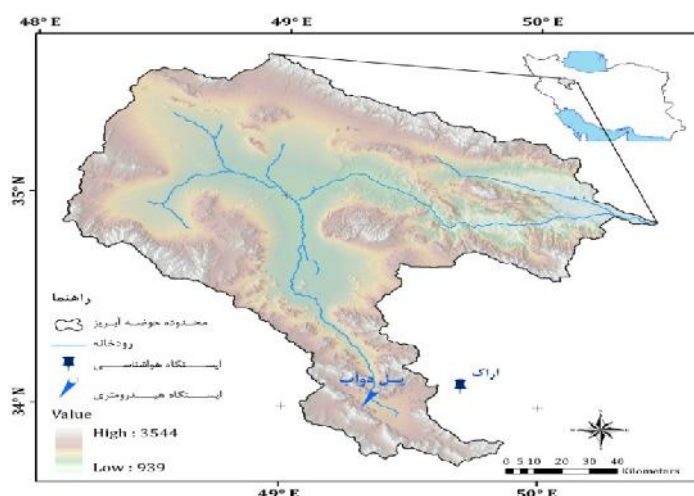
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قره‌چای یکپاز زیر حوزه‌های دریاچه نمک می‌باشد که بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۲). وسعت این حوزه در محدوده استان مرکزی برابر ۲۰۱۱۷ کیلومتر مربع است. رودخانه قره‌چای اصلی‌ترین رودخانه این حوزه آبخیز می‌باشد و طول آبراهه اصلی در این حوزه برابر ۷۱ کیلومتر بوده و تغییرات ارتفاع در محدوده این حوزه از ۹۳۹ تا ۳۵۴۴ متر متغیر است. در این تحقیق از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اراک که به لحاظ طول دوره آماری و کیفیت داده‌ها در محدوده مورد نظر قابل قبول بودند برای ریزمقیاس نمایی در مدل LARS-WG استفاده شد. همچنین برای پیش‌بینی رواناب از داده‌های تاریخی در محل ایستگاه هیدرومتری پل دو آب در خروجی حوزه استفاده شد. در شکل ۲ تصویری شماتیک از حوزه آبخیز و موقعیت ایستگاه سینوپتیک و هیدرومتری ارایه شده است.

در این تحقیق برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه، از داده‌های هواشناسی شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر و تعداد ساعات آفتابی استفاده گردید. بازه آماری داده‌های مورد استفاده حد فاصل سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۲ را شامل می‌شد. سامانه استنتاج

جدول ۱- الگوهای ورودی در نظر گرفته شده در سامانه استنتاج فازی- عصبی برای پیش‌بینی رواناب

شماره الگو	متغیرهای الگوی ورودی
۱	$P(t)$
۲	$P(t), T_{mean}(t)$
۳	$P(t), T_{max}(t), T_{min}(t)$
۴	$P(t), T_{max}(t), T_{min}(t), SR(t)$
۵	$P(t), P(t-1), T_{max}(t), T_{max}(t-1), T_{min}(t), T_{min}(t-1)$
۶	$P(t), P(t-1), T_{max}(t), T_{max}(t-1), T_{min}(t), T_{min}(t-1), SR(t), SR(t-1)$

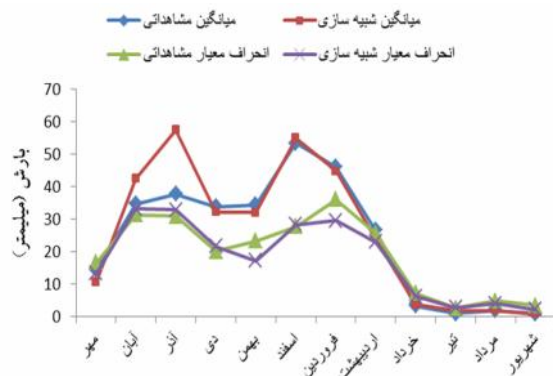


شکل ۲- محدوده جغرافیایی حوزه آبخیز قره‌چای در استان مرکزی.

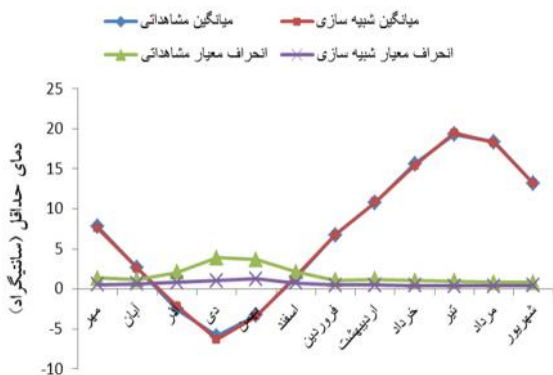
نتایج و بحث

به منظور تأیید روند ریز مقیاس نمایی، نمودارهای میانگین و انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده از راه مدل LARS-WG با مقادیر مشاهداتی در دوره مینا (۱۳۹۲-۱۳۶۲) مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای میانگین و انحراف معیار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای متغیرهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در مقیاس زمانی ماهانه در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. با توجه به این نمودارها و مقایسه مقادیر مشاهداتی و تخمینی از راه مدل تغییر اقلیم می‌توان گفت که ریز مقیاس نمایی انجام شده از دقت بالایی برخوردار است. با توجه به شکل ۳، مقادیر میانگین بارش مشاهداتی تطابق خوبی با مقادیر شبیه‌سازی شده

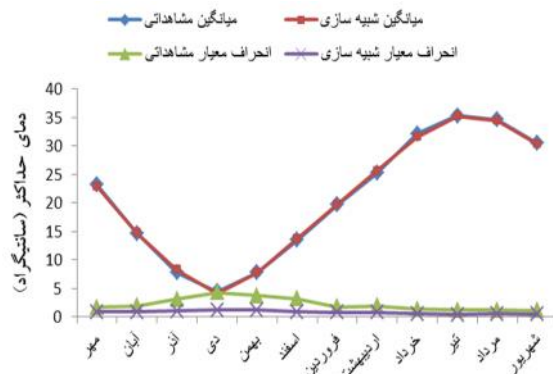
دارند و بیش‌ترین اختلاف در آذرماه دیده می‌شود. در خصوص مقادیر انحراف معیار بارش نیز بیش‌ترین اختلاف به ماه‌های بهمن و فروردین تعلق دارد. هم‌چنین با توجه به شکل ۴، مطابقت بسیار خوبی بین میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای حداقل وجود دارد. بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر انحراف معیار دمای حداقل ماهانه به دی ماه تعلق دارد. مشابه این روند برای مقادیر دمای حداکثر در شکل ۵ کاملاً مشهود است. نتایج به دست آمده در این بخش از هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج ثانی‌خانی و همکاران (۱۸) برخوردار است. در مطالعات آن‌ها نیز از مدل LARS-WG برای ریز مقیاس نمایی متغیرهای اقلیمی استفاده شده و نتایج مناسب و قابل قبول گزارش شده است.



شکل ۳- میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ماهانه.



شکل ۴- میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای حداقل ماهانه.



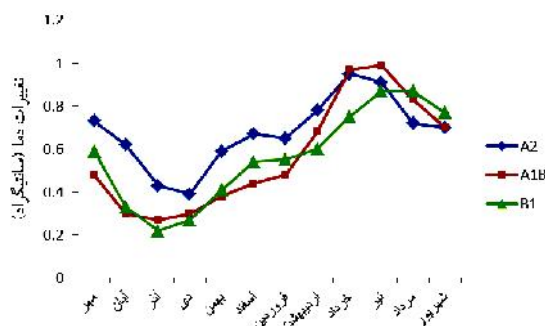
شکل ۵- میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای حداکثر ماهانه.

آذر وجود دارد. در آبان ماه با به کارگیری سناریوی B1 مقدار بارش به میزان ۶/۴ میلی‌متر نسبت به دوره مینا افزایش نشان می‌دهد. قابل ذکر است که روند کلی بارش کاهشی بوده و با لحاظ نمودن افق‌های زمانی دورتر نظیر ۱۴۴۵-۱۴۲۶ و ۱۴۸۰-۱۴۶۰ میزان کاهش بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین قابل توجه است که کلیه نتایج ارایه شده در این پژوهش با به کارگیری مدل گردش عمومی HADCM3 به دست آمده است و دلیل استفاده از این مدل ارایه نتایج مناسب‌تر نسبت به سایر مدل‌های گردش عمومی می‌باشد (۸).

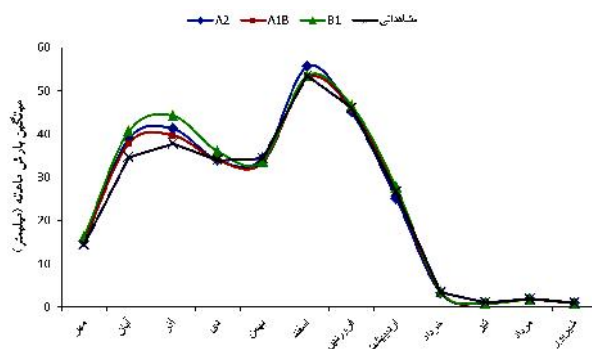
در شکل ۶ نیز تغییرات دما در حد فاصل ۱۳۹۳ تا ۱۴۱۰ به ازای سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با در نظر گرفتن کلیه سناریوهای مورد استفاده بیش‌ترین تغییرات دمایی به ازای سناریوی A1B و در تیر ماه وجود دارد. در شکل ۷ تغییرات بارش ماهانه با به کارگیری سناریوهای مختلف شامل A1B، A2 و B1 در دروه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۱۰ در مقایسه با دوره مینا (۱۳۹۲-۱۳۶۲) ارایه شده است. به نظر می‌رسد نتایج به کارگیری سناریوهای مختلف برای مقادیر بارش چندان محسوس نبوده و بیش‌ترین اختلافات در ماه‌های آبان و

قابل ذکر است که در شکل ۹ در دوره ۱۴۱۰-۱۳۹۳ برای ماه‌های دی و بهمن، تغییرات دما نسبت به دوره مبنا برابر صفر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دید که روند کلی دما افزایشی و روند بارش کاهشی بوده است. این تغییرات در دوره‌های زمانی دورتر نظیر ۱۴۷۹-۱۴۶۰ محسوس‌تر می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که تغییر اقلیمی وسیعی در سطح منطقه وجود دارد و باید راه‌کارهای مناسب برای سازگاری و مقابله با آن در نظر گرفته شود.

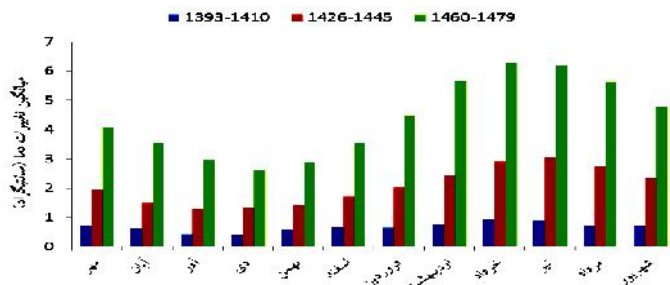
در شکل ۸ روند تغییرات بارش در افق‌های زمانی مختلف آتی به ازای سناریوی A2 ارایه شده است. دلیل اصلی استفاده از این سناریو در ارایه نتایج کلی، رفتار محافظه‌کارانه و مناسب‌تر آن نسبت به سایر سناریوها است. این سناریو به واقعیت تولید گازهای گلخانه‌ای نزدیک‌تر می‌باشد (۱۲). در شکل ۹ نیز روند تغییرات دما برای سناریو A2 برای افق‌های آتی در محدوده حوزه‌ارایه شده است. نتایج کلی ارایه شده در شکل‌های ۸ و ۹ به صورت کمی در جدول ۲ آورده شده است.



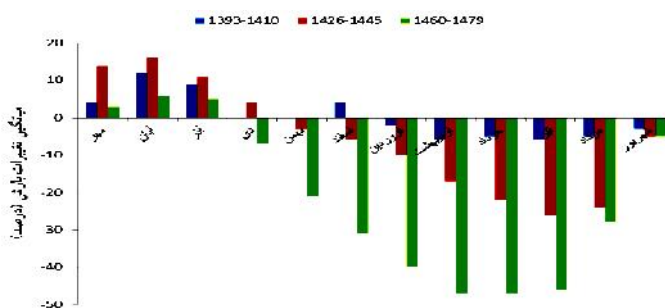
شکل ۶- تغییرات دمای ماهانه به ازای سناریوهای مختلف در سال‌های ۱۴۱۰-۱۳۹۳.



شکل ۷- الگوی بارش ماهانه به ازای سناریوهای مختلف در سال‌های ۱۴۱۰-۱۳۹۳.



شکل ۸- روند تغییرات بارش با به‌کارگیری سناریوی A2 در افق‌های زمانی مختلف آینده.



شکل ۹- روند تغییرات دما با به کارگیری سناریوی A₂ در افق‌های زمانی مختلف آینده.

جدول ۲- تغییرات میانگین سالانه متغیرهای اقلیمی در حوزه قره‌چای (سناریو A₂)

دوره مطالعاتی	تغییرات بارش (درصد)	تغییرات دما (سانتی‌گراد)
۱۳۹۳-۱۴۱۰	۰/۲	۰/۷
۱۴۲۶-۱۴۴۵	-۵/۷	۲/۱
۱۴۶۰-۱۴۷۹	-۲۱/۵	۴/۴

واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شده است. ساختار و مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل فاز-عصبی از نوع افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

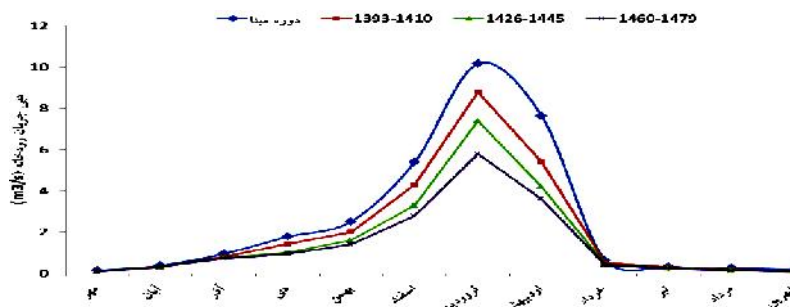
در گام بعدی با توجه به داده‌های اقلیمی دوره پایه و مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب، به بررسی عملکرد مدل فاز-عصبی تطبیقی در قالب دو روش افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی با توجه به الگوهای تعریف شده پرداخته شد. در این بخش از داده‌های تاریخی برای

جدول ۳- ساختار و شاخص‌های دقت مدل فاز-عصبی از نوع افراز در مدل‌سازی رواناب با الگوهای مختلف

شماره الگو	نوع تابع عضویت	ساختار مدل	واسنجی	صحت سنجی
			RMSE	R^2
۱	مثلثی	{۳}	۱/۷۸	۰/۳۸
۲	گوسی	{۳ و ۲}	۱/۶۸	۰/۴۳
۳	گوسی	{۳ و ۳ و ۲}	۱/۵۴	۰/۵۳
۴	مثلثی	{۳ و ۳ و ۲ و ۲}	۱/۴۶	۰/۶۱
۵	مثلثی	{۲ و ۳ و ۳ و ۲ و ۲}	۱/۳۱	۰/۷۴
۶	مثلثی	{۳ و ۳ و ۲ و ۳ و ۲ و ۲}	۱/۲۲	۰/۸۴

جدول ۴- ساختار و شاخص‌های دقت مدل فاز-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی در مدل‌سازی رواناب با الگوهای مختلف

شماره الگو	شعاع مؤثر دسته	واسنجی	صحت سنجی
		RMSE	R^2
۱	۰/۴۸	۱/۷۴	۰/۴۵
۲	۰/۵۳	۱/۶۵	۰/۴۹
۳	۰/۶۴	۱/۵۱	۰/۵۸
۴	۰/۵۶	۱/۴۲	۰/۶۵
۵	۰/۷۴	۱/۳۰	۰/۷۹
۶	۰/۸۰	۱/۱۹	۰/۸۸



شکل ۱۰- مقایسه هیدروگراف رواناب مشاهداتی در دوره پایه با رواناب شبیه‌سازی شده در افق‌های زمانی مختلف آینده.

۱۴، ۲۷ و ۴۳ درصد در مقایسه دوره مبنا کاهش یافته است. کاهش محسوس در میزان رواناب تحت تأثیر رخداد تغییر اقلیم در حوزه می‌باشد و به نظر می‌رسد کاهش بارش و افزایش دما در دوره‌های آتی تأثیر به‌سزایی بر کاهش رواناب داشته باشد. مقایسه نتایج به دست‌آمده در این تحقیق با مطالعات ضرغامی و همکاران (۲۱)، یافته‌های ایشان را تأیید می‌کند. در مطالعات آن‌ها نیز کاهش محسوس میزان رواناب در حوزه‌های آبخیز استان اذربایجان شرقی گزارش شده است. این مقادیر کاهش دبی در طول قرن حاضر می‌تواند تهدیدی جدی برای منابع آب حوزه باشد و زمینه‌ساز وقوع خشکسالی‌های شدید در سطح منطقه گردد. بنابراین لازم است برنامه‌ریزی و استراتژی مدیریتی مناسبی برای سازگاری و مقابله با تغییر اقلیم در سطح منطقه در نظر گرفته شود.

در این تحقیق به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوزه‌قره‌چای در استان مرکزی در سه افق زمانی آینده پرداخته شد. برای ریز مقیاس نمایی متغیرهای از مدل آماری LARS-WG همراه با مدل گردش عمومی HADCM3 تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 استفاده شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق حاکی از روند کاهشی بارش و روند افزایشی دما در سطح حوزه در بازه‌های زمانی آینده بوده‌است به طوری نتایج نشان می‌دهد در افق ۱۴۳۵ مقدار بارش به میزان ۵/۷ درصد کاهش و دما به میزان ۲/۱ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت. از انواع مدل فازی-عصبی تطبیقی شامل افراز شبکه و دسته‌بندی تفریقی برای شبیه‌سازی رواناب در سه افق زمانی آینده استفاده شد. بهترین عملکرد مدل به ازای الگوی شماره ۶ که شامل ترکیبی از کلیه متغیرهای اقلیمی مورد استفاده بود، به دست آمد و در این باره عملکرد روش دسته‌بندی تفریقی اندکی بهتر از روش افراز شبکه بود. نتایج نشان داد که مقدار دبی حداکثر جریان در افق ۱۴۳۵ در مقایسه با دوره پایه (۱۳۹۲-۱۳۶۲) به میزان ۲۷ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج به دست آمده در این تحقیق وجود تغییر اقلیم در سطح حوزه را تأیید می‌نمایند.

بنابراین لازم است تا تمهیدات لازم برای سازگاری و مقابله با تغییر اقلیم در سال‌های آتی در دستور کار مدیران و برنامه‌ریزان مربوطه قرار گیرد. همچنین با توجه به این‌که تحقیق حاضر در مقیاس حوزه درجه سه قره‌چای از زیرحوزه‌های دریاچه نمک صورت گرفته است، پیشنهاد می‌شود تا این تحقیق در مقیاس حوزه درجه دو در منطقه صورت گیرد که این نتایج می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های آتی در این خصوص مؤثر و کارا باشد.

برای مدل فازی-عصبی از نوع افراز شبکه ساختار اصلی مدل شامل نوع تابع عضویت و تعداد توابع عضویت است که در جدول ۳ به ازای ورودی‌های مختلف ارایه شده است؛ برای مثال، با به کارگیری الگوی شماره ۲ که شامل بارش و دمای میانگین می‌باشد، تابع عضویت از نوع گوسی بوده و تعداد توابع برای متغیرهای بارش و دما به ترتیب برابر ۲ و ۳ است. نوع و تعداد توابع عضویت با استفاده از آزمون و خطا و با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری از جمله RMSE تعیین شد. با توجه به جدول ۳ می‌توان دید که برای روش افراز شبکه بهترین الگوی ورودی، الگوی شماره ۶ بوده است که در آن کلیه متغیرهای اقلیمی شامل بارش، تشعشع خورشیدی، دمای حداقل و حداکثر در گام زمانی فعلی و قبلی برای مدل‌سازی رواناب استفاده شده‌اند.

در مدل فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، مهم‌ترین پارامتر در تعیین ساختار بهینه مدل شعاع مؤثر دسته است که مقدار آن در محدوده صفر تا یک تغییر می‌کند. هر چه مقدار شعاع مؤثر کم‌تر باشد، تعداد توابع عضویت و قوانین فازی افزایش می‌یابد. در جدول ۴، مقادیر شعاع مؤثر به ازای الگوهای ورودی مختلف ارایه شده است. در روش دسته‌بندی تفریقی نیز مشابه روش افراز شبکه، بهترین عملکرد مدل با به کارگیری الگوی شماره ۶ به دست آمده است. مقایسه نتایج ارایه شده در جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که عملکرد روش دسته‌بندی تفریقی اندکی بهتر از روش افراز شبکه در مدل‌سازی رواناب بوده است. بنابراین در ادامه کار به منظور پیش‌بینی رواناب در افق‌های آتی از الگوی شماره ۶ و روش دسته‌بندی تفریقی استفاده می‌شود. در این مرحله با استفاده از داده‌های اقلیمی تولیدی از راه مدل LARS-WG با به کارگیری مدل گردش عمومی HADCM3 و سناریوی A2 که عملکردی مناسب‌تر و دقیق‌تری دارد، تغییرات رواناب در سه افق زمانی آینده بررسی شد. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات رواناب سه افق زمانی مختلف در مقایسه با دوره پایه (۱۳۹۲-۱۳۶۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت که روند کلی هیدروگراف رواناب در افق‌های مختلف آینده مشابه روند آن در دوره مشاهداتی و پایه بوده است. مقادیر حداکثر جریان در مطالعات هیدرولوژی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در کلیه گراف‌های ارایه شده حداکثر مقدار دبی جریان در فروردین ماه بوده است که یکی از دلایل عمده آن می‌تواند وجود جریان ناشی از ذوب برف در سطح حوزه باشد. بررسی مقدار دبی حداکثر در افق‌های زمانی مختلف (شکل ۱۰) حاکی از آن بود که مقدار دبی در افق‌های ۱۴۰۰، ۱۴۳۵ و ۱۴۷۰ به ترتیب به میزان

منابع

1. Abonyi, J., H. Andersen, L. Nagy and F. Szeifert. 1999. Inverse Fuzzy-Process-Model Based Direct Adaptive Control. *Mathematics and Computers in Simulation*, 51: 119-132.
2. Chang, J., Y. Wang, E. Istanbuluoglu, T. Bai, Q. Huang, D. Yang and S. Huang. 2014. Impact of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Weihe River Basin, China. *Quaternary International*, pp: 169-179.
3. Chiew, F.H.S., P.H. Whetton, T.A. McMahon and A.B. Pittock. 1995. Simulation of the Impacts of Climate Change on Runoff and Soil Moisture in Australian Catchments. *Journal of Hydrology*, 167: 121-147.
4. Chiu, S. 1994. Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2: 267-278.
5. Chiu, S.L. 1995. Extracting Fuzzy Rules for Pattern Classification by Cluster Estimation. In: *The 6th Internet Fuzzy Systems Association World Congress*, pp: 1-10.
6. Firat, M. and M. Gungor. 2007. River Flow Estimation Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Mathematics and Computers in Simulation*, 75: 87-96.
7. Fujihara, Y., K. Tanaka, T. Watanabe, T. Nagano and T. Kojiri. 2008. Assessing the Impacts of Climate Change on the Water Resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of Dynamically Downscaled Data for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrology*, 353: 33-48.
8. Jakson, C. and M. Sen. 2009. Stochastic Representation of Parameter Uncertainties within Model Predictions of Future Climate, Institute of Geophysics, University of Texas at Austin, 93 pp.
9. Jang, J.S.R. 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System IEEE. *Trans Syst Manage Cybernet*. 23: 665-685.
10. Kennedy, P., M. Condon and J. Dowling. 2003. Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctant Motors Using a Neuro-Fuzzy Control Strategy. In: *Proceedings of the IASTED International Conference on Modeling and Simulation*.
11. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Fourth Assessment Report, Climate Change. 53 pp.
12. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C.A. Johnson, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
13. Kaleris, V., D. Papanastopoulos and G. Lagas. 2001. Case Study on Impact of Atmospheric Circulation Changes on River Basin Hydrology: Uncertainty Aspects. *Journal of Hydrology*, 245: 137-152.
14. Matondo, J.I., G. Peter and K.M. Msibi. 2004. Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part II. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 29: 1193-1202.
15. Nayak, P.C., K.P. Sudheer, D.M. Rangan and K.S. Ramasastri. 2004. A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 29: 52-66.
16. Racsco, P., L. Szeidl and M. Semenov. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57: 27-41.
17. Sanikhani, H. and O. Kisi. 2012. River flow estimation and forecasting by using two different adaptive neuro-fuzzy approaches, *Water Resources Management*, 26: 1715-1729.
18. Sanikhani, H., Y. Dinpashoh, S. Pour Yusef, S.Z. Ghavidel and B. Solati. 2014. The impact of climate change on runoff in watersheds (case study: Ajichay watershed in East Azerbaijan Province, Iran). *Journal of Water and Soil*, 27: 1225-1234 (In Persian).
19. Semenov, M.A. and E.M. Barrow. 1997. Use of a Stochastic Weather Generator in the Development of Climate Change Scenarios. *Climate Change*, 35: 397-414.
20. Semenov, M.A. and R.J. Brooks. 1999. Spatial Interpolation of the LARS-WG Stochastic Weather Generator in Great Britain. *Climate Research*, 11: 137-148.
21. Semenov, M.A., R.J. Brooks, E.M. Barrow and C.W. Richardson. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG Stochastic Weather Generators for Diverse Climates. *Climate Research*, 10: 95-107.
22. Srikanthan, R. and T.A. McMahon. 2001. Stochastic Generation of Annual, Monthly and Daily Climate Data: a Review. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 5: 653-670.
23. Talei, A., L.H.C. Chua and T.S.W. Wong. 2010. Evaluation of Rainfall and Discharge Inputs Used by Adaptive Network-Based Fuzzy Inference Systems (ANFIS) in Rainfall-Runoff Modeling. *Journal of Hydrology*, 391: 248-262.
24. Zarghami, M., A. Abdi, I. Babaeian, Y. Hasanzadeh and R. Kanani. 2011. Impacts of Climate Change on Runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78: 137-146.

The Impacts of Climate Change on Runoff of Ghareh-Chay Basin in Markazi Province, Iran

Hadi Sanikhani¹, Mohammad Reza Gohardoust² and Morteza Sadeghi³

1- PhD. of Water Resources Engineering, Member of Young Researchers and Elite Club, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran (Corresponding author: hsanikhani12@gmail.com)

2- Graduate M.Sc., Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

3- PhD., Ferdowsi University of Mashhad

Received: October 9, 2014

Accepted: February 9, 2015

Abstract

Climate change has a critical impact on water resources, especially in arid regions. In the first part of the study, the LARS-WG was used for downscaling of climatic variables including rainfall, solar radiation, minimum and maximum temperature over the Ghareh-Chay basin in Markazi province for a 31 year historical period (1983-2013). Results showed that LARS-WG can be applied successfully to downscale the climatic variables. By using the three emission scenarios, A1B, A2 and B1 in different future horizon, decreasing and increasing trends were seen for rainfall and temperature, respectively. In the second part of study, adaptive inference neuro fuzzy system (ANFIS) was applied for run-off simulation over the basin for three different horizons, 1400, 1435 and 1470. Two different identification methods namely, grid partitioning and subtractive clustering were used for ANFIS model. Performance of the subtractive clustering was slightly better than the grid partitioning in run-off modeling process. The results indicated that in comparison to the baseline period, the maximum discharge will be reduced by 14, 27 and 43 percent in 2020, 2055 and 2090 horizons, respectively. Based on the occurrence of climate change over the basin and intensification during the next years, it seems necessary to consider some ways for adaptation and coping with climate change for protecting the water resources.

Keywords: ANFIS, Climate change, Downscaling, LARS-WG, Run-off