

سه صدم و سه درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. نتایج پیش‌بینی بارش ماهانه برای دوره‌های آبی نیز نشان داد که بارش روند مشخصی نداشته و در بعضی ماه‌ها افزایش و در بعضی از ماه‌ها کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها نشان داد که مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی کم‌ترین خطا را در بین مدل‌ها داشتند. در حالت کلی نتایج مدل‌سازی بارش - رواناب نشان داد که هر کدام از مدل‌های انتخاب شده، دارای عدم قطعیت بوده و در بعضی فصل‌ها رواناب افزایشی و در بعضی فصل‌ها کاهش خواهد بود.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی بارش - رواناب، داده کاوی، مدل گردش عمومی، ریز مقیاس کردن، حوزه آبخیز آبی چای

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی می‌باشد که بخش‌های مختلف زندگی انسان را در روی کره زمین تحت تاثیر قرار داده است. شرایط اقلیمی گرم‌تر باعث تشدید چرخه آب، تغییر بارش و تغییر در مقدار و زمان ظهور رواناب می‌گردد. بر هم خوردن تعادل سامانه اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای بر اهمیت مطالعه اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیکی از جمله رواناب می‌افزاید، از سوی دیگر پیش‌بینی‌های اقلیمی در حوزه‌های آبخیز جهت استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان کشور ضروری به نظر می‌رسند [۳]. تحقیقات در زمینه تغییر اقلیم بر اساس تمام مدل‌های گردش عمومی نشان‌دهنده آن است که افزایش دما در سطح زمین و افزایش شدت بارش و مقدار آن بر اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را در قرن حاضر می‌باشد [۱۱]. شدت و خصوصیات اثرات منفی تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه‌های آبخیز از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال در حوزه‌های آبخیزی که بخش قابل توجهی از جریان رودخانه از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود حساسیت کم‌تری نسبت به تغییر اقلیم دارند [۱].

امروزه آب، این منبع حیاتی، به عنوان یکی از عوامل تشکیل و بقای محیط زیست (خاک، آب و هوا) بیش از هر زمان دیگر مورد توجه می‌باشد، که تحت تاثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته است [۶]. گرم شدن هوا و تاثیر آن بر چرخه هیدرولوژی مسئله‌ای است که امروزه تمام دانشمندان علوم جو بر آن تاکید دارند [۳]. تغییرات مشاهده شده نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر اثرات بشر بر روی سامانه

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوزه آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز آبی چای)

مجید کاظم زاده^۱، آرش ملکیان^۲، علیرضا مقدم نیا^۳ و شهرام خلیقی سیگارودی^۲
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

چکیده

بر هم خوردن تعادل سامانه اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اهمیت مطالعه اثر تغییر اقلیم بر روی متغیرهای هیدرولوژیکی از جمله رواناب می‌افزاید. لذا در این پژوهش ابتدا تغییرات ناگهانی و روند متغیرهای هیدرو - اقلیمی با استفاده از رویکرد داده‌کاوی و داده‌های ماهانه و سالانه ۱۸ ایستگاه آبسنجی و بارانسنجی با طول دوره آماری ۴۰ سال (۱۳۹۰-۱۳۵۱) مطالعه شد و در گام دوم، برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز، خروجی دمای حداکثر و دمای حداقل و بارش مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریو تغییر اقلیم A2 و B2 با استفاده از مدل SDSM ریز مقیاس گردیدند. در گام نهایی از پنج مدل داده‌کاوی و هوشمند شامل M5، M5Rules، ANFIS و MLP، SVM جهت مدل سازی بارش - رواناب استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد که متغیرهای اقلیمی در طول چهار دهه گذشته دارای تغییرات ناگهانی و روند بوده و مطالعه اثر تغییر اقلیم و استفاده از سناریوی تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی بر جریان آب رودخانه آبی چای ضروری می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که دمای حداکثر در طول دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) تحت سناریوهای A2 و B2 به ترتیب دو و چهار صدم و دو و چهار دهم درجه سانتی‌گراد و طی دوره (۲۰۹۱-۲۰۵۰) به ترتیب سه و هشتاد و هفت صدم و پنج و یازده صدم درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. هم‌چنین دمای حداقل سالانه در طول دوره (۲۰۱۰-۲۰۵۰) تحت سناریوهای A2 و B2 به ترتیب یک و شصت و سه صدم و یک و نود صدم درجه سانتی‌گراد و طی دوره (۲۰۹۱-۲۰۵۰) به ترتیب سه و هفتاد

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز - آب دانشگاه تهران
 ۲- نویسنده مسئول و دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. پست الکترونیک: Malekian@ut.ac.ir
 ۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

اقلیمی واضح بوده و تولید گازهای گلخانه‌ای در بیشترین مقدار خود در طول تاریخ می‌باشد و این تغییرات اقلیم اثرات گسترده‌ای بر روی سیستم‌های طبیعی و انسانی داشته است. گرم شدن سامانه اقلیم و تغییرات مشاهده شده از سال ۱۹۵۰ بی‌سابقه بوده و دمای زیاد جو و اقیانوس‌ها باعث شده که مقدار برف و یخ کاهش یابد، در نهایت باعث افزایش سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها شود. بنابراین مطالعه و بررسی اثر تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز از جمله رواناب از اهمیت خاصی در بحث مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب برخوردار است. لذا در بین عوامل مختلف تاثیرگذار بر چرخه هیدرولوژی، متغیرهای بارش، دمای حداکثر و حداقل و رواناب را می‌توان از جمله مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوزه آبخیز معرفی کرد. گام اول رویکرد کلی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب و رفتار هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی تغییر اقلیم آینده با استفاده از GCM است، گام دوم مربوط به ریزمقیاس‌سازی از مقیاس جهانی به مقیاس منطقه‌ای و در نهایت پیش‌بینی و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد [۲۹].

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای بر جریان آب رودخانه توسط محققین مختلفی انجام گردیده است. مهسافر و همکاران [۱۹] در پژوهشی تغییرات سطح تراز دریاچه ارومیه ناشی از تغییر اقلیم را با استفاده از مدل HadCM3 تحت سناریوهای گازهای گلخانه‌ای (A2, B2) و شبکه‌های نروفازی^۱ برای دوره (۲۰۰۰-۲۱۰۰) مورد بررسی قرار دادند. اثرات تغییر اقلیم بر تراز آبی دریاچه ارومیه براساس پیش‌بینی مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 حاکی از افزایش میانگین سالانه دما و کاهش میانگین سالانه سطح تراز دریاچه به ترتیب به اندازه ۲/۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۴/۶۰ متر می‌باشد. همچنین سناریوی B2 حاکی از افزایش میانگین سالانه دما و کاهش میانگین سالانه سطح تراز دریاچه به ترتیب ۲/۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۳/۹۳ متر می‌باشد. با مقایسه نتایج سناریوهای A2 و B2 مشاهده گردید که سناریوی A2 حالت بحرانی‌تری را برای شرایط آبی دریاچه ارومیه پیش‌بینی می‌کند و دریاچه ارومیه تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی A2 خشک خواهد شد. صمدی و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل گردش عمومی جو HadCM3 و دو روش ریزمقیاس‌سازی آماری و شبکه عصبی مصنوعی، جریان رودخانه را در حوزه آبخیز کرخه طی سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ میلادی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که جریان سالانه براساس مدل‌های SDSM و شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب ۳/۷ و ۹/۴۷ متر مکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت. کربای و همکاران [۲۵] پژوهشی تحت عنوان اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب بنگلادش انجام دادند و نتایج آن‌ها مشخص کرد که اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب کشور در مقایسه با تغییرات دیگر مانند توسعه سیستم‌های آبیاری قابل ملاحظه خواهد بود. هدف از پژوهش حاضر شامل (۱)

بررسی تغییرات زمانی درجه حرارت و بارندگی در حوزه آبخیز آجی‌چای و پیش‌بینی مقادیر آبی آن‌ها (۲) استفاده از مدل بارش - رواناب مناسب برای شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز آجی‌چای در دوره‌های پایه و آبی و (۳) بررسی میزان تغییرات رواناب خروجی در حوزه آبخیز مورد نظر تحت سناریوهای مختلف در دوره آبی نسبت به دوره پایه، می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

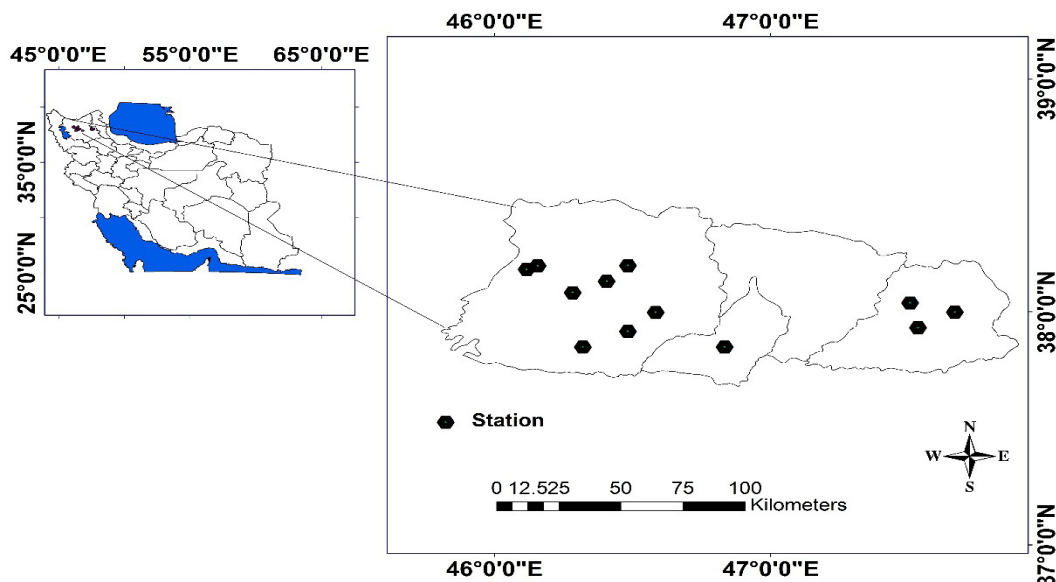
حوزه آبخیز آجی‌چای در شمال‌غرب ایران یکی از مهم‌ترین زیر حوزه‌های دریاچه ارومیه می‌باشد و به لحاظ موقعیت جغرافیایی بین عرض‌های جغرافیایی ۴۲° ۳۷' تا ۳۸° ۳۰' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۰° ۴۵' تا ۴۷° ۵۳' شرقی واقع شده است. این حوزه آبخیز حدود ۱۱۴۵۷ کیلومترمربع مساحت دارد و حدود ۲۲ درصد از کل مساحت حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را در برمی‌گیرد. مرتفع‌ترین نقطه در این حوزه ۳۸۵۰ متر از سطح دریا و پست‌ترین محل دریاچه ارومیه با ۱۲۷۴ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. شیب متوسط این حوزه آبخیز ۸/۷۲ درصد برآورد گردیده است. میزان بارندگی سالانه در حوزه آبخیز آجی‌چای ۳۴۶ میلی‌متر و حجم کل بارش سالانه ۳۹۷۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. رژیم بارندگی در این حوزه آبخیز، از تیپ بهاره است و حداکثر بارش ماهانه در فرودین و اردیبهشت و حداقل آن در مرداد ماه می‌باشد. بخش مهمی از ریزش‌های جوی در این حوزه آبخیز به صورت جامد و برفی می‌باشد. میانگین سالانه دمای متوسط روزانه در منطقه از حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در اطراف دریاچه ارومیه تا کم‌تر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات سهند متغیر است.

توصیف داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق در مجموع از ۱۸ ایستگاه آسنجی، بارانسجی و سینوپتیک به صورت روزانه، ماهانه و سالانه در حوزه آبخیز آجی‌چای استفاده شده است (شکل ۱). همچنین بررسی روند و همگنی متغیرهای هیدرو-اقلیمی در ایستگاه‌های آسنجی و بارانسجی به صورت ماهانه با دوره آماری ۴۰ سال (۱۳۵۱ تا ۱۳۹۰) در نظر گرفته شده است. در بخش مطالعه ریزمقیاس‌کردن و استفاده از نتایج GCMها در پیش‌بینی تغییرات آبی به علت کیفیت و صحت بیشتر داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، از ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و سراب استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

۱- بررسی روند متغیرهای هیدرو-اقلیمی دوره مشاهداتی در این مطالعه جهت تحلیل روند متغیرهای هیدرو-اقلیمی از آزمون‌های من-کندل و شیب خط‌شن که معتبرترین روش‌های تحلیل دراز مدت روند می‌باشد، استفاده می‌شود [۱۲].



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های در نظر گرفته شده در حوزه آبخیز آجی‌چای

Fig 1. The distribution maps of stations in the Aji- Chai Watershed

می‌توان به پژوهش‌های آذری و همکاران [۳]، ذهبیون و همکاران [۳۱]، مساح بوانی و مرید [۲۰] اشاره کرد. برای ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف بارش - رواناب از پنج مدل داده کاوی و هوشمند در این تحقیق استفاده شده است.

۴-۱- مدل‌های M5 Rules و M5

مدل درختی M5 زیر مجموعه‌ای از روش‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشینی می‌باشد که توسط کولان [۲۴] ارائه گردیده است. داده‌کاوی و یادگیری ماشینی به عنوان یکی از شاخه‌های هوش مصنوعی می‌باشند که هدف آن‌ها این می‌باشد که با افزایش تعداد داده‌ها عملکرد بهتری را از خود نشان دهند. در این روش فضا یا محدوده مقادیر داده‌های ورودی به چند زیر بازه یا ناحیه تقسیم شده و برای هر ناحیه یک معادله یا مدل مناسب استخراج می‌شود [۴].

۴-۲- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

شبکه‌های عصبی مصنوعی از فرایند موجود در شبکه‌های عصبی مغز انسان الگو برداری می‌کنند. ایده آن برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ در یکی از دانشکده‌های روانپزشکی مطرح شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی در رشته‌های مختلفی استفاده شده است که اصول کلی آن شامل طبقه‌بندی، شناسایی و تشخیص الگوها و کنترل سیستم‌ها است. متداول‌ترین شبکه‌ها در پیش‌بینی و حل مسائل غیرخطی شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه می‌باشند. به طور کلی ساختار شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، از سه قسمت مهم ورودی، لایه پنهان و خروجی تشکیل شده است که در معماری ساختار شبکه در هر لایه تعدادی نرون در نظر گرفته می‌شود. تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های وابسته به ماهیت مسئله مورد تحقیق فرق می‌کند، در حالی که تعداد نرون‌های موجود در لایه پنهانی و همچنین تعداد این

۲- سناریوهای انتشار

مهم‌ترین ورودی‌های مدل‌های گردش عمومی جو، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی است، اما محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره‌های آتی به طور قطعی امکان پذیر نیست. از این رو سناریوهای مختلفی برای آن‌ها توسط هیئت بین الدول تغییر اقلیم گزارش شده و استفاده می‌شود، که در این مطالعه از دو سناریو انتشار A2 و B2 استفاده می‌شود [۲۱].

۳- ریزمقیاس‌سازی خروجی مدل‌های GCM

داده‌های GCM معمولاً در شبکه‌های به اضلاع ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر اندازه گیری می‌شوند. برای تبدیل این اطلاعات به مقیاس‌های کاربردی در سطح حوزه آبخیز یا منطقه، از روش‌های ریزمقیاس‌سازی استفاده می‌شود. روش‌های ریزمقیاس‌سازی در حالت کلی به دو روش دینامیکی و آماری تقسیم می‌گردد. روش‌های آماری با هدف توسعه روابط بین متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای و شناسایی روابط بین سیستم‌ها از روی داده‌های مشاهداتی توسعه داده شده‌اند. با توجه به محاسبات ساده، هزینه و زمان کم روش‌های آماری نسبت به روش ریزمقیاس‌سازی دینامیکی، از روش‌های آماری بیشتر استفاده می‌شود. در این مطالعه از روش ریزمقیاس‌سازی مدل رگرسیون خطی SDSM که خود یک روش آماری بوده استفاده می‌شود [۲۱].

۴- مدل‌های بارش - رواناب

مدل‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی بارش - رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله می‌توان به مدل‌های داده مبنای شامل شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و غیره، مدل‌های مفهومی نظیر SWAT، HEC-HMS، HBV، IHACRES. SAC-SMA اشاره کرد. پژوهش‌های مختلفی در خصوص ارزیابی اثرات اقلیم با هریک از مدل‌های ذکر شده انجام گرفته است که

لایه‌ها، با سعی و خطا مشخص می‌شود [۱۰].

۴-۳- سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی^۱

شبیه‌سازی‌های هوش مصنوعی نظیر شبیه‌سازی‌های فیزیکی نتایج بسیار خوبی را ارائه می‌دهند. سامانه‌های فازی قادرند مسائلی را که به صورت مبهم و غیرصریح می‌باشند را شبیه‌سازی کنند. شبکه‌های عصبی توانایی بسیار بالایی را در حل مسائل پیچیده دارند زیرا قادرند از روی یک گروه از اطلاعات آموزش ببینند و رابطه‌ای مناسب را بین اطلاعات برقرار نمایند، و این مهم‌ترین کاربرد شبکه‌های عصبی است. جانگ در سال ۱۹۹۳ شبیه ANFIS را ارائه کرد که قابلیت ترکیب توانایی دو روش سامانه فازی و شبکه‌ی عصبی را داشت. ANFIS یک شبکه‌ی پیشخور چند لایه می‌باشد که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می‌کند [۸].

۴-۴- ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری نظارت شده است که از آن برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. رویکرد SVM به این صورت است که در فاز آموزش سعی می‌شود که مرز تصمیم‌گیری به گونه‌ای انتخاب گردد که حداقل فاصله آن با هر یک از دسته‌های موردنظر حداکثر گردد. این نوع انتخاب باعث می‌شود که تصمیم‌گیری در عمل، شرایط نویزی را به خوبی تحمل کند و پاسخ‌دهی خوبی داشته باشد. SVM روشی برای طبقه‌بندی دوتائی در فضای ویژگی‌های دلخواه است و روشی مناسب برای مسائل پیش‌بینی بشمار می‌رود [۲۳]. از مدل خبره SVM بیشتر در مسائل هیدرولوژیکی و منابع آب استفاده می‌شود. مدل‌های SVM یک دسته جدید از مدل‌هایی هستند که به منظور طبقه‌بندی و پیش‌بینی در علوم مختلف استفاده می‌شوند. ساختار این مدل توسط وینپک [۲۸] که یک ریاضی‌دان روسی بود معرفی شده است و بر پایه تئوری یادگیری آماری بنا نهاده شد.

نتایج

۱- تحلیل روند تغییرات متغیرهای هیدرو- اقلیمی طی چهار

دهه گذشته (۱۳۹۰-۱۳۵۱)

نتایج تحلیل روند نشان داد که متغیرهای اقلیمی در طول ۴ دهه گذشته دارای روند بوده و مطالعه اثر تغییر اقلیم و استفاده از سناریوی تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی بر جریان آب رودخانه آجی چای ضروری می‌باشد و لازم به ذکر است با توجه به مطالب حجیم بخش‌های بعدی از ارائه جداول این بخش صرف نظر شده است.

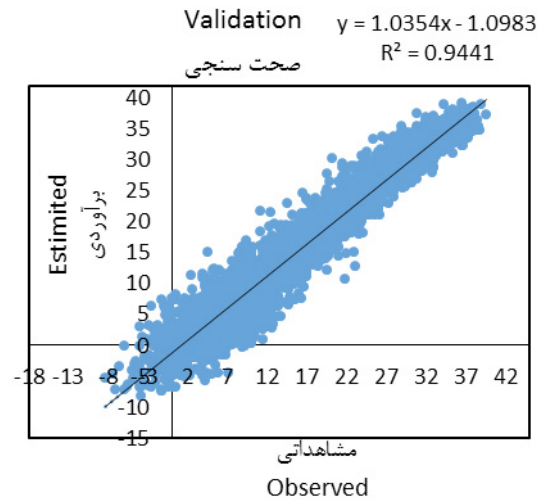
۲- ریزمقیاس‌سازی متغیرهای اقلیمی دمای حداکثر، دمای

حداقل و بارش

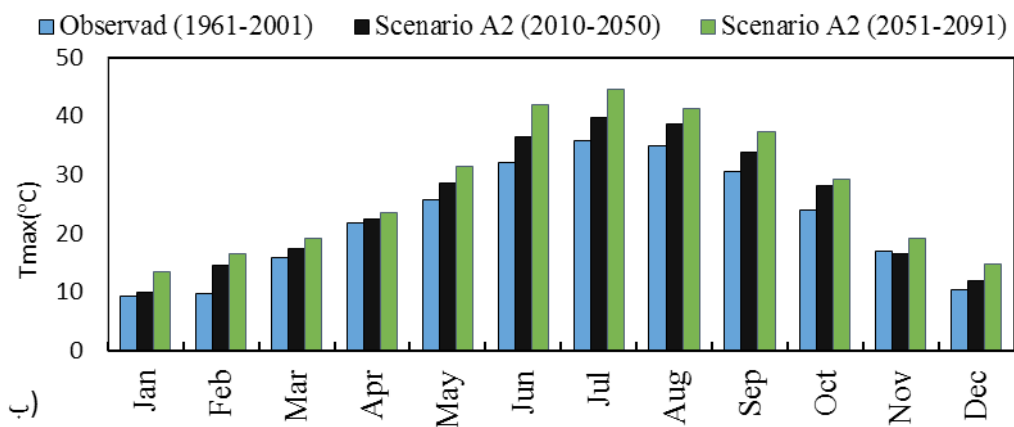
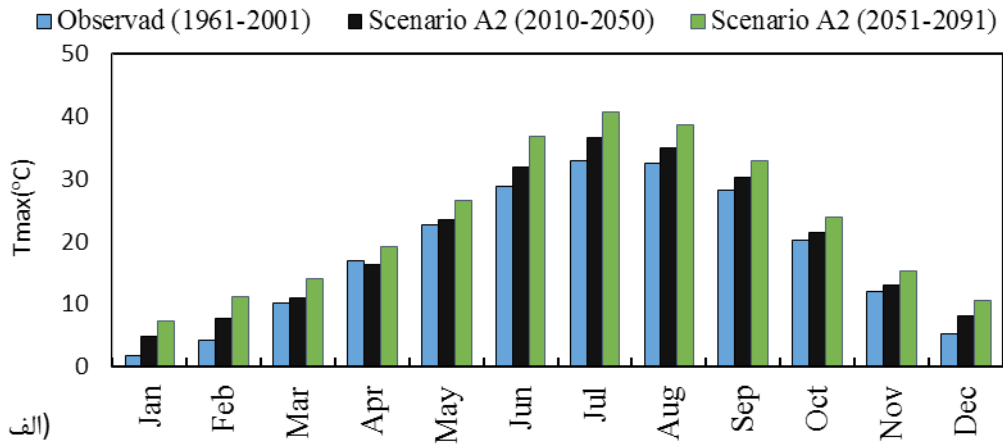
در این قسمت جهت ریزمقیاس‌سازی متغیرهای اقلیمی دما و بارش حاصل از خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت

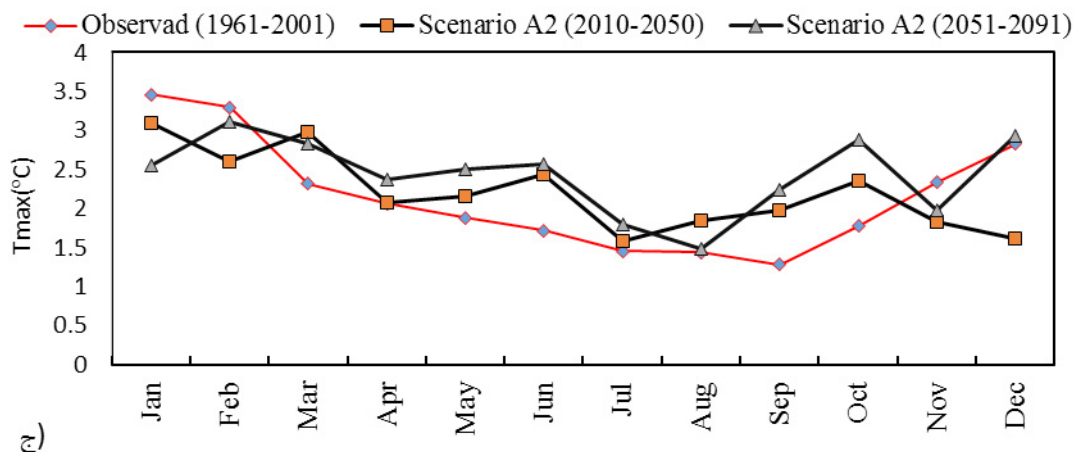
دو سناریو تغییر اقلیم A2 و B2 از مدل SDSM 4.2 استفاده شده است. لازم به ذکر است برای ریز مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی از داده‌های مشاهداتی دو ایستگاه تبریز و سراب که از لحاظ آماری داده کافی در حوزه آبخیز آجی چای داشتند، استفاده شده است. در این تحقیق از سه معیار مهم ارزیابی کارایی مدل شامل ضریب همبستگی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و ناش- ساتکلیف استفاده شده است که نتایج آن‌ها برای دو ایستگاه سینوپتیک منطقه نشان داد که مقادیر برآوردی و مشاهداتی متغیرهای اقلیمی برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، ضریب همبستگی و ناش- ساتکلیف کم‌ترین مقادیر را در برآورد متغیر اقلیمی بارش را داشتند. همچنین با توجه معیارهای ارزیابی کارایی مدل، بیشترین دقت برآوردی را متغیر اقلیمی دمای حداکثر داشته است چرا که در بخش انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده مشاهده گردید که دمای حداکثر بیشترین همبستگی را با متغیرهای NCEP داشت. از طرفی قابل ذکر است که دقت مقادیر برآوردی با توجه به معیارهای ارزیابی کارایی مدل، در ایستگاه تبریز بیشتر از ایستگاه سراب می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده و همچنین کیفیت داده‌ها و طول دوره ۴۱ ساله ایستگاه تبریز، از نتایج ایستگاه تبریز جهت مدلسازی بارش - رواناب استفاده شده است. در این ایستگاه از ۴۱ سال داده مشاهداتی طی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۱ جهت واسنجی و صحت سنجی مدل SDSM استفاده شد. نتایج ریزمقیاس‌سازی به عنوان مثال برای دمای حداکثر در شکل (۲) نشان داده شده است که از ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و ۳۰ درصد آن برای صحت سنجی استفاده شده است و ضریب همبستگی طی دو مرحله بیش از ۹۴ درصد می‌باشد. دمای حداکثر شبیه‌سازی نسبت به دوره پایه (۲۰۰۱-۱۹۶۱) تحت سناریو A2 نشان می‌دهد که در همه ماه‌ها به غیر از آوریل افزایش یافته است و بیشترین افزایش در جولای به مقدار ۳/۶ درجه سانتی‌گراد طی دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) و ژوئن به مقدار ۸ درجه سانتی‌گراد طی دوره (۲۰۹۱-۲۰۵۰) بوده است (شکل ۳، الف). همچنین نتایج شبیه‌سازی برای دوره‌های آبی نشان داد که مقادیر حداکثر متغیر دما نسبت به دوره پایه در همه ماه‌ها به غیر از ماه نوامبر افزایش یافته است (شکل ۳، ب) و انحراف معیار برآوردی هم نشان داد که تغییرات انحراف معیار در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه تغییرات زیاد و افزایشی می‌باشد (شکل ۳، ج).

شبیه‌سازی دمای حداکثر تحت سناریو B2 برای دوره‌های (۲۰۵۰-۲۰۱۰) و (۲۰۹۱-۲۰۵۰) نشان داد که به ترتیب بیشترین مقدار افزایشی دمای حداکثر در ماه ژوئن ۴/۱۲ درجه سانتی‌گراد و در جولای ۶/۱۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. مقایسه مقادیر حداکثر و انحراف معیار با توجه شکل نشان داد که نتایج سناریو B2 نزدیک به نتایج سناریو A2 می‌باشد.



شکل ۲- نمودارهای پراکندگی داده‌های دمای حداکثر برای مراحل واسنجی و صحت سنجی
 Fig 2. Distribution diagrams of maximum temperature data for calibration and validation





شکل ۳- مقایسه میانگین (الف)، حداکثر (ب)، و انحراف معیار (ج) مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حداکثر تحت سناریو A2
 Fig 3. Comparison of mean (a), maximum (b), and standard deviation (c) of observational and estimation values of maximum temperature under scenario of A2

جدول ۱- نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها در دوره مشاهداتی (۱۹۷۰-۲۰۱۰)

Table 1. Results of the the performance evaluation of models in the observation period (1970-2010)

صحت سنجی			واسنجی			
Validation			Calibration			
r	NSE	RMSE	r	NSE	RMSE	Model
0.78	0.58	11.76	0.73	0.51	11.42	M5
0.74	0.53	12.34	0.70	0.48	11.85	M5 Rules Model
0.80	0.62	11.13	0.70	0.48	11.92	MLP
0.76	0.53	12.28	0.69	0.47	11.95	ANFIS
0.72	0.51	12.56	0.65	0.46	11.98	SVM

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی و ماشین بردار پشتیبان خطای بیشتری نسبت به مدل‌های M5، M5 Rules و شبکه عصبی مصنوعی داشته‌اند. با توجه به اهمیت صحت سنجی مدل‌ها، در این مرحله مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی کم‌ترین خطا را در بین مدل‌های داشتند. بنابراین مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن کارایی آن‌ها در برآورد رواناب به عنوان بهترین مدل‌ها با توجه به معیارهای ارزیابی کارایی مدل هستند. در نهایت به عنوان مدل‌های بارش - رواناب جهت برآورد رواناب طی دوره آتی استفاده گردیدند.

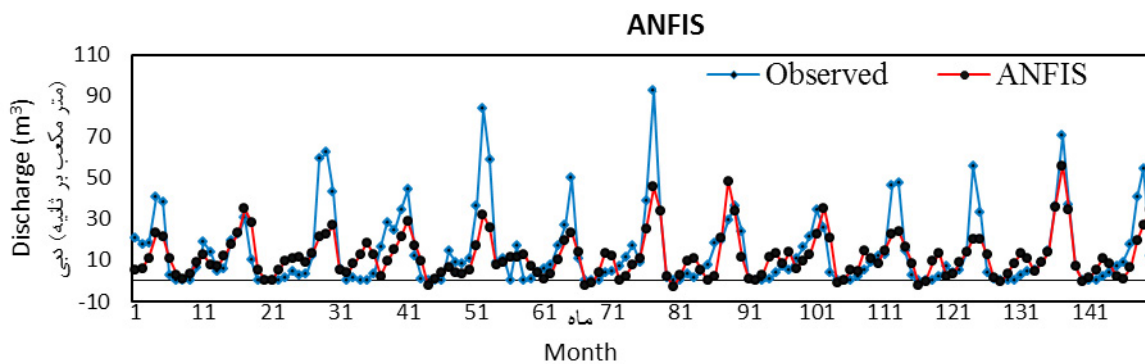
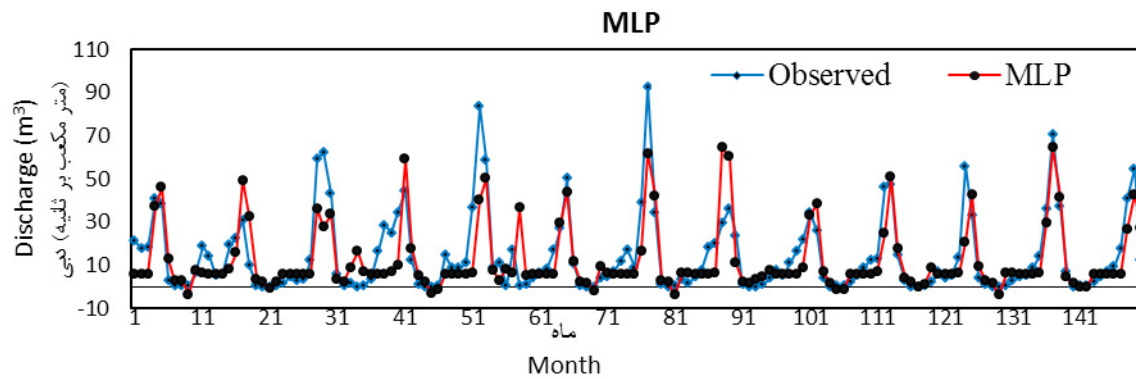
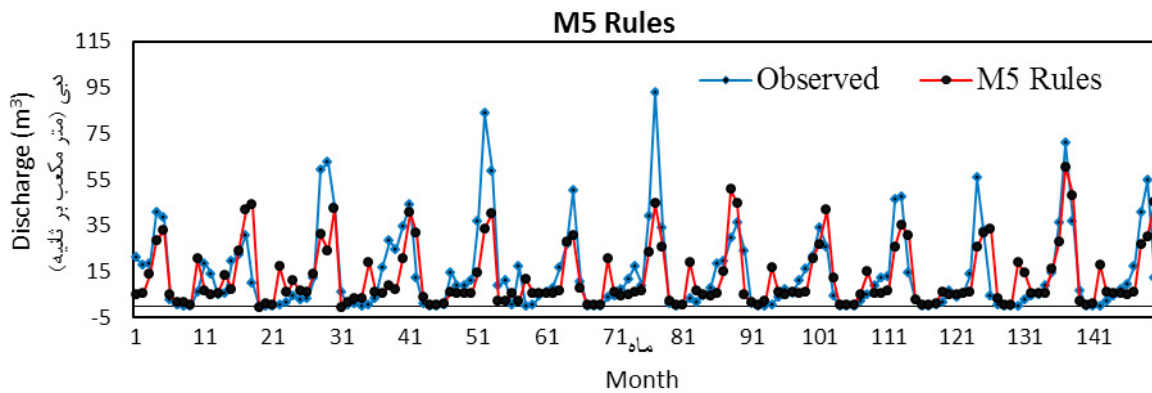
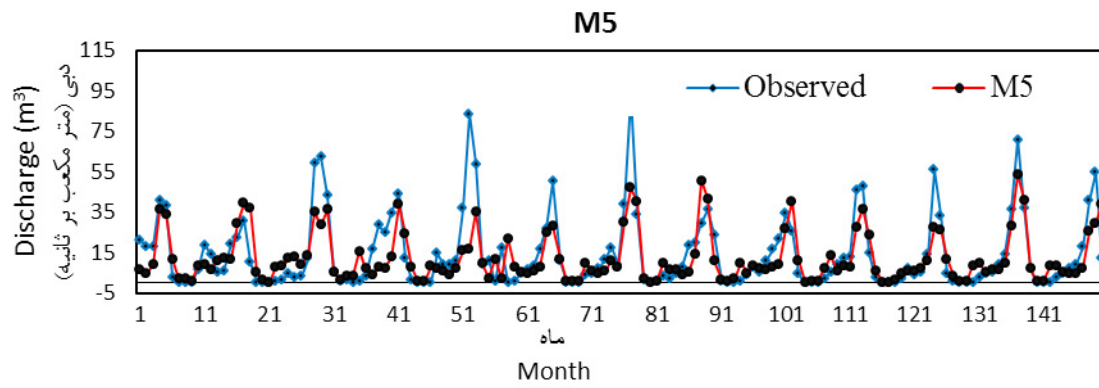
نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها در مرحله صحت سنجی طی دوره مشاهداتی در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است تمام مدل‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی مقادیر حداکثر دبی ماهانه نسبت به مقادیر حداقل به خوبی شبیه‌سازی نشده و در بیشتر ماه‌ها دست پایین شبیه‌سازی شده‌اند. از طرفی دیگر در این مطالعه، مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی در مقایسه با بقیه مدل‌ها در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی کارایی بهتری نشان نداد. همچنین با توجه به نتایج حاصل شده در شکل (۵)، مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی نسبت به بقیه مدل‌های در نظر گرفته در برآورد مقادیر رواناب کارایی بهتری را نشان دادند.

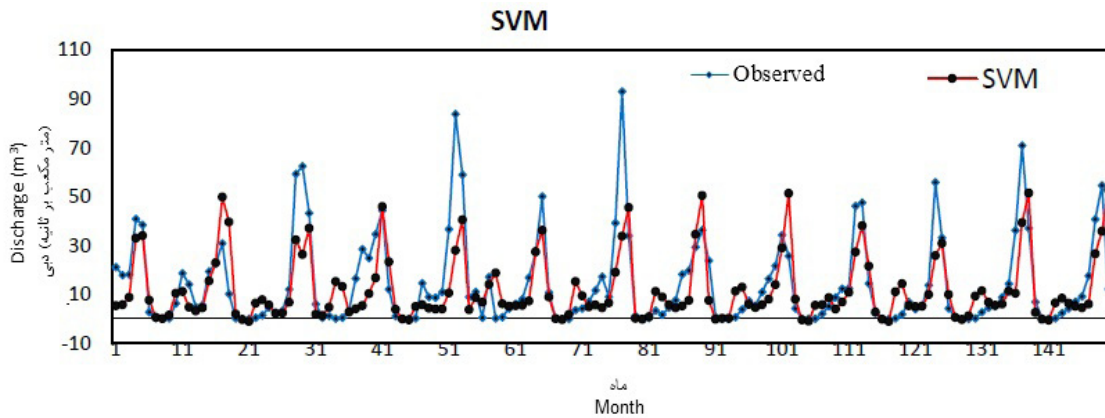
۳- شبیه‌سازی بارش - رواناب

۳-۱- ارزیابی کارایی مدل‌های بارش - رواناب

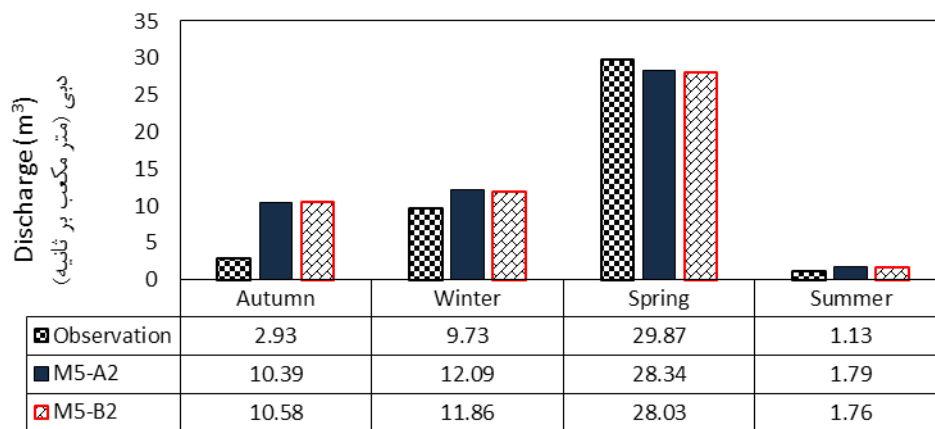
در این بخش با توجه به کیفیت و طول دوره آماری کافی متغیرهای اقلیمی (ورودی‌های مدل) از ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و ایستگاه آبسنجی و نیار استفاده شده است. از ۴۱ سال داده‌های ماهانه در نظر گرفته شده ۷۰ درصد داده‌ها (۳۴۲ داده) جهت واسنجی مدل‌ها و ۳۰ درصد باقی (۱۵۰ داده) برای صحت سنجی مدل‌ها در دوره مشاهداتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به در نظر گرفتن ترکیب ورودی‌های مختلف برای مدل‌های بارش - رواناب، بهترین متغیرهای ورودی که کم‌ترین خطا را در دوره واسنجی و صحت سنجی داشتند عبارتند از: دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش و بارش ماه قبل که برای این منظور، ترکیبات مختلف از ورودی‌ها با توجه به معیار همبستگی بین متغیرهای ورودی و خروجی بررسی گردیده و در نهایت بهترین ترکیب ورودی انتخاب گردید.

نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها در برآورد رواناب در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که واضح است کارایی مدل‌ها در بسیاری از موارد شبیه هم بوده است. نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها نشان می‌دهد که در مرحله صحت‌سنجی مدل‌ها نسبت به مرحله واسنجی خطای کم‌تری را داشتند. در قسمت واسنجی مدل‌های





شکل ۵- مقایسه منحنی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل‌های مورد نظر برای مرحله صحت سنجی
 Fig 5. Comparison the observed and simulated curves using the models validation step



شکل ۶- برآورد رواناب طی دوره (۲۰۱۰-۲۰۵۰) تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم با استفاده از مدل M5
 Fig 6. Runoff Estimation under different scenarios of climate change for the periods of (2010-2050) using the M5 Model

خواهد بود و در بیشتر موارد افزایش دمای حداکثر و دمای حداقل تحت سناریوی تغییر اقلیم B2 بیشتر از A2 بوده است. در این راستا نتایج تحقیق مساح بوانی و مرید [۲۰] نشان داد در دو دوره (۲۰۱۰-۲۰۳۹) و (۲۰۷۰-۲۰۹۹) دما افزایش خواهد یافت. دسترنج و محسنی ساروی [۷] با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 طی دوره‌های ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و ۲۰۴۹-۲۰۲۰ نشان دادند که نتایج دما در دو دوره مورد نظر نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است. زالکارین و همکاران [۳۲] نیز در مالزی نشان دادند که تحت سناریوهای A2 و B2 متغیرهای بارش و دما که هر دو روند افزایشی داشته است.

نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل‌ها در بخش صحت‌سنجی دوره مشاهداتی با استفاده معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی، ضریب ناش- ساتکلیف و ریشه دوم میانگین مربع خطا نشان داد که مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی کم‌ترین خطا را در بین مدل‌های مورد نظر دارند. بنابراین با توجه به نتایج مدل‌های در نظر گرفته شده، دو مدل M5 و شبکه عصبی مصنوعی عملکرد

۲-۳- شبیه‌سازی بارش - رواناب طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰
 در این بخش جهت برآورد رواناب با توجه به سناریوهای تغییر اقلیم از مدل‌های M5 و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است که در شکل (۶) نتایج M5 نشان داده شده است. با توجه به نتایج مدل M5 در برآورد رواناب برای دوره (۲۰۱۰-۲۰۵۰) تحت سناریوهای مختلف، رواناب در فصل‌های پاییز، زمستان و تابستان افزایشی و در فصل بهار کاهش خواهد بود. بیشترین مقدار افزایشی رواناب در فصل پاییز به مقادیر ۷/۴۶ و ۷/۶۵ متر مکعب بر ثانیه و بیشترین مقدار کاهش در فصل بهار به مقادیر ۱/۵۳ و ۱/۸۴ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت دو سناریوی A2 و B2 خواهد بود. بنابراین با توجه به نتایج مقدار رواناب تحت سناریوی B2 تغییرات زیادی را نسبت به سناریوی A2 خواهد داشت.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل شده نشان داد که دمای حداکثر و دمای حداقل تحت سناریوهای تغییر اقلیم A2 و B2 در دوره‌های آینده افزایشی

به امنیت آب در آینده ضروری است. بنابراین هرچند مدل‌های در نظر گرفته شده خطای کم‌تری را از خود نشان دادند اما نتایج آن‌ها با توجه به عدم قطعیت برآوردی، در بیشتر موارد مختلف می‌باشند. چرا که مدل M5 در فصل بهار روند کاهشی و در بقیه فصل‌ها روند افزایشی از خود نشان می‌دهد در صورتی که مدل شبکه عصبی مصنوعی در فصل زمستان کاهشی و در بقیه فصل‌ها افزایشی است.

منابع

1. Abbaspour, K. C. Faramarzi, M. Ghasemi, S. S. and Yang, H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45:1-16
2. Alberg, D. Last, M. and Kandel, A. 2012. Knowledge discovery in data streams with regression tree methods. *WIREs Data Mining Knowl Discov* 2: 69-78
3. Azari, M. Moradi, H.R. Saghafian, B. and Faramarzi, M. 2013. Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gourganroud River Basin. *Journal of Water and Soil* 27:537-547. (In Persian)
4. Bhattacharya, B. and Solomatine, D. P. 2006. Machine learning in sedimentation modelling. *Neural Networks* 19:208-214.
5. Chobin, B. Khalighi, S. Malekian, A. and Atarod, P. 2013. The effects of large-scale climate signals on the rainfall in Maharloo-Bakhtegan basin. Master's thesis, Tehran University, 135p. (In Persian)
6. Dastranj, A. and Mohseni Saravi, M. 2012. Projections of temperature and precipitation values using atmospheric general circulation models and climate simulator (Case study: Northern of Iran). Master's thesis, 150p (In Persian)
7. Dastorani, M.T. Sharifi Darani, H. Talebi, A. Moghadamnia, A. 2011. Evaluation of the Application of Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Rainfall-Runoff Modelling in Zayandeh_rood Dam Basin. *Journal of water and wastewater* 4:114-125(In Persian).
8. Deg-Hyo, B. Won, J. and Lettenmaier, D.P. 2011. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea Original. *J. Hydrol* 401:90-105
9. Demuth, H. and Beale, M. 2001. Neural network

بهتری را در برآورد دبی مشاهداتی داشتند. با توجه به نتایج مدل M5 در برآورد رواناب برای دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) تحت سناریوهای مختلف، رواناب در فصل‌های پاییز، زمستان و تابستان افزایشی و در فصل بهار کاهشی خواهد بود. بیشترین مقدار افزایشی رواناب در فصل پاییز به مقدار ۷/۴۶ و ۷/۶۵ متر مکعب بر ثانیه و بیشترین مقدار کاهشی در فصل بهار به مقدار ۱/۵۳ و ۱/۸۴ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت دو سناریوهای A2 و B2 خواهد بود. بنابراین مقدار تغییرات رواناب تحت سناریوی B2 تغییرات زیادی را نسبت به سناریوی A2 خواهد داشت. نتایج برآورد رواناب دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز نشان می‌دهد که بیشترین مقدار افزایشی رواناب همانند مدل M5 در فصل پاییز به مقدار ۶/۲۹ و ۶/۹۶ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت دو سناریوی A2 و B2 بوده است. بر خلاف نتایج مدل M5 که بیشترین مقدار کاهشی رواناب در فصل بهار بوده، شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که بیشترین مقدار کاهشی رواناب در فصل زمستان با مقدار ۲/۷۳ و ۲/۱۳ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت سناریوی A2 و B2 بوده است. نتایج برآورد رواناب برای دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار افزایشی رواناب همانند مدل M5 در فصل پاییز به مقدار ۶/۲۹ و ۶/۹۶ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت دو سناریوی A2 و B2 بوده است. بر خلاف نتایج مدل M5، بیشترین مقدار کاهشی رواناب در فصل زمستان با مقادیر ۲/۷۳ و ۲/۱۳ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب تحت دو سناریوی A2 و B2 بوده است. در حالت کلی با توجه به مقادیر برآوردی رواناب برای دوره (۲۰۵۰-۲۰۱۰) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، در فصل‌های پاییز، بهار و تابستان تغییرات رواناب افزایشی و در فصل زمستان رواناب کاهشی می‌باشد.

نتایج پژوهش صمدی و همکاران [۲۵] نیز به خوبی نشان‌دهنده این تفاوت که حاصل عدم قطعیت و روش انجام کار می‌باشد. آن‌ها اعلام نمودند که انتخاب الگوریتم ریزمقیاس‌سازی تاثیر مهمی بر پیش‌بینی‌های رواناب حوزه آبخیز دارد. چرا که بر اساس پیش‌بینی‌های SDSM و شبکه عصبی مصنوعی دمای روزانه به ترتیب تا ۵/۸ و ۰/۴۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و هم‌چنین بارش روزانه به ترتیب ۰/۱ و ۰/۴ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. هم‌چنین جریان سالانه بر اساس مدل‌های SDSM و شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب ۳/۷ و ۹/۴۷ متر مکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت. لازم به یاد آوری است با توجه به وجود عدم قطعیت در متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، پیش‌بینی دقیق آن‌ها برای دوره آینده امکان پذیر نمی‌باشد. هم‌چنین کوتوالیس [۱۸] در تحقیق خود در یونان به این نتیجه رسیدند که با وجود عدم قطعیت‌های بنیادی، تغییرات اقلیمی بر اساس سناریوهای اقلیمی A1، B2 و A1B نقش مهمی در استفاده از منابع آب، مدیریت و کنترل وضعیت آب در آینده دارد. بنابراین آن‌ها بیان کردند که بهبود و به روز رسانی برنامه‌ریزی مدیریت آب و به کارگیری استراتژی‌های سازگار جهت دستیابی

- Malekian, A. 2013. The effects of various scenarios of climate change on runoff (Case Study: Urmia Lake basin). Master's thesis, Tehran University. 119p (In Persian)
21. Nabizadeh D, Mosaedi A, Dehghani A (2012) Intelligent estimation of stream flow by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. Water management and irrigation. 2:69-80(In Persian)
22. Pai, P. F. and Hong, W.C. 2007. A recurrent support vector regression model in rainfall forecasting. Hydrological Processes 21:819-827
23. Quinlan, J. R. 1992. Learning with continuous classes. In proceedings AI, 92 (Adams & Sterling, Eds), , Singapore: World Scientific 92:343-348
24. Samadi, S. Catherine, A. M. Wilson, E. and Moradkhani, H. 2013. Uncertainty analysis of statistical downscaling models using Hadley Centre Coupled Model. Theor Appl Climatol 114:673–690.
25. Sattari, M. T. Pal, M. and Apaydin, H. and Ozturk, F. 2013. M5 Model Tree Application in Daily River Flow Forecasting in Sohu Stream, Turkey, Water Resources 40:233–242
26. Sattari, M.T. Rezazadeh Joudi, A. and Nahrein, F. 2014. Monthly Rainfall Prediction using Artificial Neural Networks and M5 Model Tree (Case study: Station of AHAR). Geographic research. 46:247-260(In Persian).
27. Vepnik, V. N. and Cortes, C. 1999. Support vector networks. Machine Learning 20: 273-297
28. Xu, C .Y. 1999. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. Prog Phys Geogr 23:229–249
29. Witten, I. H. and Frank, E. 2005. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. Morgan Kaufmann: San Francisco,552p
30. Zahabioun, B. Goudarzi, M.R. and Massah Bavani, A.R. 2010. SWAT model for estimating runoff in future periods affected by climate change. Journal of Climate Research 3-4:58-43 (In Persian)
31. Zarei, S.A. and Fakheri Fard, A. 2013. An Assessment of the ANFIS and GP techniques in Predicting Hydrological Drought from Meteorological toolbox user's guide. The Math Works, Inc., Natick, Massachusetts, USA.
10. Hamlet, A.F. and Lettenmaier, D. P. 2007. Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. Water Resour. Res 43:1-17
11. Hojam, S. Khoshkhoo, Y. and Shamsadin Vandi, Y. 2008. Annual And Seasonal Precipitation Trend Analysis of Some Selective Meteorological Stations In Central Region of Iran Using Non-Parametric Methods. Geographic Research 64:157-168 (In Persian).
12. Jang, J.S.R. 1993. ANFIS: adaptive- network based fuzze inference system. IEEE Transctions on System Management and Cybernetics 23:665-685
13. Karamouz, M. and Araghynejad, S. 2010. Advanced Hydrology. Tehran University Press, 239P (In Persian).
14. Kazemzadeh, M. Malekian, A. and Rasoulzadeh, A. 2014. River flow trend analysis based on the parametric and nonparametric approaches in Ardebil province. Erath Science Research 4:51-63(In Persian)
15. Kirby, J.M. Mainuddin, M. Mpelasoka, F. Ahmad, M.D. Palash, W. Quadir, M.E. Shah-Newaz, S. and Hossain, M.M .2016. The impact of climate change on regional water balances in Bangladesh. Climatic Change 135:481–491
16. Komasi, M. Alami, M.T. and Nourani, V. 2013. Drought Forecasting by SPI Index and ANFIS Model Using Fuzzy C-mean Clustering. Journal of water and wastewater 24:90-102 (In Persian).
17. Koutroulis, A. G. Tsanis, I. K. Daliakopoulos, I. N. and Jacob, D. 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. Journal of Hydrology 479:146-158
18. Mahsafar, H. Maknoon, R. Saghafian, B. 2011. The Impact of Climate Change on Urmia Lake Water Level. Iran-Water Resources Research7:47-57 (In Persian).
19. Massah Bavani, A.R. and Morid, S. 2006. Impact of Climate Change on the Water Resources of Zayandeh Rud Basin. Journal of Water and Soil Science 9:17-28 (In Persian).
20. Mirdashtvan, M. Mohseni Saravi, M. and

Drought for the Sufi-Chai catchment. Journal of Water Resources Engineering 7:37-50(In Persian)

32. Zulkarnain, H. Supiah, S. and Sobri, H. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. Theor Appl Climatol116:243–257

*Abstract***Evaluation of Climate Change Impacts on Hydrological Characteristics of Watershed
(Case Study: Aji- Chai Watershed)**M. Kazemzadeh¹, A. Malekian², A. Moghaddam Nia³ and Sh. Khalighi Sigaroudi³

Received: 09-08-2017 Accepted: 06-08-2018

Studying climate change impact on hydrological variables such as runoff has attracted more attention over recent years mainly due to the imposed imbalance in climate system by greenhouse gas emission. Hence, initially in this research, the trend and abrupt changes of hydro – climatic variables were studied using data mining approaches in 18 stations over 40 years (1972-2011) in Aji-Chai watershed located in northwestern Iran and secondly, the outputs of climatic variables including temperature and rainfall of HadCM3 under A2 and B2 scenarios downscaled by SDSM in order to studying the climate change impact on runoff. Finally, five data mining and intelligent models including ANFIS, SVM, MLP, M5, M5 Rules were used to rainfall – runoff modeling. The results showed that the hydro – climatic variables have been changed over the last four decades which make it necessary to study climate change and consider its impact on the runoff in the study area. The results showed that the maximum temperature will increase 2.04 and 2.40 degrees centigrade until 2010 to 2050 and 3.87 and 5.11 degrees centigrade until 2051 to 2091 under A2 and B2 scenarios, respectively. Also the minimum temperatures will increase 1.63 and 1.90 degrees centigrade until 2010 to 2050 and 3.76 and 3.00 degrees centigrade until 2051 to 2091 under A2 and B2 scenarios, respectively. The results of future rainfall prediction showed no specific trend while in some seasons showed increasing and in other cases showed decreasing trend. The results of the model performance evaluation determined the M5 and MLP models the lowest errors. In general, the results of rainfall – runoff modeling indicated inherent uncertainty of the models and the runoff will increase or decrease over the seasons.

Keywords: *Rainfall – Runoff modeling, Data mining, General circulation Models, Downscaling, Aji Chai watershed*

1. Ph.D Student of Watershed Management, University of Tehran

2. Corresponding Author and Associate Professor, University of Tehran, Email:Malekian@ut.ac.ir

3. Associate Professors, University of Tehran