

## ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر روند تغییرات رواناب حوضه آبخیز باراندوزچای در استان آذربایجان غربی با استفاده از مدل‌های چرخش عمومی جو

محمد محمدلو<sup>۱</sup>، علی حقی‌زاده<sup>۲\*</sup>، حسین زینی‌وند<sup>۲</sup>، ناصر طهماسبی‌پور<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری دانشگاه لرستان

۲. استادیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۳/۳/۳۱ - تاریخ تصویب ۱۳۹۳/۰۶/۲۴)

### چکیده

دگرگونی اقلیم پدیده‌ای طبیعی است که در مقیاس زمانی بلندمدت به وقوع می‌پیوندد. مهم‌ترین عامل‌هایی که تغییر اقلیم را تشدید می‌کنند عبارت‌اند از: تغییر تابش منعکس شده خورشیدی، تغییر مدار زمین، گازهای گلخانه‌ای و رانش قاره‌ها. در این پژوهش حوضه آبخیز باراندوزچای استان آذربایجان غربی با مساحت ۱۰۸۸ کیلومتر مربع بررسی شد. به دلیل نبود ایستگاه سینوپتیک در داخل حوضه، از ایستگاه‌های مجاور و از روش تیسن پلیگون استفاده شد. وزن هر یک از ایستگاه‌ها در پارامترهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشیدی مورد نیاز برای مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG دخالت داده شد. سپس با استفاده از روش وزن‌دهی، از بین ۹ مدل گردش عمومی جو، دو مدل که بیشترین وزن را داشتند، انتخاب شد و تولید داده‌های اقلیمی دوره آینده تا سال ۲۰۴۰ با استفاده از پنج سناریوی این مدل‌ها انجام گرفت. در ادامه با استفاده از شبکه پرسپترون چندلایه، رواناب خروجی روزانه تا سال ۲۰۴۰ میلادی تحت پنج سناریوی ذکر شده پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که تحت پنج سناریوی دو مدل GCM، تغییرات در میانگین رواناب خروجی از حوضه در دوره پایه نسبت به دوره آتی وجود دارد، طوری که میانگین آبدهی رودخانه در دوره آتی در فصل‌های بهار و تابستان نسبت به دوره پایه تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد؛ در صورتی که در فصل‌های پاییز و زمستان میانگین رواناب خروجی نسبت به دوره پایه بیشتر خواهد شد. در کل، حجم رواناب در دوره آتی بیشتر خواهد شد.

**کلیدواژگان:** تغییرات رواناب، تغییر اقلیم، حوضه آبخیز باراندوزچای، مدل‌های گردش عمومی جو، LARS-WG.

## مقدمه

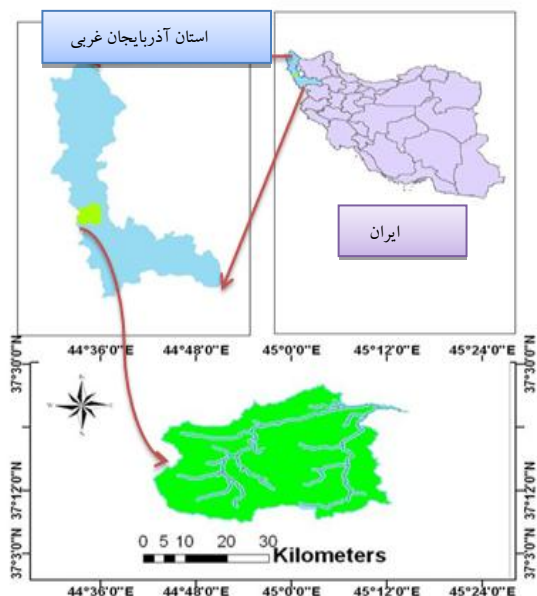
تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار اقلیمی یک منطقه در مقایسه با رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت منطقه از اطلاعات ثبت و مشاهده شده انتظار می‌رود. در مقیاس عمومی، به افزایش تدریجی دمای زمین و اقیانوس‌ها و بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای، اصطلاحاً تغییر اقلیم می‌گویند. تغییرات اقلیم، بزرگی، فراوانی و خسارت ناشی از وقایع حدی آب‌وهوایی، مانند هزینه‌های دسترسی به آب در برابر افزایش تقاضا را افزایش می‌دهد. بی‌شک مسئله تغییر اقلیم و گرم شدن جهان یکی از مسائل و نگرانی‌های امروز بشر است که ذهن دانشمندان را به‌سختی به خود مشغول کرده است. اما این نگرانی زمانی به اوج خود می‌رسد که به دیگر بحران فراروی انسان عصر حاضر، یعنی بحران آب که بزرگ‌ترین دغدغه بشر در قرن حاضر خوانده می‌شود، بینجامد [۱]. مطالعات علمی نشان داده است که پدیده تغییر اقلیم آثار مهمی بر بارش، تبخیر و تعرق، رواناب و در نهایت بر تأمین آب دارد. از این رو، پیامدهای تغییرات اقلیم بر منابع آب باید به‌صورت جدی بررسی و راهکارهایی به‌منظور سازگاری با این تغییرات مطرح شود و برنامه‌ریزی‌هایی به‌منظور مقابله با آثار آن بر منابع آب صورت گیرد [۲].

## پیشینه تحقیق

با توجه به ضرورت و اهمیت تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر جنبه‌های مختلف زندگی، به‌ویژه بر منابع آبی در سال‌های آتی، تحقیقات بسیاری در سال‌های اخیر در این زمینه انجام گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. سادات آشفته و همکاران [۴] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر در حوضه آیدوغموش در آذربایجان شرقی پرداختند که نشان‌دهنده تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر آینده بود. براساس تحقیق آنان، احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود. مطالعه مساح‌بوانی و همکاران [۶] در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان تحت دو سناریوی A2 و B2، برای دو دوره سی ساله ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ میلادی در مجموع نشان از کاهش بارندگی و افزایش درجه حرارت در هر دو دوره و به‌خصوص در دوره دوم داشت. برای بررسی تأثیر این تغییرات بر جریان ورودی به سد چادگان با

استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و با بررسی ورودی‌ها و معماری‌های مختلف، شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه انجام گرفت که خروجی‌های مدل، کاهش جریان تا ۵/۸ درصد و افزایش ضریب تغییرات جریان تا سه‌برابر را برای دوره‌های آتی نشان می‌دهد. گلن و رولین [۸] تأثیر پدیده تغییر اقلیم را بر جریان رودخانه‌های بلژیک، تحت خروجی‌های شش مدل جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM) بررسی کردند که تمام مدل‌ها به‌جز دو مدل، افزایش فراوانی سیلاب را در ماه‌های زمستان در این رودخانه‌ها نشان دادند. کوندزویک [۹] علت افزایش رخداد بارش‌های سنگین را افزایش دمای هوا ذکر کرده و در توجیه چگونگی آن توضیح داده است که با افزایش دمای هوا، ظرفیت آن برای نگهداری رطوبت فزونی یافته و در نتیجه احتمال وقوع بارش‌های شدید افزایش می‌یابد. لابات و همکاران [۱۰] روند تغییرات آینده ۲۲۱ رودخانه بزرگ دنیا را بررسی کردند و دریافتند که ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای کره زمین سبب افزایش ۴ درصدی رواناب شده و افزایش رواناب نیز با افزایش جهانی بارش هماهنگ بوده است. به عقیده آنان افزایش دما سبب تشدید تبخیر از سطح اقیانوس‌ها و سرانجام تشدید بارش و رواناب می‌شود. لی و همکاران [۱۱] تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب را در جنوب شرقی فلات تبت مطالعه کردند. آنان از دو مدل SIMHYD و GR4 برای شبیه‌سازی رواناب رودخانه‌های حوضه جنوب شرقی فلات تبت استفاده کردند. سری‌های زمانی داده‌های اقلیمی دوره آینده تا سال ۲۰۳۰ با استفاده از خروجی ۲۰ مدل گردش عمومی جو به‌دست آمد. نتایج حاصل نشان‌دهنده افزایش رواناب در دوره آتی در دو مدل و در تمام رودخانه‌های تحت مطالعه است. پرادهوم و همکاران [۱۲] در تحقیقی تأثیر تغییر اقلیم را بر رژیم سیلاب رودخانه‌های در انگلستان را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط و با استفاده از خروجی هفت مدل AOGCM انجام دادند. در این بررسی شاخص جریان پایه (Base Flow Index)، شاخصی از نفوذپذیری خاک معرفی شد که بر هیدروگراف سیلاب تأثیر می‌گذارد که بیشتر سناریوها نشان از افزایش شدت رخدادهای سیلاب دارند. در مطالعه‌ای استیل و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5<sup>1</sup> و سناریوی انتشار A1B تأثیر تغییر اقلیم را

1. Artificial Neural Networks



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز باراندوزچای در استان آذربایجان غربی و ایران

### مدل‌های چرخه عمومی جو

مدل‌های اقلیمی براساس نوع و حد دقت دسته‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها، مقیاس‌های کوچک شامل آب‌وهوای یک منطقه تا مقیاس‌های بزرگ شامل تغییرات اقلیم در حد قاره‌ای را شامل می‌شوند. هرچند مدل‌های بزرگ‌مقیاس کلی بوده و نشان‌دهنده تغییرات عمومی‌اند، استفاده از مدل‌های کوچک‌مقیاس برای کاربردهای منطقه‌ای و تبدیل نتایج مدل‌های بزرگ‌مقیاس به پدیده‌های منطقه‌ای لازم است. از مهم‌ترین مدل‌های تدوین‌شده در این زمینه مدل‌های معروف به چرخه عمومی<sup>۱</sup> است. این مدل‌ها می‌توانند چرخه عمومی جو را شبیه‌سازی کنند و برای شبیه‌سازی جو-اقیانوس با مقیاس‌های گوناگون به کار گرفته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مطالعات مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ‌مقیاس بودن مکانی متغیرهای شبیه‌سازی شده است. از این رو خروجی‌های حاصل از این مدل‌ها، در مقیاس ایستگاهی و حتی حوضه قابل استفاده نیستند. بنابراین باید خروجی‌های این مدل‌ها در مقیاس ایستگاه ریزمقیاس شوند. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو، اغلب به دو روش آماری و دینامیکی صورت می‌گیرد [۲].

بر رواناب بررسی کردند. در این تحقیق که برای ۹ حوضه در ایرلند صورت گرفت از مدل مفهومی بارش-رواناب HBV-Light<sup>۱</sup> برای بررسی وضعیت جریان رودخانه در دوره آبی ۲۰۱۰ تا ۲۰۶۰ استفاده شد. نتایج در مجموع نشان‌دهنده افزایش بارش زمستانه و کاهش بارش تابستانه است. همچنین مقدار دبی رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد کرد. یاتز و استرزیچک [۱۵] با مدل کردن حوضه رودخانه نیل تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از پنج مدل گردش عمومی، نشان دادند که این حوضه در دوره‌های آبی نسبت به تغییر اقلیم حساس خواهد بود و به خصوص مقادیر متوسط دبی در آن افزایش خواهد یافت.

### مواد و روش پژوهش

#### موقعیت جغرافیایی حوضه مطالعه‌شده

رودخانه باراندوزچای از دو سرشاخه اصلی باراندوز و بالانچ تشکیل شده است. سرشاخه باراندوز از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه و از دامنه‌های غربی کوه‌های بناد بنجول سرچشمه می‌گیرد. این شاخه از دشت زیوه عبور می‌کند و در مسیر خود، بارها تغییر جهت می‌دهد. سرشاخه بالانچ از ارتفاعات کشورغان و احمد والی در شمال اشنویه سرچشمه می‌گیرد و در امتداد شمال در کنار جاده اشنویه به ارومیه ادامه مسیر می‌دهد و پس از طی مسافتی و دریافت شاخه‌های کوچک متعدد در حاشیه غربی جاده مذکور به سرشاخه باراندوز می‌ریزد. رودخانه باراندوز پس از ورود به دشت ارومیه به شعبات مختلف تقسیم می‌شود و در انتها در شمال آبادی جیران به باتلاق‌های شور ساحل دریاچه ارومیه می‌ریزد. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه‌شده را نشان می‌دهد.

از آنجا که هدف این تحقیق، بررسی تأثیر تغییرات آبی اقلیمی بر رواناب و دبی خروجی از حوضه آبخیز است، ابتدا پارامترهای اقلیمی دوره‌های آبی تولید و شبیه‌سازی می‌شود. برای این کار از داده‌های حاصل از مدل‌های GCM استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از این مدل‌ها وجود دارد که از میان آنها می‌توان به ریزمقیاس‌نمایی آماری با مدل LARS-WG اشاره کرد که در این تحقیق از آن استفاده شده است.

مسئله در نوروها استفاده می‌شود. این روش در بررسی سامانه‌های پویای غیرخطی و دیگر مسائل تقریب تابع از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این نوع شبکه‌ها از یک لایه ورودی برای اعمال ورودی‌های مسئله، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی که در نهایت پاسخ‌های مسئله را ارائه می‌دهند، استفاده می‌شود. گره‌هایی که در لایه ورودی هستند، نوروهای حسی<sup>۱</sup> و گره‌های لایه خروجی، نوروهای پاسخ‌دهنده<sup>۲</sup> اند. در لایه پنهان نیز، نوروهای پنهان<sup>۳</sup> وجود دارند [۳].

پارامترهای زیادی می‌توانند بر رواناب یک رودخانه تأثیر داشته باشند. این پارامترها ممکن است پارامترهای اقلیمی، فیزیکی و آدافیکی باشند. هر یک از این پارامترها به‌نحوی با تأثیر متفاوت بر ایجاد رواناب مؤثر است [۵]. در این پژوهش از پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، تابش خورشیدی و بارندگی برای برآورد مقدار دبی روزانه و پیش‌بینی دوره آتی استفاده شده است. به‌دلیل نبود ایستگاه سینوپتیکی در داخل حوضه مطالعه‌شده، در ابتدا با استفاده از داده‌های اقلیمی دو ایستگاه سینوپتیک ارومیه و پیرانشهر و با روش تیسن پلی‌گون ورودی‌های لازم دمای حداقل، دمای حداکثر، تابش خورشیدی و بارندگی برای مطالعه حوضه باراندوزچای به‌دست آمد. سپس با استفاده از الگوی LARS-WG، عملکرد مدل برای حوضه مورد نظر ارزیابی، و با استفاده از خروجی مدل‌های GCM مختلف و روش وزن‌دهی دو مدل که بهترین کارایی و ضریب را دارند، برای مطالعات اقلیمی دوره آتی انتخاب شد و تحت تأثیر سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (جدول ۱)، داده‌های اقلیمی دوره آینده (از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ میلادی) تولید شد. در نهایت، این داده‌ها برای پیش‌بینی رواناب و دبی خروجی روزانه حوضه آبخیز باراندوزچای با استفاده از مدل MLP به‌کار گرفته شد.

با توجه به عدم قطعیت مطالعات تغییر اقلیم و خروجی حاصل از مدل‌های GCM مختلف، انتخاب بهترین مدل GCM که با منطقه سازگار باشد، برای کاهش عدم قطعیت ضروری است. در این مطالعه برای انتخاب بهترین مدل GCM، از بین ۹ مدل بررسی‌شده موجود در جدول ۲، دو مدل که بیشترین وزن را با روش وزن‌دهی دارند، انتخاب می‌شوند. با توجه به ضرایب وزنی مدل‌های مطالعه‌شده که

### سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای

سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای مطالعه‌شده در این پژوهش و خصوصیات آنها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 [۷].

سناریوی انتشار	ویژگی
A1B	رشد سریع اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیمه قرن و پس از آن روند کاهشی، رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر
A2	رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و همسو با شرایط منطقه‌ای در سراسر جهان
B1	همگرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصاد، کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر

### معرفی مدل LARS-WG

الگوی LARS-WG یکی از روش‌های آماری ریزگردانی برای شبیه‌سازی داده‌های روزانه بارش، تابش، بیشینه و کمینه دمای یک ایستگاه از داده‌های مدل GCM است. ابتدا داده‌ها باید در سطح نقطه یا حوضه ریزگردانی شوند. الگوهای مصنوعی مولد پارامترهای هواشناسی، الگوهای عددی‌اند که خروجی الگوهای گردش عمومی جو را با استفاده از روش‌های آماری به‌نحوی ریزگردانی می‌کنند که به مقدار واقعی در مقیاس ایستگاهی بسیار شباهت دارد. در این الگو (LARS-WG) از توزیع‌های آماری نیمه‌تجربی استفاده شده است و مبنای الگوسازی در آن، طول دوره‌های تر و خشک، بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه‌تجربی است. در این الگو برآورد دما براساس سری‌های فوریه انجام می‌گیرد و دمای بیشینه و کمینه روزانه به‌صورت فرایندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که به وضعیت تر یا خشک روز مورد نظر وابسته‌اند، الگوسازی می‌شود. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت‌های فصلی به‌کار می‌رود [۱۳].

### معرفی مدل پرسپترون چندلایه (MLP)

در بسیاری از مسائل پیچیده ریاضی که به حل معادلات بغرنج غیرخطی منجر می‌شود، یک شبکه پرسپترون چندلایه می‌تواند به‌سادگی با تعریف اوزان و توابع مناسب به‌کار گرفته شود. از توابع فعالیت مختلفی به فراخور اسلوب

1. Sensory  
2. Responding  
3. Responding

با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آیند، و مقایسه آنها با یکدیگر مشاهده می‌شود که مدل‌های CNRMCM3 و IPSL4 بیشترین ضرایب وزنی را دارند. یعنی با توجه به داده‌های دوره دیدبانی (از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹) دما و بارندگی و خروجی حاصل از دما و بارندگی مدل‌های GCM مختلف برای همین دوره که در سایت محیط زیست کشور کانادا برای این منطقه و دوره زمانی مورد نظر موجود است، این دو مدل بیشترین شباهت و نزدیکی را با گذشته حوضه باراندوزچای دارند؛ در نتیجه در این پژوهش از این دو مدل برای مطالعات دوره آتی استفاده می‌شود. مدل CNCM3 دارای دو سناریوی A1B و A2، و مدل IPCM4 دارای سه سناریوی A1B، A2 و B1 است.

۲۰۴۰ با استفاده از مدل MLP شبیه‌سازی می‌شود. در این مطالعه ابتدا از مجموع ۶۴۷۵ داده مربوط به دوره پایه که به صورت یک ماتریس [۶۴۷۵×۵] هستند، تعداد ورودی‌ها ۸ عدد (دما، حداقل و حداکثر)، بارندگی و تابش خورشیدی روز t و روز t-1 برای خروجی روز t استفاده شد. ۷۰ درصد داده‌ها (۴۵۰۰ داده) به صورت تصادفی برای آموزش شبکه MLP انتخاب شد و ۳۰ درصد باقی‌مانده (۱۹۴۲ داده) به آزمایش شبکه اختصاص داده شد. بدین ترتیب کدهای برنامه مورد نظر در نرم‌افزار Matlab نوشته شد. تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های موجود در لایه پنهان با روش سعی و خطا انتخاب و با هر بار تکرار آموزش، عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری MSE، RMSE، MAE و R ارزیابی شد. تعداد تکرارها یا epochهای آموزش ۵۰۰ تکرار انتخاب شد. حداقل گرادیان خطایی که برای وزن‌ها در نظر گرفته می‌شود، برابر ۱۰ تا ۱۰۰- در نظر گرفته شده است که هر چه کوچک‌تر باشد، آموزش بیشتر انجام می‌گیرد. در حالت پیش‌فرض این مقدار ۱۰ تا ۱۰- است که برای جلوگیری از آموزش سریع مدل مقدار آن کوچک‌تر در نظر گرفته شد (1e-100). حد آستانه برنامه برای خراب شدن آموزش و جلوگیری از افزایش فاصله خطای بین داده‌های صحت‌سنجی و داده‌های آموزش، برابر ۵۰۰ تکرار در نظر گرفته شد تا این مشکل در حین آموزش شبکه رخ ندهد. بدین ترتیب با اجرای مختلف مدل تحت تعداد نورون‌ها و لایه‌های پنهان مختلف و نیز تحت تکرارهای مختلف، بهترین شبکه برای دوره پایه انتخاب و ذخیره شد. در مرحله بعد برای شبیه‌سازی دبی خروجی دوره آینده، از بهترین شبکه ذخیره‌شده دوره پایه و داده‌های ورودی دوره آینده (به دست آمده با مدل LARS-WG) استفاده شد و بدین ترتیب سری‌های زمانی دبی روزانه تا سال ۲۰۴۰ برای پنج سناریوی مطالعه‌شده دو مدل مذکور به دست آمد. داده‌های دوره آینده به صورت یک ماتریس [۱۰۹۵۰×۴] هستند که در واقع ورودی‌های دوره آینده را شامل می‌شوند. در کد نوشته‌شده در محیط نرم‌افزار Matlab با ایجاد یک حلقه for، ورودی امروز و ورودی یک روز قبل هم برای به دست آوردن خروجی امروز استفاده شدند و در واقع تعداد ورودی‌ها ۸ ورودی است. تابع انتقال یا تابع تحریک در لایه پنهان از نوع تانژانت هیپربولیک و تابع خروجی از نوع خطی است.

در این رابطه عکس قدر مطلق اختلاف مقادیر پارامتر اقلیمی مورد نظر دیدبانی شده در ایستگاه مورد مطالعه با مقادیر به دست آمده از مدل‌های GCM مختلف برای منطقه، مربوط به دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ میلادی به دست می‌آید. در نهایت مقادیر به دست آمده از رابطه ۱ برای مدل‌های مختلف و به ازای تمام سال‌ها با هم جمع می‌شود و فراوانی نسبی برای هر سال به دست می‌آید که با میانگین‌گیری از آن به ازای تمام سال‌ها وزن هر مدل معین می‌شود. ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از سه شاخص زیر انجام می‌گیرد:

$$\frac{1}{(ABS(\Delta(GCM)))} \quad (1)$$

در این رابطه عکس قدر مطلق اختلاف مقادیر پارامتر اقلیمی مورد نظر دیدبانی شده در ایستگاه مورد مطالعه با مقادیر به دست آمده از مدل‌های GCM مختلف برای منطقه، مربوط به دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ میلادی به دست می‌آید. در نهایت مقادیر به دست آمده از رابطه ۱ برای مدل‌های مختلف و به ازای تمام سال‌ها با هم جمع می‌شود و فراوانی نسبی برای هر سال به دست می‌آید که با میانگین‌گیری از آن به ازای تمام سال‌ها وزن هر مدل معین می‌شود. ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از سه شاخص زیر انجام می‌گیرد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (4)$$

در این روابط  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب نامین داده واقعی (مشاهده شده) و شبیه‌سازی شده (توسط مدل)،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در جامعه آماری و  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی است. پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی، در مرحله بعدی، داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی تولید می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های خروجی ریزمقیاس‌شده حاصل از مدل LARS-WG و رواناب خروجی دوره پایه، رواناب خروجی حوضه دوره آتی تا سال

**نتایج**

آموزش دیده برای دوره پایه، پیش‌بینی دوره آینده به‌ازای سناریوهای مختلف دو مدل مورد مطالعه صورت گرفت و در نهایت نتایج آنالیز دبی‌های به‌دست‌آمده در دوره آتی و تحت سناریوهای مطالعه‌شده دو مدل به‌دست آمد. نتایج در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

بی‌گمان متوسط دبی در دوره آینده نسبت به دوره پایه در تمام سناریوهای دو مدل APCM4 و CNCM3 افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در جدول ۶ دیده می‌شود، بیشترین افزایش مربوط به سناریوی A2 مدل APCM4 و برابر با ۱۳/۹۶۹۹+ متر مکعب بر ثانیه است. کمترین مقدار افزایش هم مربوط به سناریوی B1 مدل APCM4 و برابر با ۱۰/۳۳۴+ متر مکعب بر ثانیه است.

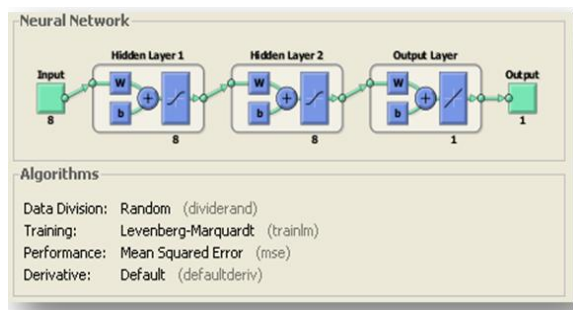
**جدول ۳. نتایج ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مدل LARS-WG برای منطقه مطالعه‌شده**

آماره	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارندگی	تابش آفتابی
R <sup>2</sup>	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۹
RMSE	۰/۱۲۱	۰/۳	۴/۳۱	۰/۲
MAE	۰/۱۰۵	۰/۲۵	۳/۴۷	۰/۱۵

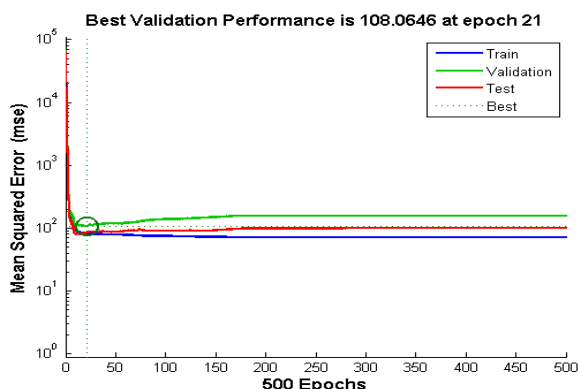
جدول ۲ نتایج حاصل از وزن ۹ مدل انتخابی GCM و انتخاب بهترین مدل GCM برای حوضه آبخیز باراندوزچای را نشان می‌دهد. مدل CNCM3 دارای دو سناریوی A1B و A2 است و مدل IPCM4 دارای سه سناریوی A1B، A2 و B1 است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از سه شاخص ذکرشده در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲. ضرایب وزنی مدل‌های GCM مطالعه‌شده برای حوضه آبخیز باراندوزچای**

نوع مدل	ضریب وزنی
BCM2	۰/۰۶۱۸
CNRMCM3	۰/۴۴۵۱
FGOALS	۰/۱۶۶۰
GFDLCM2.1	۰/۱۰۶۴
HADCM3	۰/۰۳۷۵
HADGEM	۰/۰۷۴۴
IPSLCM4	۰/۲۴۶۹
ECHO-G	۰/۱۵۱۵
NCARPCM	۰/۰۷۴۲



**شکل ۲. ساختار مدل MLP با بهترین عملکرد برای شبیه‌سازی دوره پایه**



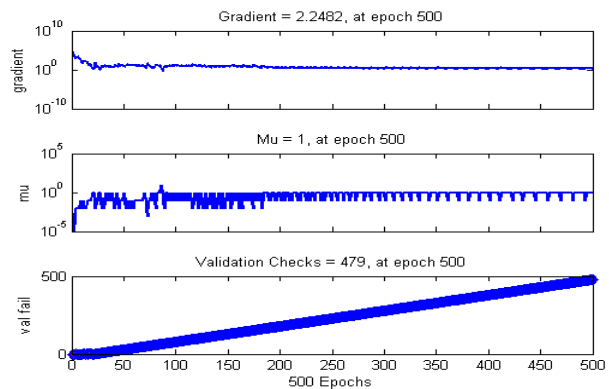
**شکل ۳. نتایج حاصل از مقدار خطای مدل Mlp**

به‌ازای تکرارهای مختلف، در شبیه‌سازی رواناب دوره پایه

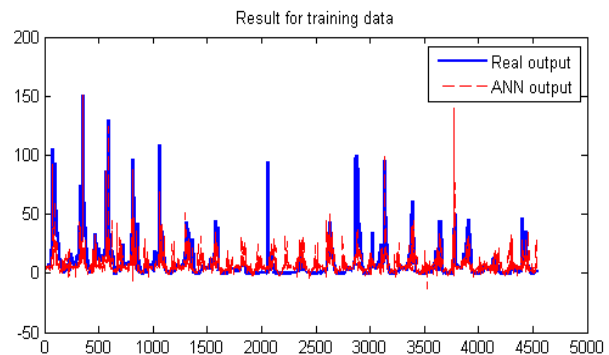
با توجه به جدول ۲ و نتایج حاصل از آزمون T و آزمون F در ارزیابی مدل LARS-WG در سطح معناداری ۹۵ درصد، عملکرد مدل قابل قبول بوده و قادر است در حد خوبی پارامترهای اقلیمی را شبیه‌سازی کند، از این‌رو از آن برای تولید داده‌های اقلیمی دوره آتی با استفاده از دو مدل CNCM3 و IPCM4 و سناریوهای مورد مطالعه استفاده می‌شود. جدول‌های ۴ و ۵ نتایج آنالیز داده‌های اقلیمی دوره پایه و دوره آتی با استفاده از سناریوهای مطالعه‌شده دو مدل APCM4 و CNCM3 برای حوضه آبخیز باراندوزچای را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از مدل MLP با روش سعی و خطا برای انتخاب بهترین شبکه و پیش‌بینی رواناب دوره آتی در شکل‌های ۲ تا ۷ نشان داده شده است. بهترین عملکرد شبکه همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، مربوط به دو لایه پنهان و تعداد ۸ نورون در هر لایه و روش لونیگ مارکواردت است. همبستگی مربوط به داده‌های آموزش و آزمایش در عملکرد مدل به‌ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۵۱ است. در این‌حالت مقدار RMSE و MAE برای داده‌های آموزش به‌ترتیب ۹/۳۳ و ۴/۶ است. این مقادیر برای داده‌های آزمایش ۹/۵۲ و ۵/۹۲ است. در مرحله بعدی با استفاده از ورودی‌های دوره آینده و نتایج بهترین شبکه



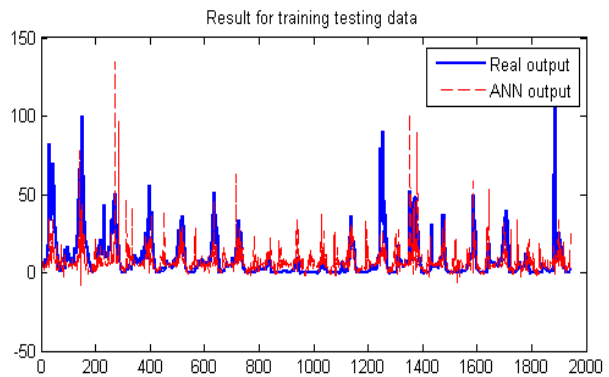
بلندمدت بیشتر برای مدیریت حوضه آبخیز و تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن استفاده می‌شود. از طرف دیگر تغییر اقلیم و تأثیر آن بر جنبه‌های مختلف زندگی بشر، به‌خصوص بر منابع آبی، انکارناپذیر است که ضرورت این مطالعات را چندین‌برابر کرده است. با توجه به جدول ۴، تحت مدل APCM4 دبی خروجی از حوضه در دوره پایه و دوره آتی دارای تغییراتی است. در ماه‌های آوریل، می، ژوئن و جولای تحت هر سه سناریوی A1B، A2 و B1، روند تغییرات منفی است. یعنی با توجه به دوره پایه در ماه‌های مذکور مقدار دبی در دوره آینده کاهش خواهد یافت، ولی برای سایر ماه‌ها این مقدار افزایش خواهد یافت. با توجه به جدول ۵ و تحت مدل CNCM3 و دو سناریوی A2 و A1B نیز در ماه‌های آوریل، می، ژوئن و جولای این تغییرات منفی است. یعنی در این ماه‌ها مقدار میانگین دبی در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت، ولی در سایر ماه‌ها تحت هر دو سناریوی ذکرشده، مقدار دبی افزایش خواهد یافت. برای دوره آینده روند تغییرات رواناب خروجی از حوضه، با توجه به نتایج حاصل از مدل MLP تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، بیشترین افزایش در تغییرات دبی دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت هر دو مدل و سناریوهای مختلف، مربوط به ماه‌های اکتبر، سپتامبر و نوامبر است. بیشترین کاهش دبی هم به‌ترتیب مربوط به ماه‌های می و ژوئن است. با توجه به نتایج این پژوهش بی‌گمان نتایج حاصل از آنالیز دبی در دوره آتی نشان می‌دهد که در فصل‌های بهار و تابستان مقدار دبی خروجی از حوضه نسبت به دوره پایه کمتر خواهد شد. یعنی در فصل‌های بهار و تابستان که فصل رویش پوشش گیاهی است، مقدار رواناب خروجی از حوضه کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با توجه به روند افزایش دما در دوره آتی، نیاز آبی موجودات زنده نیز به‌دلیل افزایش دما و افزایش تبخیر و تعرق افزایش خواهد یافت. در فصل‌های پاییز و زمستان مقدار دبی خروجی افزایش خواهد یافت. بی‌تردید متوسط دبی در دوره آینده نسبت به دوره پایه در تمام سناریوهای دو مدل APCM4 و CNCM3 افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود، بیشترین افزایش مربوط به سناریوی A2 مدل APCM4 و برابر با ۱۳/۹۶۹۹+ متر مکعب بر ثانیه است. کمترین مقدار افزایش هم مربوط به سناریوی B1 مدل APCM4 و برابر با ۱۰/۳۳۴+ متر مکعب بر ثانیه است. با توجه به روند افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم در حوضه باراندوزچای در



شکل ۴. نتایج حاصل از بهترین عملکرد مدل MLP به‌ازای تکرارهای مختلف



شکل ۵. نتایج حاصل از عملکرد مدل برای داده‌های آموزش برای ارزیابی دوره پایه



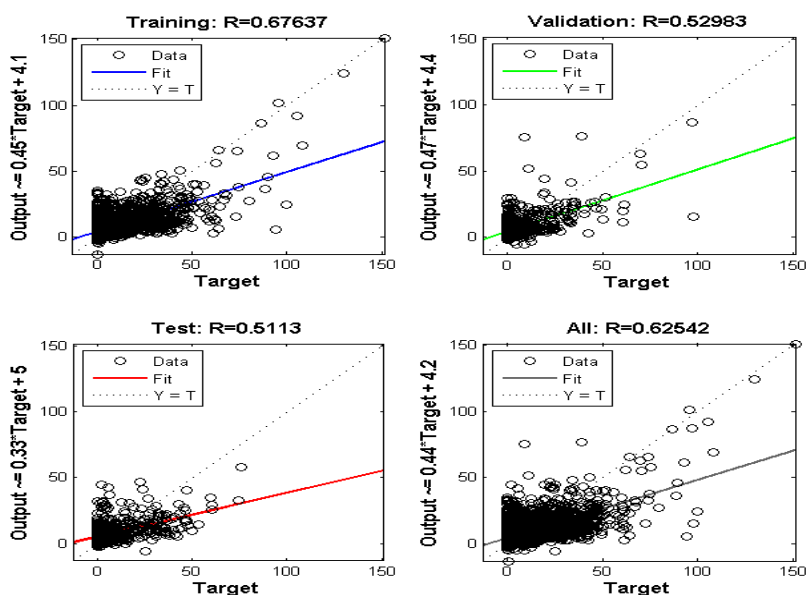
شکل ۶. نتایج حاصل از عملکرد مدل برای داده‌های آزمایش برای ارزیابی دوره پایه

### بحث و نتیجه‌گیری

در علوم مهندسی منابع آب و آب‌شناختی، شناخت و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی بارش و آبدهی سطحی از نیازهای اساسی محسوب می‌شود. پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت به‌طور عموم برای مدیریت نیروگاه‌های برقیابی و پیش‌بینی وقوع سیلاب به‌کار می‌رود، در صورتی که پیش‌بینی‌های

رژیم آبدهی رودخانه در حوضه آبخیز باراندوزچای در دوره آتی، برای اعمال سیاست‌های مناسب به‌منظور مدیریت اصولی و توسعه پایدار منطقه توصیه می‌شود با ذخیره‌سازی بارش و آب در زمان مناسب و استفاده از آن در فصل مورد نیاز، سیاست‌های درستی با هدف مدیریت پایدار و شکوفایی اقتصاد و آبادانی منطقه که بیشتر بر پایه کشاورزی استوار است، اتخاذ شود.

دوره‌های آتی، ممکن است نظام بارش حوضه از حالت سابق که برفی بارانی بوده به حالت بارانی گرایش یابد. در این حالت، انباشت بارش به‌صورت برف و ذوب تدریجی آن که می‌توانست سبب نفوذ عمیق آب به خاک و تعدیل آبدهی رودخانه شود، مختل می‌شود و بخش بزرگ‌تری از بارش به‌صورت رواناب جریان می‌یابد. دستیابی به نتایج دقیق‌تر در این زمینه، مستلزم اجرای مطالعات موشکافانه‌تر است. از طرف دیگر با توجه به تغییر الگوی زمانی بارش و تغییر در



شکل ۷. نتایج حاصل از همبستگی بین داده‌ها برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل برای دوره پایه

جدول ۴. میانگین رواناب دوره پایه و دوره آتی به‌ازای ماه‌های مختلف تحت مدل APCM4 و سناریوی A2 و B1 برحسب متر مکعب بر ثانیه

ماه	دوره پایه	دوره آتی		اختلاف دبی دوره پایه و دوره آتی		
		سناریوی A2	سناریوی B1	سناریوی A1B	سناریوی B1	سناریوی A1B
ژانویه	۴/۱۵۰۵	۵/۷۳۰۳	۵/۷۲۱۷	۵/۷۳۵۸	۱/۵۷۹۸	۱/۵۸۵۳
فوریه	۴/۹۹۳۹	۶/۱۰۷۶	۶/۰۳۳۳	۶/۰۹۱	۱/۱۱۰۷	۱/۰۹۴۱
مارس	۸/۷۰۳۲	۹/۴۸۴۷	۸/۹۷۸۳	۹/۲۳۹۷	۰/۷۸۱۵	۰/۵۳۶۵
آوریل	۲۱/۵۲۰۸	۱۹/۳۲۱۳	۱۸/۶۶۴۹	۱۸/۸۹۷۹	-۲/۱۹۹۵	-۲/۶۲۲۹
می	۲۴/۲۴۰۶	۱۶/۶۶۴۳	۱۶/۸۸۷۸	۱۶/۴۰۲۵	-۷/۵۷۶۳	-۷/۸۳۸۱
ژوئن	۹/۸۳۲۲	۶/۶۳۳۴	۶/۶۳۶۶	۶/۵۱۸۳	-۳/۱۹۸۸	-۳/۳۱۳۹
جولای	۲/۵۰۹۶	۱/۸۴۸۰	۱/۵۸۸۴	۱/۶۷۴۹	-۰/۶۶۱۶	-۰/۸۳۴۷
آگوست	۰/۴۴۳۶	۱/۲۳۹۸	۱/۰۳۳	۱/۱۷۷۰	۰/۷۹۶۲	۰/۷۳۳۴
سپتامبر	۰/۲۴۳۵	۵/۸۲۲۰	۵/۵۴۸۵	۵/۷۲۰۳	۵/۵۷۸۵	۵/۴۷۶۸
اکتبر	۱/۴۵۵۵	۱۲/۴۰۴۹	۱۱/۸۶۹۷	۱۱/۹۲۵۶	۱۰/۹۴۹۴	۱۰/۴۷۰۱
نوامبر	۴/۸۲۶۱	۱۰/۵۶۹۱	۹/۲۵۹۴	۹/۵۹۱۹	۵/۷۴۳	۴/۷۶۵۸
دسامبر	۴/۶۵۷۲	۵/۷۲۴۲	۵/۶۹۲۱	۵/۶۶۸۵	۱/۰۶۷	۱/۰۱۱۳



جدول ۵. میانگین رواناب دوره پایه و دوره آبی به‌ازای ماه‌های مختلف تحت مدل CNCM3 و سناریوی A2 و A1B بر حسب متر مکعب بر ثانیه

ماه	دوره پایه	دوره آبی		اختلاف دبی دوره پایه و دوره آبی	
		سناریوی A2	سناریوی A1B	سناریوی A2	سناریوی A1B
ژانویه	۴/۱۵۰۵	۵/۷۳۵۲	۵/۷۲۲۸	۱/۵۸۴۷	۱/۵۷۲۳
فوریه	۴/۹۹۶۹	۶/۰۶۲۸	۶/۱۳۳۷	۱/۰۶۵۹	۱/۱۳۶۸
مارس	۸/۷۰۳۲	۹/۱۴۹۰	۹/۵۳۳۳	۰/۴۴۵۸	۰/۸۲۹۱
آوریل	۲۱/۵۲۰۸	۱۸/۷۳۳۸	۱۸/۹۸۵۹	-۲/۷۸۷	-۲/۵۳۴۹
می	۲۴/۲۴۰۶	۱۶/۹۶۳۷	۱۶/۹۲۷۵	-۷/۲۷۶۹	-۷/۳۱۳۱
ژوئن	۹/۸۳۲۲	۶/۸۱	۷/۱۳۱۱	-۳/۰۲۲۲	-۲/۷۰۱۱
جولای	۲/۵۰۹۶	۱/۷۵۱۸	۱/۸۸۷۵	-۰/۷۵۷۸	-۰/۶۲۲۱
آگوست	۰/۴۴۳۶	۱/۲۳۷۷	۱/۲۳۷۱	۰/۷۹۴۱	۰/۷۹۳۵
سپتامبر	۰/۲۴۳۵	۵/۷۶۵۶	۵/۶۷۹۹	۵/۵۲۲۱	۵/۴۳۶۴
اکتبر	۱/۴۵۵۵	۱۱/۸۲۳۰	۱۱/۷۳۹۶	۱۰/۳۶۷۵	۱۰/۲۸۴۱
نوامبر	۴/۸۲۶۱	۹/۲۵۸۵	۹/۴۲۹۹	۴/۴۳۲۴	۴/۶۰۳۸
دسامبر	۴/۶۵۷۲	۵/۶۹۳۳	۵/۷۰۳۰	۱/۰۳۶۱	۱/۰۴۵۸

جدول ۶. مجموع متوسط افزایش دبی در دوره آینده نسبت به دوره پایه برای تمام ماه‌ها در تمام سناریوهای دو مدل APCM4 و CNCM3

مدل CNCM3		مدل APCM4		
سناریوی A1B	سناریوی A2	سناریوی A1B	سناریوی B1	سناریوی A2
۱۲/۵۳۰۶	+۱۱/۴۰۴۷	+۱۱/۰۶۳۷	+۱۰/۳۳۴	+۱۳/۹۶۹۹

منابع

۱. ابریشمچی، احمد و همکاران، ۱۳۸۸، بررسی اثرات تغییرات اقلیم بر پارامترهای دما و بارش در حوضه آبریز کرخه، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ایران
۲. بابائیان، ایمان و همکاران، ۱۳۸۶، مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم بر مدیریت منابع آب.
۳. حائزی، سید محسن و همکاران، ۱۳۷۹، استفاده از شبکه عصبی در پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش خاک‌های رسی، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی عمران، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۴. سادات آشفته، پریسا و همکاران، ۱۳۸۹، تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر، مطالعه موردی حوضه آیدوغموش آذربایجان شرقی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال چهاردهم، شماره پنجاه و سوم، ص. ۲۵-۳۹
۵. کارآموز، محمد و همکاران، ۱۳۸۳، مدل‌سازی هیدرواقليمی پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، مجموعه مقالات اولین کنفرانس سالانه منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران
۶. مساح بوانی، علیرضا و همکاران، ۱۳۸۴، اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال نهم، شماره چهارم، ص. ۱۷-۲۷
7. Babaian, I, 2014, <http://climate.mihanblog.com>.
8. Gellen, D. et al., 1998, Stream flow

- response of Belgian to IPCC climate change scenarios, *Journal of Hydro*, 210, pp. 242-258.
9. Kundzewicz, ZW. 2005, Flood risk in the changing world-Yangtze floods, Science Press, Beijing, pp.246-258.
  10. Labat, D et al., 2004, Evidence for global runoff increase related to climate warming, *Advances in Water Resources*, 27, pp. 631-642.
  11. Li, F. et al., 2013, the impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau, *Journal of Hydrology*, 505, pp. 188–201.
  12. Prudhomme, CH et al., 2001, Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments, *Journal of Hydro*, 277, pp. 1-23.
  13. Semenov, M et al., 1998, Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diver's climates, *Climate Research*, 10, pp. 95-107.
  14. Steele- Dunne, S et al., 2008, the impacts of climate change on hydrology in Ireland, *Journal of Hydrology*, 356 (1-2), pp.28-46.
  15. Yates D. N. and strzepek K.M, 1998, modeling the Nile basin under climate change. *Journal of Hydrol*, 3(2), pp. 98-108.