

ارائه‌ی رویکرد احتمالاتی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب

پریسا سادات آشفته*^۱، امید بزرگ‌حداد^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵

چکیده

در این تحقیق، به منظور تحلیل آثار منفی پدیده‌ی تغییر اقلیم، با ارائه‌ی رویکرد جدید احتمالاتی به ارزیابی اثرات بر جریان رود پرداخته شده است. برای تولید نمایشنامه‌ی اقلیمی در دوره‌های آتی، شبیه HadCM3 تحت نمایشنامه‌ی انتشار A2 به کار گرفته می‌شود. با معرفی گروه‌های زمانی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی به شبیه آشناسی JHACRES، نمایشنامه‌ی شبیه‌سازی جریان بلندمدت تولید می‌شود. با برازش توزیع‌های مختلف آماری بر روانابهای تولیدی، و با استفاده از آزمونهای نکویی برازش، مناسبترین توزیع آماری در هر ماه انتخاب، و فراسنج‌های آماری مربوطه استخراج و با فراسنج‌های آماری رواناب حوضه در دوره‌ی پایه مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که متوسط رواناب سالانه بلندمدت در سه دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه، کاهش می‌یابد. به‌رغم کاهش حجم کل رواناب در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه، این کاهش به جریان‌های متوسط و زیاد مرتبط می‌شود، و در جریانهای کم، حجم کل رواناب سه دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه، به‌ترتیب به میزان ۴۷، ۴۱ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر ارزیابی اثرات ضروری است همبستگی گروه زمانی با استفاده از احتمال انتقال جریان نیز مورد بررسی قرار گیرد. پس از گسسته‌سازی جریان رود، به‌منظور مقایسه‌ی احتمال انتقال جریان در هر یک از دوره‌های آتی با جریان دوره‌ی پایه در هر ماه، از معیارهای عملکرد استفاده می‌شود. این رویکرد در رود آید و غموش، آذربایجان شرقی به کار گرفته شد. نتایج حاصله نشان از پایین بودن ضریب همبستگی و بالا بودن شاخص‌های خطا دارد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رویکرد احتمالاتی، معیارهای عملکرد.

^۱ - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران،

* - نویسنده مسئول: parisa_ashofteh@yahoo.com

مقدمه

اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب به‌عنوان موضوعی چالش برانگیز در بسیاری از مناطق خشک دنیا مطرح بوده و توجه بسیاری از پژوهشگران را در دهه‌های اخیر به خود معطوف ساخته است. انتظار می‌رود که تغییر در متوسط فراسنجهای اقلیمی، بویژه دما و بارندگی، تأثیر قابل توجهی بر منابع آب در دسترس آینده بگذارد، به‌گونه‌ای که طبق مطالعات قبلی صورت گرفته، تغییرات ۱۰ درصدی میزان نزولات جوی عمدتاً منجر به تغییرات ۱۵ تا ۲۵ درصدی جریان رودها می‌شود، و این در حالی است که افزایش دو درجه‌ی سانتی‌گرادی دما معمولاً منجر به کاهش ۵ تا ۱۲ درصدی جریانها می‌گردد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لورنا و همکاران، ۲۰۱۰). علاوه بر این، متغیر آبشناسی (رواناب) در مناطق خشک و نیمه خشک به شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با رواناب در مناطق مرطوب حساستر می‌باشد (IPCC, 2008). همچنین، مناطقی که در عرضهای جغرافیایی پایین قرار دارند، به‌دلیل کاهش قابل توجه نزولات جوی (لین و همکاران، ۱۹۹۹)، بیشترین تبعات منفی این پدیده را متحمل خواهند شد؛ بنابراین، کشور ما نیز از اثرات ناشی از این پدیده مصون نخواهد بود و لزوم توجه هر چه بیشتر بر این پدیده و آثار زیانبار آن را برای اقدامات تطبیقی آبی می‌طلبد. به‌منظور بررسی آثار منفی این پدیده، و انجام اقدامات تطبیقی با آن، بررسی نمایشنامه-ی شبیه‌سازی جریان رود و احتمال انتقال جریان، به‌ترتیب از نظر آبشناسان و برنامه‌ریزان منابع آب، ضروری به‌نظر می‌رسد. برای این منظور، شبیه‌های مختلف بارش- رواناب با استفاده از نمایشنامه‌های کوچک مقیاس شده منطقه‌ای تغییر اقلیم مستخرج از شبیه‌های اقلیمی جهانی^۱ (GCMs) بطور گسترده‌ای برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در مقیاس حوضه به‌کار گرفته می‌شوند. در ادامه، به تحقیقات صورت گرفته اشاره می‌گردد:

اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب جنوب تایوان به وسیله‌ی یو و همکاران (۲۰۰۲) مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تولید متغیرهای اقلیمی آبی از خروجی

شبیه‌های تولیدکننده آب و هوا^۲ استفاده شد. در این تحقیق با استفاده از آزمون من- کندال^۳، روند متغیرهای اقلیمی و با ماتریس احتمال انتقال^۴ رخداد بارندگی روزانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان از وجود روند افزایشی در دما، میزان بارندگی در ماههای ژانویه تا مه، و افزایش احتمال انتقال روزهای خشک به روزهای خشک دارند. همچنین، وجود روند کاهشی در تعداد روزهای تر در ژوئن تا دسامبر، و کاهش این احتمال برای انتقال روزهای تر به روزهای تر دیده شد. در ادامه، با فرض عدم تغییر روند و واریانس در داده‌های گذشته و آینده، داده‌های دما برای دوره‌های آبی براساس روش اتورگرسیو درجه‌ی اول^۵ تهیه و با استفاده از توزیع ویبول^۶، شبیه تولید داده‌های بارندگی تهیه شد. نتایج معرفی داده‌های تولید شده بارندگی به مدل شبیه‌سازی جریان، نشان از افزایش رواناب به میزان ۲۶ درصد در فصلهای تر و کاهش آن به میزان ۲۱ درصد در فصلهای خشک دارد.

در تحقیق دیگری که به‌وسیله‌ی اکستروم و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد، تأثیر انتخاب توابع توزیع احتمالاتی یکنواخت، بهنجار و لوگ بهنجار برای متغیرهای اقلیمی و تأثیر آن بر تابع احتمالاتی رواناب در بخشهایی از اروپا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که انتخاب توابع مختلف احتمالاتی برای متغیرهای اقلیمی تأثیر بسزایی بر تابع توزیع احتمالاتی متغیر آبشناسی دارد. در این تحقیق، با آن که تأثیر توزیعهای مختلف متغیرهای ورودی سامانه منابع آب بر توزیع احتمالاتی رواناب مورد بررسی قرار گرفت، ولی توزیعهای محدودی برای متغیرهای ورودی مورد تحلیل واقع گردید.

لورنا و همکاران (۲۰۱۰) به ارزیابی منابع آب حوضه‌ی اوکلاهما^۷ تحت نمایشنامه‌های تغییر اقلیم با استفاده از یک شبیه هیدرولوژیکی کاملاً توزیعی، پرداختند. شبیه هیدرولوژیکی برای شرایط فعلی و همچنین تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی تولید شده به

²- weather generator

³- Mann-Kendall

⁴- transition probability matrix

⁵- First order autoregressive

⁶- Weibull distribution

⁷- Oklahoma

¹-Global Climate Model

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی اثرات نشان می‌دهد که در بیشتر آنها وضعیت سامانه تحت تأثیر تغییر اقلیم، از دیدگاه آبخش‌شناسی، یعنی تنها با بررسی توزیع احتمالاتی متغیر مورد نظر، و آن هم برای توزیعهای محدود، مورد توجه قرار گرفته است. حال آن که برای برنامه‌ریزان منابع آب ضروری است که علاوه بر معلوم بودن وضعیت توزیعهای مختلف احتمالاتی سامانه-ی مورد نظر در هر ماه (دیدگاه آبخش‌شناسان)، همبستگی گروههای زمانی وضعیت سامانه تحت شرایط تغییر اقلیم، از طریق احتمال انتقال جریان نیز مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر در ابتدا داده‌های اقلیمی برای سه دوره‌ی آتسی ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ با استفاده از خروجی کوچک مقیاس شده‌ی شبیه HadCM3 و تحت نمایشنامه‌ی انتشار A2 تولید شد. شبیه اقلیمی HadCM3 دارای عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دوره‌ی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱)، با مقایسه با متغیرهای اقلیمی دوره مشاهده‌ای حوضه‌ی رود آیدوغموش، که در استان آذربایجان شرقی قرار دارد، می‌باشد (آشفته و مساح‌بوانی، ۱۳۸۸). با استفاده از آزمونهای مختلف نکویی برازش، مناسبترین توزیع احتمالاتی بر رواناب هر سه دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی آتی انتخاب، فراسنجهای توزیع آماری مربوطه محاسبه، و با فراسنجهای توزیع آماری رواناب پایه‌ی حوضه‌ی آیدوغموش مورد مقایسه قرار گرفت. به‌منظور بررسی بیشتر ارزیابی اثرات بر جریان از دیدگاه برنامه‌ریزی منابع آب، بررسی احتمال انتقال جریان ضروری می‌باشد. در ادامه، ماتریس احتمال انتقال جریان شبیه‌سازی شده تحت شرایط تغییر اقلیم (در سه دوره‌ی آتی) با جریان دوره‌ی پایه و با استفاده از معیارهای عملکرد، مورد مقایسه قرار گرفت.

روشها و داده‌ها

روشهای مورد نیاز برای این تحقیق در چهار بخش عمده ارائه می‌شود که شامل پردازش داده‌های اقلیمی در دوره‌های آتی، شبیه‌سازی جریان در دوره‌های آتی تحت شرایط تغییر اقلیم، انتخاب توزیعهای احتمالاتی مناسب و بررسی انتقال جریان، و در نهایت انجام مقایسه‌ها و

وسيله‌ی شبیه آب و هوایی احتمالی^۱ به‌کار گرفته شد. شبیه‌سازیهای آبخش‌شناسی نشان دادند که جریان و تبخیر و اکنشه‌های متفاوتی نسبت به تغییرات بارش از خود نشان می‌دهند. روندهای مثبت در بارش باعث افزایش منابع سطحی و زیرزمینی می‌شود، در حالی که بارش تأثیر کمی بر تبخیر، با توجه به رطوبت خاک در حوضه، می‌گذارد. مقایسه اثرات روند بارش بر منابع آب سطحی و زیرزمینی نشان داد که افزایش منابع آب سطحی سه برابر بیشتر از منابع آب زیرزمینی است که بیانگر تأثیرات کمتر سامانه آب زیرزمینی در تغییرات اقلیمی می‌باشد.

اثرات شرایط اقلیمی آینده و پیش‌بینی رشد جمعیت بر سامانه‌های منابع آب در منطقه پیوجت ساوند^۲ توسط تراینهام و همکاران (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق به بررسی توانایی سامانه‌ی تأمین آب منطقه‌ای در پیوجت ساوند برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای آتی با توجه به این تغییرات می‌پردازد. برای ارزیابی تأمین آب منطقه در افق ۷۵ ساله، سه شبیه‌گردش جهانی و دو نمایشنامه‌ی انتشار به‌کار گرفته شدند. عملکرد هر سامانه تأمین آب با مقیاسهای اطمینان‌پذیری و آبدهی مطمئن^۳ تعیین شد. نتایج نشان دادند که تغییر اقلیم آبدهی مطمئن سامانه را در آینده کاهش خواهد داد، و لازم است سیاستهای بهره‌برداری برای تأمین تقاضا در افق آتی تغییر کند.

ارزیابی کمی اثرات تغییر اقلیم بر آبخش‌شناسی حوضه‌ی رود پلات^۴، وایومینگ^۵ به وسیله‌ی آچاریا و همکاران (۲۰۱۱) انجام گرفت. این تحقیق به ارزیابی موجودیت بلندمدت آب رود پلات با استفاده از شبیه آبخش‌شناسی ظرفیت نفوذ متغیر^۶ (VIC) و توسعه‌ی پیش‌بینیهای جریان تحت شرایط تغییر اقلیم می‌پردازد. جریان سالانه شبیه‌سازی شده برای دوره‌های آتی بین ۲۰- تا ۶۲ درصد نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) تغییر می‌کند. شبیه‌سازیها نشان می‌دهند که ماههای مرطوب، مرطوبتر و ماههای خشک، خشکتر شدند.

1- stochastic

2- Puget sound

3- firm yield

4- Platte

5- Wyoming

6- variable infiltration capacity

در روابط (۱) و (۲)، $(\bar{T}_{Had,fut,t} - \bar{T}_{Had,bas,t})$ نمایشنامه‌ی اقلیمی کوچک مقیاس شده دما برای متوسط بلندمدت برای ماه t ، $(\bar{R}_{Had,fut,t} / \bar{R}_{Had,bas,t})$ نمایشنامه‌ی اقلیمی کوچک مقیاس شده بارندگی برای متوسط بلندمدت برای ماه t ، $\bar{R}_{Had,fut,t}$ و $\bar{T}_{Had,fut,t}$ به ترتیب بیانگر متوسط بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده با کاربرد شبیه در دوره‌ی آتی برای ماه t ، $\bar{R}_{Had,bas,t}$ و $\bar{T}_{Had,bas,t}$ به ترتیب بیانگر متوسط بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی شبیه در دوره‌ی مشابه با دوره‌ی مشاهداتی برای ماه t ، $T_{obs,t}$ و $R_{obs,t}$ به ترتیب بیانگر گروه زمانی دما و بارندگی مشاهداتی در دوره‌ی پایه برای ماه t و T_t و R_t به ترتیب بیانگر گروه زمانی دما و بارندگی حاصل از پدیده‌ی تغییر اقلیم در دوره‌ی آتی برای ماه t ، می‌باشند.

۲-۲- شبیه‌سازی جریان در دوره‌های آتی تحت شرایط تغییر اقلیم

در این تحقیق برای تولید رواناب ماهانه از الگوریتم ارائه شده که به وسیله‌ی جیکمن و هورن‌برگر (۱۹۹۳) (شبیه IHACRES^۳) استفاده شده است (جیکمن و هورن‌برگر، ۱۹۹۳). این الگوریتم از دو میزان غیرخطی تلفات^۴ و میزان خطی آب نگار واحد^۵ تشکیل شده است است که در ادامه تشریح می‌شود:

• میزان غیرخطی تلفات

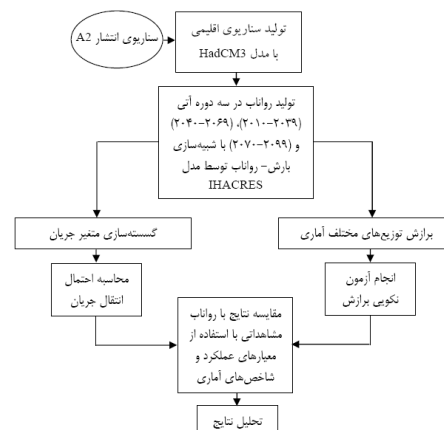
به منظور تبدیل بارندگی به بارندگی مؤثر از شاخص رطوبتی حوضه^۶، که با WI_t ($0 < WI_t < 1$) نشان داده می‌شود، استفاده می‌گردد:

$$ER_t = WI_t \times R_t \quad (۳)$$

از طرف دیگر، شاخص رطوبتی حوضه تابعی از تبخیر- تعرق در حوضه می‌باشد، که با روابط زیر بیان می‌شود:

$$WI_t = C \times R_t + \{1 - [1/\tau_w(T_t)]\} \cdot WI_{t-1} \quad WI_0 = 0 \quad (۴)$$

تحلیل نتایج می‌باشد. مراحل انجام این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۱- روندنمای مراحل مختلف انجام تحقیق.

پردازش داده‌های اقلیمی در دوره آتی

در حال حاضر، از روشهای مختلفی برای تولید نمایشنامه‌ی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. این روشها شامل تولید نمایشنامه‌ی مصنوعی، استفاده از داده‌های گذشته متغیر اقلیمی منطقه، و استفاده از شبیه‌های سه‌بعدی جفت شده‌ی اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو^۱ (AOGCM) می‌باشند که معتبرترین آنها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویلیبی و هریس، ۲۰۰۶). در این تحقیق، شبیه HadCM3 مورد استفاده قرار گرفته است (IPCC, 2008). از آن‌جا که سلول محاسباتی شبیه به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به حوضه‌ی بزرگ مقیاس می‌باشند، متغیر اقلیمی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی HadCM3 به لحاظ مکانی از اطلاعات مربوط به سلولی به دست می‌آید، که حوضه‌ی مورد نظر در آن قرار گرفته است (دیاز- نیتو و ویلیبی، ۲۰۰۵)، و به لحاظ زمانی، به جای استفاده مستقیم از داده‌های شبیه HadCM3، میانگین بلندمدت دوره‌های این داده‌ها به کار گرفته می‌شوند (روش خرد مقیاس‌سازی^۲) (ویلیبی و هریس، ۲۰۰۶):

$$T_t = T_{obs,t} + (\bar{T}_{Had,fut,t} - \bar{T}_{Had,bas,t}) \quad (۱)$$

$$R_t = R_{obs,t} \times (\bar{R}_{Had,fut,t} / \bar{R}_{Had,bas,t}) \quad (۲)$$

³- identification of unit hydrographs and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data

⁴- nonLinear loss module

⁵- linear unit hydrograph module

⁶- catchment wetness index

¹- Atmospheric-Ocean General Circulation Model

²- delta factor

به شبیه‌آشناسی واسنجی گردیده، رواناب برای سه دوره‌ی آبی شبیه‌سازی شد.

برازش توزیع‌های احتمالاتی

در بررسی‌های آشناسی، داده‌ها با توابع توزیع انگاره‌ای، برازش داده شده، و بهترین تابعی که با داده‌ها مطابقت داشته باشد به‌عنوان تابع توزیع احتمال برگزیده می‌شود، تا از روی آن بتوان به‌ازاء هر احتمال مورد نظر، مقدار متغیر آشناسی را به‌دست آورد. این توزیع‌های احتمالاتی، که برای تحلیل فراوانی به‌کار می‌روند، می‌توانند با استفاده از آزمونهای مختلف نکویی برازش^۴ کلموگروف-اسمیرنوف^۵، دارلینگ-اندرسون^۶ و کای اسکوار^۷، انتخاب شوند (کایت، ۱۹۷۷). پس از انتخاب توزیع‌های مناسب احتمالاتی برازش داده شده به داده‌های متوسط ماهانه بلندمدت رواناب آبی حاصل از شبیه‌آشناسی، و نیز رواناب مشاهداتی، فراسنج‌های توزیع‌های احتمالاتی مربوطه در هر ماه به کمک نرم‌افزار EasyFit 5.5 استخراج گردند. پس از استخراج فراسنج‌های هر توزیع، شاخص‌های آماری (متوسط، انحراف معیار و ضریب تغییرات) مربوط به داده‌های رواناب در هر ماه محاسبه می‌شوند.

از آنجایی که در برنامه‌ریزی منابع آب عملکرد هر سامانه‌ای در طول یک مدت معین تخمین زده می‌شود، ضروری است علاوه بر معلوم بودن توزیع احتمالاتی رواناب رود (جریان ورودی به مخزن)، تسلسل زمانی وضعیت آورد رود در طول دوره‌ی بهره‌برداری نیز مورد بررسی قرار گیرد. چون سامانه‌ی منابع آب بایستی بطور پیوسته پاسخگوی نیاز باشد، این رویکرد از طریق بررسی ماتریس احتمال انتقال صورت می‌گیرد که در ادامه تشریح می‌شود.

احتمال انتقال جریان

همبستگی گروه‌های زمانی می‌تواند با استفاده از احتمالات انتقال در شبیه‌ها وارد شود. توزیع احتمالاتی جریانها می‌توانند با یک هیستوگرام تقریب زده شوند. نمودار ستونی با تقسیم محدوده‌ی مقادیر متغیر تصادفی،

$\tau_w(T_t) = \tau_w \cdot \exp[0.062f(T_r - T_t)] \quad \tau_w(T_t) > 1 \quad (5)$
در روابط فوق، R_t = بارندگی در گام زمانی t ام،
 WI_t = شاخص رطوبتی حوضه در گام زمانی t ام، ER_t = بارندگی مؤثر در هر گام زمانی t ام، T_t = دما در گام زمانی t ام (درجه سانتی‌گراد)، T_r = دمای مرجع^۱ (درجه سانتی‌گراد)، τ_w = ثابت زمانی خشک شدن حوضه^۲ (روز) و f = عامل تعدیل دما^۳ و C = کسری از بارندگی می‌باشد. فراسنج C به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره‌ی واسنجی یکسان گردد (لیتل‌وود و همکاران، ۱۹۹۷).

میزان خطی آب نگار واحد

به‌منظور تبدیل بارندگی مؤثر به رواناب، فرض کنید که بارندگی مؤثر واحد در یک گام زمانی، به مقدار b واحد رواناب تولید کند. میزان رواناب در گام‌های بعدی را به‌صورت نسبت a ($a < 1$) از مقدار آن در مرحله‌ی قبل می‌توان در نظر گرفت. لذا، رواناب حاصل به‌صورت نمایی با نرخ a در هر گام زمانی کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر، می‌توان آب نگار واحد اصلی را به‌صورت تلفیقی از تعداد مختلفی از آب نگارهای واحد به‌صورت موازی، یا گروهی و یا به‌صورت منفرد در نظر گرفت. به‌عنوان مثال، با تقسیم آب نگار واحد کل به دو قسمت موازی هیدروگراف سریع q و آب نگار q ، رابطه رواناب حاصله مطابق زیر تعریف می‌گردد:

$$Q_t = a^q Q_{t-1} + b^q (ER_{t-1}) + a^s Q_{t-1} + b^s (ER_{t-1}) \quad (6)$$

بطور کلی، می‌بایست در الگوریتم ارائه شده به وسیله‌ی جیکمن و هورن‌برگر (۱۹۹۳)، سه فراسنج τ_w ، f و C از میزان غیرخطی تلفات (روابط (۴) و (۵)) و فراسنج‌های a و b از میزان خطی آب نگار (رابطه‌ی (۶)) براساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد مطالعه واسنجی شوند. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی براساس داده‌های مشاهداتی دما، بارندگی و رواناب حوضه در دوره‌ی پایه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در ادامه، با معرفی داده‌های دما و بارندگی حاصل از شبیه HadCM3

⁴ - goodness of fit

⁵ - Kolmogorov-Smirnov

⁶ - Darling -Anderson

⁷ - chi-squared

¹ - reference temperature

² - catchment drying time constant

³ - temperature modulation factor

که در این تحقیق از آن استفاده شده است، فاصله‌ی تغییرات جریان مورد نظر از کمترین تا بیشترین مقدار (در بین روانابهای آتی تولید شده و روانابهای مشاهده‌ای) به بازه‌هایی با طول ثابت و برابر تقسیم می‌شود، و فراوانی هر بازه از طریق شمارش تعداد مقادیری که بین حدود بالا و پایین آن بازه قرار دارند، تعیین می‌شود. حال، برای به‌دست آوردن احتمالات انتقال بین بازه‌های مختلف، تعداد انتقالها از هر بازه در هر دوره‌ی زمانی به هر بازه در دوره‌ی زمانی بعدی تعیین شده و براساس کل حالات هر بازه در هر دوره زمانی، احتمال وقوع انتقالها محاسبه می‌گردد.

معیارهای عملکرد

برای بررسی عملکرد شبیه‌ها و مقایسه‌ی نتایج از معیارهای مرسوم ضریب همبستگی^۱ (R)، جذر متوسط مربعات خطا^۲ ($RMSE$)، متوسط خطای مطلق^۳ (MAE) و کارایی نش- ساتکلیف^۴ (NSE) استفاده شده است.

ضریب همبستگی بیانگر رابطه‌ی خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد. این معیار، که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، به تنهایی نمی‌تواند بیانگر عملکرد یک شبیه در شبیه‌سازی داده‌ها باشد (لین و همکاران، ۲۰۰۶):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)(X_m - \bar{X}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (X_m - \bar{X}_m)^2}} \quad (9)$$

جذر متوسط مربعات خطا به‌عنوان مقیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده به‌کار می‌رود. این معیار، که به‌صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود، به‌عنوان مرسومترین شاخص خطا به‌کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_s - X_m)^2}{N}} \quad (10)$$

متوسط خطای مطلق برای مقایسه عبارت به عبارت^۵ خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به

مانند جریانها، به بازه‌های گسسته تولید می‌گردند. برای بررسی این که آیا احتمال بودن در هر بازه‌ی جریان وابسته به بازه‌ی جریان قبلی است یا نه، می‌توان یک ماتریس تهیه کرد. ردیفهای ماتریس بیانگر بازه‌های جریان i در دوره‌ی t و ستونهای ماتریس بیانگر بازه‌های جریان j در دوره‌ی بعدی $t+1$ هستند. اعداد ماتریس بیانگر احتمال بودن در هر بازه‌ی j در دوره‌ی $t+1$ با معلوم بودن یک جریان در بازه‌ی i در دوره‌ی t می‌باشند، یعنی تعداد دفعاتی که یک جریان در بازه‌ی j به دنبال یک جریان در بازه‌ی i اتفاق می‌افتد، بر تعداد کل انتقالات جریان در همان ردیف (مجموع تعداد جریانها در ردیف) تقسیم می‌شود، و به این ترتیب خواهیم داشت:

$$P_{ij} = P_r(Q_{t+1} = j | Q_t = i) = \frac{N(Q_t = i, Q_{t+1} = j)}{N(Q_t = i)} \quad (7)$$

که در آن، $P_r(Q_{t+1} = j | Q_t = i)$ بیانگر احتمال این که سامانه در زمان $t+1$ در حالت j باشد، به شرط این که در زمان t حالت سامانه مشخص و حالتهای رخ داده قبلی i نیز مشخص باشد، $N(Q_t = i, Q_{t+1} = j)$ = تعداد انتقالات از حالت i به حالت j و $N(Q_t = i)$ = تعداد کل جریانهای قرار گرفته در حالت i می‌باشد. معمولاً، P_{ij} را با توجه به حالتهای یک سامانه با یک آرایش مربعی $m \times m$ مرتب می‌کنند (که m تعداد بازه برای گسسته‌سازی جریان می‌باشد)، و نتیجه آن ماتریس مربع P است که ماتریس احتمال انتقال زنجیره‌ی مارکوف نامیده می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

در ماتریس P احتمال ورود سامانه از حالت i به حالت j بزرگتر یا مساوی صفر گردد (برای هر $P_{ij} \geq 0, i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$) و مجموع احتمالات هر سطر می‌بایست برابر با صفر یا یک باشد، یعنی برای هر $\sum_{j=1}^m P_{ij} = 0$ یا $1, i \in \{1, 2, \dots, m\}$ است.

قبل از محاسبه‌ی احتمال انتقال بایستی کلیه‌ی متغیرهای به‌کار رفته (جریان رود)، گسسته‌سازی شوند. در گسسته‌سازی با کاربرد روش طول بازه‌های مساوی،

¹ - coefficient of correlation

² - root mean square error

³ - mean absolute error

⁴ - Nash-Sutcliffe efficiency

⁵ - term by term

شبه‌سازی شده، $\bar{X}_m =$ متوسط داده اندازه‌گیری شده و $N =$ تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند.

مطالعه‌ی موردی و داده‌ها

منطقه‌ی طرح

منطقه‌ی مطالعاتی این تحقیق، حوضه‌ی آیدوغموش است که در استان آذربایجان شرقی بین ۴۷ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۳۷ دقیقه طول جغرافیایی، و ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۱ دقیقه عرض جغرافیایی قرار گرفته است (شکل ۲). وسعت حوضه‌ی مورد نظر ۱'۸۰۲ کیلومتر مربع است. رود آیدوغموش با طول حدود ۸۰ کیلومتر و با جهت جریان جنوب غربی-شمال شرقی، از ارتفاعات گرگرد (قور-قور) از توابع هشتگرد سرچشمه می‌گیرد، و پس از دریافت رودخانه‌های قرنقو و شهرچای به رود قزل‌اوزن می‌ریزد.

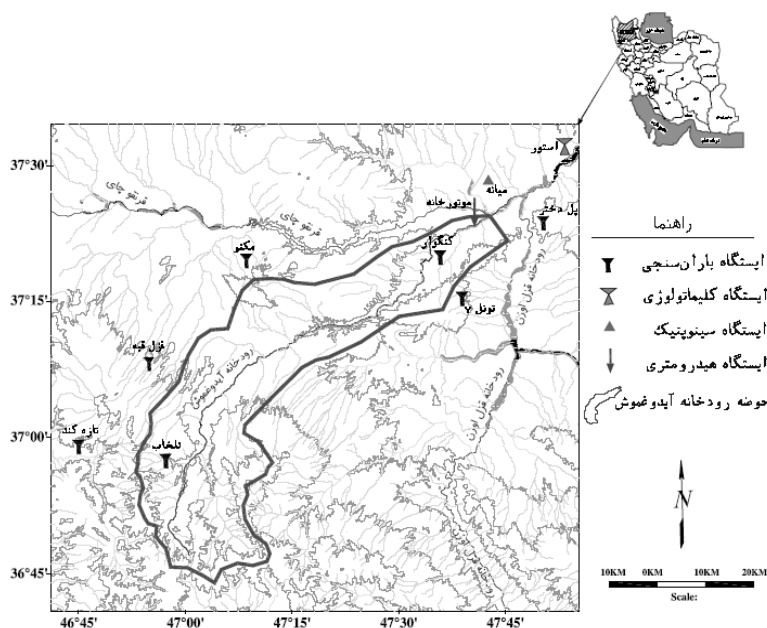
داده‌های اندازه‌گیری شده به کار می‌رود که به صورت رابطه زیر ارائه می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۱):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_s - X_m|}{N} \quad (11)$$

معیار کارایی نش-ساتکلیف برای ارزیابی توان شبیه‌سازی در شبیه‌سازی به کار می‌رود، که اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، و به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد (موریاسی، ۲۰۰۷):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_m - X_s)^2}{\sum_{i=1}^N (X_m - \bar{X}_m)^2} \quad (12)$$

در روابط (۹) تا (۱۲)، $X_s =$ داده شبیه‌سازی شده، $X_m =$ داده اندازه‌گیری شده، $\bar{X}_s =$ متوسط داده



شکل ۲- موقعیت حوضه رود آیدوغموش و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

۱۹۷۱ را پوشش می‌دهند؛ لذا این دوره به‌عنوان دوره‌ی پایه انتخاب شد. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و آبرسنجی به کار رفته در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در این تحقیق، از آمار ماهانه‌ی دما و بارندگی متوسط حوضه، و آمار رواناب ماهانه ایستگاه موتورخانه در دوره‌ی پایه استفاده شده است.

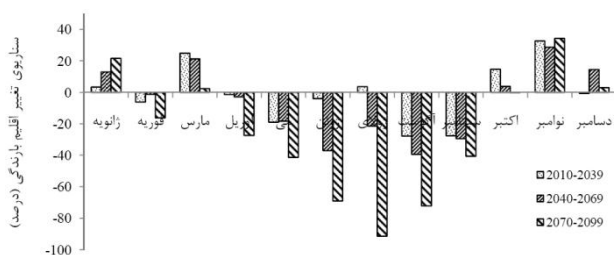
آمار و اطلاعات

آبدهی سالانه‌ی رود آیدوغموش ۱۹۰ میلیون متر مکعب، و متوسط بارندگی سالانه در سطح حوضه ۳۴۰ میلی‌متر بوده است که پر باران‌ترین ماهها مربوط به آوریل و مه می‌باشد (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۵). ایستگاه‌های موجود در حوضه داده‌های دوره‌ی ۲۰۰۰-

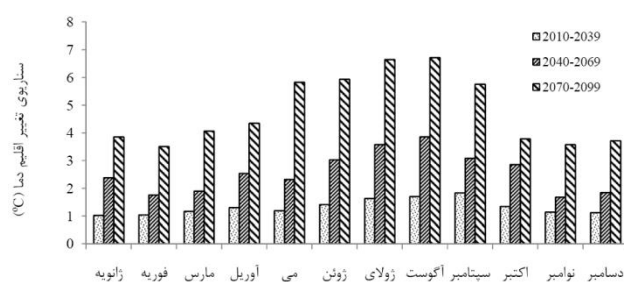
نتایج

نتایج نمایشنامه‌های اقلیمی حاصل از شبیه HadCM3

در این تحقیق از خروجی شبیه HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان از مجموعه شبیه‌های AOGCM، که دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حوضه بوده است، و تحت نمایشنامه‌ی انتشار A2 (به دلیل انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای در این نمایشنامه)، استفاده شده است. در ادامه، میانگینهای بلندمدت دما و بارندگی ماهانه در سه دوره‌ی آتی و دوره‌ی شبیه‌سازی شده پایه با کاربرد همان شبیه محاسبه شدند. نهایتاً، نمایشنامه‌ی اقلیمی دما $(\bar{T}_{Had,fut,t} - \bar{T}_{Had,bas,t})$ و بارندگی $(\bar{R}_{Had,fut,t} / \bar{R}_{Had,bas,t})$ حوضه محاسبه شدند که نتایج در شکل ۳ ارائه گردیده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۳- نمایشنامه‌های اقلیمی حاصل از شبیه HadCM3 برای میانگین حوضه برای (الف) دما و (ب) بارندگی.

بررسی توزیع مناسب آماری رواناب حوضه در سه دوره‌ی آتی

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب، گروه زمانی ماهانه متغیرهای اقلیمی حوضه در دوره‌های آتی به شبیه معرفی، و گروه زمانی ماهانه‌ی رواناب حوضه در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شد. سپس، توزیعهای مختلف آماری بر آنها برآزش داده و مناسبترین توزیع با آزمونهای نکویی برآزش در همه ماهها انتخاب شد. در ادامه، فراسنجهای توزیع استخراج گردیدند که نتایج برای دوره‌ی اول آتی (۲۰۱۰-۲۰۳۹) برای ماههای پرآب و کم‌آب در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انتظار می‌رود که دمای حوضه در سه دوره‌ی آتی به ترتیب بین ۱/۰ تا ۱/۸، ۱/۷ تا ۳/۹ و ۳/۵ تا ۶/۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره‌ی پایه افزایش یابد. این در حالی است که حوضه در این دوره‌ها شاهد افزایش بارندگی، عمدتاً برای پاییز و زمستان، و کاهش آن برای بهار و تابستان خواهد بود. همچنین، محدوده‌ی تغییرات بارندگی بین ۲۸- تا ۳۳، ۳۹- تا ۲۹ و ۹۱- تا ۳۴ درصد نسبت به دوره‌ی پایه خواهد بود. پس از به‌دست آوردن نمایشنامه‌ی اقلیمی حوضه، با استفاده از روابط (۱) و (۲)، سری زمانی ماهانه متغیرهای اقلیمی حوضه در سه دوره‌ی آتی ۳۰ ساله محاسبه شده‌اند.

است؛ یعنی هر دو عامل در جهت کاهش تولید رواناب عمل کرده‌اند.

همچنین، نتایج نشان می‌دهند که ضریب تغییرات مربوط به رواناب نیز در دوره‌های آتی کاهش خواهد داشت، به گونه‌ای که میزان کاهش آن در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نسبت به دوره‌ی پایه به ترتیب برابر با ۳۶/۲، ۳۵/۵ و ۳۴/۲ درصد می‌باشد. از طرف دیگر، تغییرات جریان محدود به میانگین و ضریب تغییرات نگردیده، و توزیع سالانه‌ی جریان را نیز در بر خواهد گرفت که در شکل ۴ نشان داده شده است.

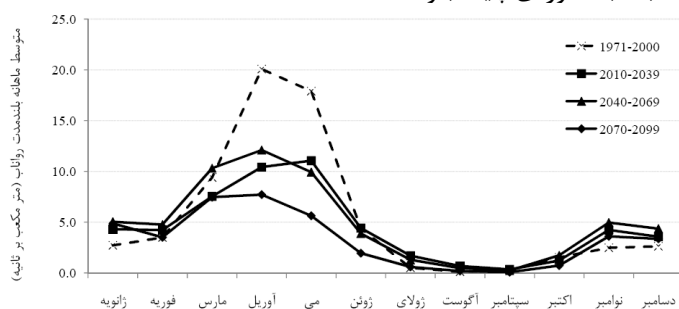
به منظور بررسی بیشتر حجم کل رواناب داده‌های آتی و پایه برای جریانهای کم، متوسط و زیاد در جدول ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج آن با نتایج حاصل از جدول ۴ نیز مطابقت دارد.

همان طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، به رغم کاهش حجم کل رواناب در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه، این کاهش به جریانهای متوسط و زیاد مرتبط می‌شود، و در جریانهای کم، حجم رواناب دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه به ترتیب به میزان ۴۷، ۴۱ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل تأثیر بیشتر متغیر دما در جریان کم، و تأثیر بیشتر متغیر بارندگی در جریان زیاد می‌باشد، و نتایج آن در شکل ۵ نیز ارائه شده اند.

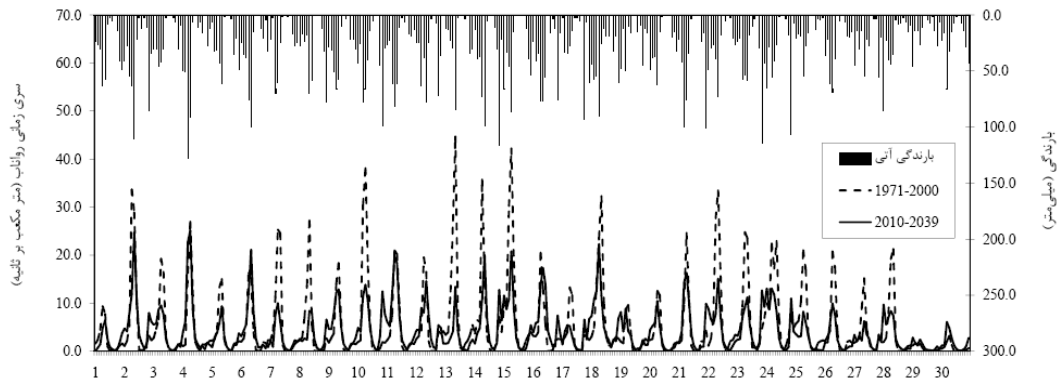
همان طور که قبلاً هم اشاره شد، در برنامه‌ریزی منابع آب هر سامانه‌ای ضروری است تسلسل زمانی وضعیت سامانه مشخص باشد. همبستگی گروه‌های زمانی می‌تواند با استفاده از احتمالات انتقال مشخص شود که در ادامه تشریح می‌شود.

همان طور که ملاحظه می‌شود، در ماههای مختلف، داده‌های رواناب منتج از شبیه HadCM3 در دوره‌ی آتی (در این جا ۲۰۳۹-۲۰۱۰) و رواناب دوره‌ی پایه دارای فراسنجهای مختلف توزیع آماری می‌باشند. پس از تعیین فراسنجهای توزیع آماری، شاخصهای آماری (متوسط، انحراف معیار و ضریب تغییرات) متوسط ماهانه رواناب بلندمدت در دوره‌ی آتی با متوسط ماهانه‌ی رواناب دوره‌ی پایه مقایسه شدند، که نتایج مقایسه‌ی متوسط ماهانه بلندمدت رواناب رود در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه در شکل ۴، و مقایسه‌ی متوسط سالانه‌ی بلندمدت آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

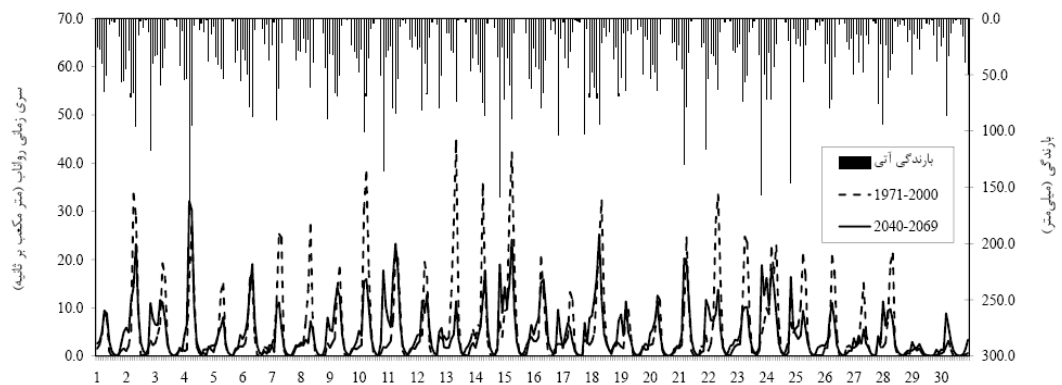
نتایج نشان می‌دهند که به رغم این که متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دوره‌ی ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نسبت به دوره‌ی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به ترتیب به میزان ۲۲، ۱۱ و ۶۵ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۴)، این روند کاهش‌ی نیست، و در دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی دوم نسبت به ۳۰ ساله‌ی اول، افزایش نسبتاً کمی دارد، به این دلیل که متوسط دمای سالانه‌ی بلندمدت در سه دوره‌ی آتی به ترتیب ۱۲، ۲۴ و ۴۵ درصد نسبت به دوره‌ی پایه افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که متوسط بارندگی سالانه بلندمدت در سه دوره‌ی آتی، به ترتیب ۲ درصد افزایش، ۱ درصد افزایش و ۵ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، افزایش بارندگی در دوره‌ی دوم نسبت به دوره‌ی سوم، به صورت معنی‌داری تغییر نکرده است. این در حالی است که افزایش دما در دوره‌ی دوم نسبت به دوره‌ی اول، بطور معنی‌دار افزایش یافته است؛ بنابراین، افزایش دما منجر به کاهش رطوبت خاک می‌شود. اما دلیل کاهش ۶۵ درصدی متوسط رواناب سالانه بلندمدت، در ازاء افزایش ۴۵ درصدی دما و البته کاهش ۵ درصدی بارندگی نسبت به دوره‌ی پایه بوده



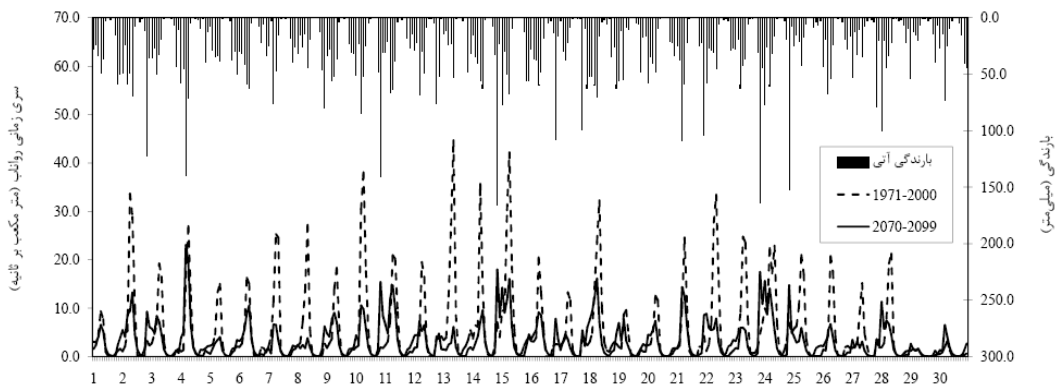
شکل ۴- مقایسه‌ی میانگین ماهانه‌ی بلندمدت رواناب (میانگین حوضه) در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵- اختلاف بین رواناب شبیه‌سازی شده در دوره‌ی آبی (الف) ۲۰۱۰-۲۰۳۹، (ب) ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و (پ) ۲۰۷۰-۲۰۹۹ با رواناب اندازه‌گیری شده در دوره‌ی پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ با توجه به بارندگیهای مربوط به هر سه دوره‌ی آبی.

جدول ۱- نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی شبیه بارش- رواناب بر اساس داده‌های مشاهداتی در دوره‌ی ۱۹۷۱-۲۰۰۰.

صحت‌سنجی				واسنجی									
معیارهای عملکرد				معیارهای عملکرد				فراسنج‌های شبیه					
<i>NSE</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>NSE</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>C</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>f</i>	τ_w	
۰/۶۰	۲/۵۵	۴/۵۴	۰/۷۹	۰/۵۵	۳/۲۶	۵/۵۹	۰/۷۵	۰/۰۰۱	۰/۵۰۲	۰/۲۸۸	۱/۷	۱/۰	نتایج

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و آبرسانی موجود در منطقه.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع حوضه (متر از سطح دریا)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
تلخاب	باران‌سنجی	۲۵۰۰	۴۶-۵۷	۳۶-۵۷
تونل ۷	باران‌سنجی	۱۱۰۰	۴۷-۳۷	۳۷-۲۴
استور	کلیماتولوژی	۱۲۰۰	۴۷-۵۴	۴۷-۳۰
پل دختر	باران‌سنجی	۱۲۰۰	۴۷-۴۹	۳۷-۲۱
تازه کند	باران‌سنجی	۱۸۵۰	۴۶-۴۵	۳۶-۵۹
کنگوار	باران‌سنجی	۱۳۲۰	۴۷-۳۶	۳۷-۱۸
قرل قیه	باران‌سنجی	۱۴۹۹	۴۷-۳۲	۳۷-۱۶
مکتو	باران‌سنجی	۱۶۹۰	۴۷-۱۳	۳۷-۱۸
میانه	سینوئیتیک	۱۲۰۰	۴۷-۳۸	۳۷-۲۴
موتور خانه	آبرسنجی	۱۰۶۰	۴۷-۴۳	۳۷-۲۳

جدول ۳- استخراج فراسنج‌های توزیع احتمالاتی منتخب رواناب در دوره‌ی اول آبی و دوره‌ی پایه با استفاده از آزمون نکویی برازش (برای ماه‌های پرآب و کم‌آب).

دوره	ماه	نام توزیع	اسمیرنوف-کلموگروف-			نام توزیع	نام توزیع	نام توزیع	کای اسکور
			دایگم	لوگ لچستیک	دایگم				
آبی	آوریل	دایگم	$\gamma = 0.00$	$\beta = 13.14$	$\alpha = 4.15$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	دایگم	$\gamma = 0.00$	فراسنج‌های توزیع
	مه	لوگ لچستیک	$\gamma = 0.00$	$\beta = 8.29$	$\alpha = 2.46$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	حدی تعمیم‌یافته	$\mu = 7.51$	فراسنج‌های توزیع
	اوت	گوسین معکوس	$\gamma = 0.00$	$\mu = 0.67$	$\lambda = 0.90$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	عمر خستگی	$\sigma = 4.58$	فراسنج‌های توزیع
پایه	سپتامبر	سپتامبر	$\gamma = 0.05$	$\beta = 0.29$	$\alpha = 0.95$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	عمر خستگی	$k = 0.02$	کای اسکور
	آوریل	دایگم	$\gamma = -0.76$	$\beta = 29.12$	$k = 0.29$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	لوگ لچستیک	$\mu = 0.97$	کای اسکور
	مه	بور	$\gamma = -1631.10$	$\beta = 1644.80$	$k = 0.57$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	بور	$\beta = 0.41$	کای اسکور
سپتامبر	اوت	پهنجار	$\mu = 0.11$	$\sigma = 0.26$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	گوسین معکوس	$\gamma = 0.07$	کای اسکور
	آوریل	دایگم	$\gamma = 0.00$	$\beta = 54.28$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	گوسین معکوس	$\beta = 0.22$	کای اسکور
	مه	اسکور	$\gamma = 0.00$	$\mu = 82.48$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	گوسین معکوس	$\alpha = 0.93$	کای اسکور
اوت	گامبل	$\mu = -0.06$	$\sigma = 0.20$	$\gamma = -1631.10$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	گامبل	$\gamma = 0.02$	کای اسکور
	بیشینه	$\mu = -0.01$	$\sigma = 0.26$	$\gamma = -1631.10$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	بیشینه	$\beta = 0.07$	کای اسکور
	تعمیم‌یافته	$\mu = -0.06$	$\sigma = 0.26$	$\gamma = -1631.10$		اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	تعمیم‌یافته	$\beta = 0.24$	کای اسکور
سپتامبر	اوت	سپتامبر	$\mu = 0.08$	$\sigma = 0.17$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	سپتامبر	$\alpha = 2.04$	کای اسکور
	آوریل	دایگم	$\mu = 0.17$	$\sigma = 0.17$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	دایگم	$\alpha = 1.33$	کای اسکور
	مه	پهنجار	$\mu = 0.08$	$\sigma = 0.17$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	پهنجار	$\beta = 0.51$	کای اسکور
آوریل	اوت	سپتامبر	$\mu = -0.06$	$\sigma = 0.20$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	سپتامبر	$\beta = 0.24$	کای اسکور
	آوریل	دایگم	$\mu = -0.06$	$\sigma = 0.20$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	دایگم	$\beta = 0.24$	کای اسکور
	مه	پهنجار	$\mu = -0.06$	$\sigma = 0.20$	$k = 0.45$	اسمیرنوف-کلموگروف-اسمیرنوف	پهنجار	$\beta = 0.24$	کای اسکور

مربوط به این مقایسه‌ها برای ماه آوریل به مه و اوت به سپتامبر، برای دوره‌های آتی و دوره‌ی پایه در جدول ۸ ارائه شده اند.

در جدول ۸، مقایسه‌ی احتمال انتقال جریان (منتج از شبیه HadCM3 و شبیه آبشناسی) در دوره‌های آتی، و احتمال انتقال جریان پایه نشان می‌دهد که عمدتاً ضریب همبستگی بین احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی و احتمال انتقال جریان در دوره‌ی پایه در ماه‌های تر به نسبت ماه‌های خشک بیشتر است. در این جدول، شاخص‌های خطا بین احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی و احتمال انتقال در دوره‌ی پایه در ماه‌های تر کمتر است. البته این مطلب در مورد دوره‌ی سوم بالعکس است و این به دلیل متفاوت بودن ماهیت جریان در دوره‌ی سوم می‌باشد، چه در این دوره، بارندگی آتی نسبت به بارندگی پایه کاهش، و دمای آتی نسبت به دمای پایه نیز افزایش چشم‌گیری دارد؛ بنابراین، جریان در محدوده‌ی کم دوره‌ی سوم آتی، تطابق بیشتری با جریان در محدوده کم دوره‌ی پایه دارد.

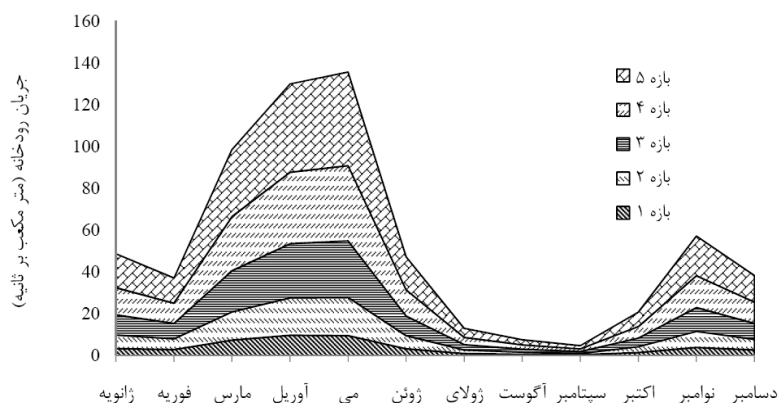
همان‌طور که در جدول ۷ نیز ارائه شده است، در مجموع مقایسه‌ی احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی و احتمال انتقال جریان پایه نشان از پایین بودن ضریب همبستگی دارد. بنابراین، حتی اگر از نظر آبشناسی تغییر زیادی در جریان مشاهده نشود، از نظر برنامه‌ریزی منابع آب، و تعیین سیاست‌های بهره‌برداری و تخصیص باید بازنگری‌هایی صورت گیرد، زیرا حتی اگر همان مقدار آب داشته باشیم، توزیع آن کاملاً تغییر کرده است.

بررسی احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی

قبل از تولید ماتریس احتمال انتقال جریان لازم است جریان رود گسسته‌سازی شود. در انجام تحقیق حاضر برای گسسته‌سازی، جریان رود (در بین رواناب‌های آتی تولید شده و رواناب‌های پایه) در هر ماه به پنج بازه تقسیم‌بندی شد. نتایج تقسیم‌بندی‌های انجام شده در شکل ۶ ارائه شده اند. این تقسیم‌بندی‌ها در هر ماه با کاربرد روش بازه‌های مساوی صورت گرفته است.

پس از گسسته‌سازی جریان رود، برای تعیین احتمالات انتقال جریان بین بازه‌های مختلف، تعداد انتقالها از هر بازه در هر دوره‌ی زمانی به هر بازه در دوره-ی زمانی بعدی محاسبه شده، و براساس کل حالات هر بازه در هر دوره‌ی زمانی، احتمال وقوع انتقالها مشخص گردیدند؛ بنابراین، در مجموع ۱۲ ماتریس احتمال انتقال برای رواناب هر دوره ۳۰ ساله‌ی آتی، و ۱۲ ماتریس احتمال انتقال برای رواناب پایه، یعنی در مجموع ۴۸ احتمال وقوع انتقال محاسبه شدند. برای نمونه، احتمال انتقال جریان برای ماه آوریل به مه و اوت به سپتامبر برای دوره‌ی اول آتی و دوره‌ی پایه در جدول ۶ ارائه شده است.

در ادامه، به منظور مقایسه‌ی احتمال انتقال جریان در هر یک از دوره‌های آتی با جریان دوره‌ی پایه در هر ماه، از معیارهای عملکرد ضریب همبستگی، جذر متوسط مربعات خطا، متوسط خطای مطلق و کارایی نش-ساتکلیف استفاده شدند. برای مقایسه‌ی احتمال انتقال آنها، معیارهای عملکرد فوق برای اجزای نظیر به نظیر هر دو ماتریس مورد محاسبه قرار گرفته اند (جدول ۷). نتایج



شکل ۶- گسسته‌سازی جریان رود در ماه‌های مختلف.

جدول ۴- شاخص‌های آماری سالانه‌ی رواناب.

شاخص‌های آماری	بارندگی		دما		رواناب	
	آبی	پایه	آبی	پایه	آبی	پایه
میانگین)mm ³ /s(۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۷۰-۲۰۹۹	۲۰۴۰-۲۰۶۹
انحراف معیار)mm ³ /s(۳۷/۰۱	۲۸/۳۵	۱۲/۸۶	۱۱/۵۳	۳/۷۹	۴/۹۲
ضریب تغییرات	۶۵/۱۰	۱۸/۶۲	۶۹/۴۷	۷۹/۷۷	۷۸/۴۸	۷۶/۹۸
	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۷۰-۲۰۹۹	۲۰۴۰-۲۰۶۹
	۲۹/۴۵	۲۷/۰۱	۱۴/۱۰	۱۱/۵۳	۲/۵۹	۴/۹۲
	۲۰/۹۲	۱۷/۵۸	۹/۸۰	۹/۲۰	۲/۵۹	۳/۷۹
	۷۱/۰۴	۶۵/۱۰	۶۹/۴۷	۷۹/۷۷	۷۸/۴۸	۷۶/۹۸
	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۴۰-۲۰۶۹	۱۹۷۱-۲۰۰۰	۲۰۷۰-۲۰۹۹	۲۰۴۰-۲۰۶۹
	۲۵/۵۱	۲۵/۵۱	۱۶/۳۴	۱۶/۳۴	۳/۳۰	۴/۹۲
	۱۹/۲۳	۱۹/۲۳	۱۰/۳۱	۱۰/۳۱	۲/۵۹	۳/۷۹
	۷۵/۳۷	۷۵/۳۷	۶۳/۱۰	۶۳/۱۰	۷۸/۴۸	۷۶/۹۸

جدول ۵- مقایسه‌ی حجم کل رواناب دوره‌های آبی و دوره‌ی پایه برای جریانهای کم، متوسط و زیاد.

نوع جریان	رواناب پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰)	رواناب شبیه‌سازی (۲۰۱۰-۲۰۳۹)	رواناب شبیه‌سازی (۲۰۴۰-۲۰۶۹)	رواناب شبیه‌سازی (۲۰۷۰-۲۰۹۹)
جریان زیاد = حجم جریان بین ۷۷ تا ۱۱۶ ($\times 10^6 m^3$) (بدهی جریان = ۳۰ تا ۴۵ مترمکعب بر ثانیه)	۸۳۱/۸۵	۰/۰۰	۱۶۱/۶۱	۰/۰۰
جریان متوسط = حجم جریان بین ۳۸ تا ۷۷ ($\times 10^6 m^3$) (بدهی جریان = ۱۵ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه)	۱۹۳۱/۴۰	۶۳۱/۰۰	۱۰۵۵/۴۶	۴۴۲/۱۸
جریان کم = حجم جریان بین ۰ تا ۳۸ ($\times 10^6 m^3$) (بدهی جریان = ۰ تا ۱۵ مترمکعب بر ثانیه)	۲۳۰۰/۸۹	۳۳۸۳/۶۹	۳۲۴۵/۴۲	۲۶۱۷/۸۴

جدول ۶- مقایسه‌ی ماتریس احتمال انتقال برای ماه آوریل به مه و اوت به سپتامبر برای دوره‌ی اول آبی با دوره‌ی پایه.

	آوریل						اوت					
	مه	آوریل	آوریل	آوریل	آوریل		اوت	اوت	اوت	اوت	اوت	
آوریل	0.00	0.00	0.00	0.20	0.80	1	0.00	0.00	0.00	0.07	0.93	1
	0.00	0.14	0.29	0.57	0.00	2	0.00	0.08	0.08	0.42	0.42	2
	0.00	0.09	0.36	0.55	0.00	3	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3
	0.25	0.50	0.00	0.25	0.00	4	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	4
	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00	5	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	5
اوت	0.11	0.00	0.11	0.00	0.79	1	0.00	0.00	0.11	0.00	0.79	1
	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	2	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	2
	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	3
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی نمایشنامه‌ی شبیه‌سازی جریان حوضه‌ی رودی در استان آذربایجان شرقی، و همچنین احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ پرداخته شد. در این تحقیق از شبیه اقلیمی HadCM3 و منطق شبیه آبشناسی IHACRES به ترتیب برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دما و بارندگی و شبیه‌سازی جریان رود در دوره‌های آتی استفاده شد و نتایج زیر حاصل گردیدند: انتظار می‌رود که دمای حوضه در سه دوره‌ی آتی در ماه‌های مختلف، به ترتیب بین ۱/۰ تا ۱/۸، ۱/۷ تا ۳/۹ و ۳/۵ تا ۶/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) افزایش یابد. همچنین، حوضه در این دوره‌ها شاهد افزایش بارندگی عمدتاً برای فصلهای پاییز و زمستان، و کاهش آن برای فصلهای بهار و تابستان خواهد بود. محدوده‌ی تغییرات بارندگی در سه دوره‌ی آتی در ماه‌های مختلف، بین ۲۸- تا ۳۳، ۳۹- تا ۲۹ و ۹۱- تا ۳۴ درصد نسبت به دوره پایه خواهد بود.

پس از شبیه‌سازی جریان بلندمدت رود، و استخراج فراسنجهای توزیع مناسب آماری برآزش داده شده، شاخصهای آماری (میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات) متوسط ماهانه رواناب بلندمدت در دوره‌ی آتی با متوسط ماهانه رواناب پایه مقایسه شدند که نتایج نشان می‌دهند که به‌رغم این که متوسط رواناب سالانه‌ی بلندمدت در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نسبت به دوره‌ی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ به ترتیب به میزان ۲۲، ۱۱ و ۶۵ درصد کاهش می‌یابد، این روند کاهشی نیست، و در دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی دوم نسبت به ۳۰ ساله‌ی اول، افزایش نسبتاً کمی دارد. هم‌چنین، ضریب تغییرات مربوط به رواناب نیز در دوره‌های آتی کاهش خواهد یافت، به‌گونه‌ای که میزان کاهش آن در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نسبت به

دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ به ترتیب برابر با ۳۶/۲، ۳۵/۵ و ۳۴/۲ درصد می‌باشد. به‌رغم کاهش حجم بلندمدت رواناب در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه، این کاهش به جریانهای متوسط و زیاد مرتبط می‌شود، و در جریانهای کم، حجم رواناب دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی مشاهداتی به ترتیب به میزان ۴۷، ۴۱ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. این مسأله به‌دلیل تأثیر بیشتر متغیر دما در جریان کم، و تأثیر بیشتر متغیر بارندگی در جریان زیاد می‌باشد.

بررسی همبستگی گروههای زمانی با کمک احتمالات انتقال امکان‌پذیر است. پس از گسسته‌سازی جریان رود در مجموع ۴۸ احتمال وقوع انتقال محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهند که ضریب همبستگی بین احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی و احتمال انتقال جریان در دوره‌ی پایه عمدتاً در ماههای تر به نسبت ماههای خشک بیشتر است. همچنین، شاخصهای خطا بین احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی و احتمال انتقال در دوره‌ی پایه در ماههای تر کمتر است. البته این مطلب در مورد دوره‌ی سوم بالعکس است و این به دلیل متفاوت بودن ماهیت جریان در دوره‌ی سوم می‌باشد، چون در این دوره بارندگی آتی نسبت به بارندگی پایه کاهش، و دمای آتی نسبت به دمای پایه نیز افزایش چشم‌گیری دارد؛ بنابراین، جریان در محدوده‌ی کم دوره-ی سوم آتی، تطابق بیشتری با جریان در محدوده‌ی کم دوره مشاهداتی نسبت به ماه تر دارد.

در مجموع، مقایسه‌ی احتمال انتقال جریان در دوره‌های آتی، و احتمال انتقال جریان پایه نشان از پایین بودن ضریب همبستگی دارد؛ بنابراین، از نظر برنامه‌ریزی منابع آب و تعیین سیاستهای بهره‌برداری و تخصیص، باید بازنگریهایی صورت گیرد، زیرا توزیع جریان کاملاً تغییر کرده است.

جدول ۷- معیارهای عملکرد احتمال انتقال جریان دوره‌های آتی (الف) ۲۰۱۰-۲۰۳۹، (ب) ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و (پ) ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به احتمال انتقال جریان در دوره‌ی پایه.

معیار عملکرد				دوره
<i>NSE</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	
-۰/۵۳	۰/۲۱	۰/۳۷	۰/۲۲	۲۰۱۰-۲۰۳۹
-۰/۴۸	۰/۲۰	۰/۳۷	۰/۲۵	۲۰۴۰-۲۰۶۹
-۰/۴۵	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۲۴	۲۰۷۰-۲۰۹۹

جدول ۸- مقایسه‌ی معیارهای عملکرد احتمال انتقال جریان برای ماه‌های آوریل به مه و اوت به سپتامبر دوره‌های آتی با دوره‌ی پایه.

معیارهای عملکرد				از ماه به ماه	دوره
<i>NSE</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>		
-۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۴۷	آوریل به مه	۲۰۱۰-۲۰۳۹
-۱/۰۸	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۰۹	اوت به سپتامبر	
-۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۴۹	آوریل به مه	۲۰۴۰-۲۰۶۹
-۰/۵۹	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۱۹	اوت به سپتامبر	
-۱/۳۶	۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۱۰	آوریل به مه	۲۰۷۰-۲۰۹۹
-۰/۰۹	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۴۵	اوت به سپتامبر	

- Hu, T.S., K.C. Lam, and S.T. Ng. 2001. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrol. Sci. J.* 46: 729-745.
- IPCC. 2008. *Climate change and water*. Cambridge University Press.
- Jakeman, A.J., and G.M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resour. Res.* 29: 2637-2649.
- Kite, G.W. 1977. *Frequency and risk analysis in hydrology*. Water Resour. Public. Fort Collins, Colorado, pp, 224.
- Lin, J.Y., C.T. Cheng, and K.W. Chau. 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrol. Sci. J.* 51: 599-612.
- Littlewood, I.G., K. Down, J.R. Parker, and D.A. Post. 1997. IHACRES: Catchment-scale rainfall streamflow modelling (PC version) Version 1.0 - April 1997. Institute of Hydrology, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxon, UK. <http://www.nwl.ac.uk/ih/www/products/mswihacres.html>.

منابع

- آشفته، پ.، و ع. مساح‌بوانی. ۱۳۸۸. تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی. تحقیقات منابع آب ایران. ۳۹-۲۷:(۲)۵.
- مهندسین مشاور یکم. ۱۳۸۵. گزارش هواشناسی مطالعات طراحی کشاورزی آیدوغموش.
- Acharya, A., T.C. Piechota, and G. Tootle. 2011. Quantitative assessment of climate change on the hydrology of the North Platte River Watershed, Wyoming. *J. Hydrol. Eng.* doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000543.
- Diaz-Nieto, J., and R.L. Wilby. 2005. A comparison of statistical and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change* 69: 245-268.
- Ekström, M., B. Hingray, A. Mezghani, and P.D. Jones. 2005. Regional climate model data used within the SWURVE project 2: addressing uncertainty in regional climate model data for five European case study areas. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 11: 1085-1096.

- Water Resour. Plan. Manage. 137: 318-326.
15. Wilby, R.L., and I. Harris. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.* 42: 1-10.
 16. Yu, P.S., T.C. Yang, and C.K. Wu. 2002. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. *J. Hydrol.* 260: 161-175.
 17. Zhang, J.Y., G.Q. Wang, R.M. He, and C.S. Liu. 2009. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River Basin and its response to climate change. *Adv. Water Sci.* 20: 153-158.
 12. Lorena, L., V. Leonardo, R. Enrique, and L. Goffredi. 2010. Basin-scale water resources assessment in Oklahoma under systematic climate change scenarios using a fully distributed hydrologic model. *J. Hydrol. Eng.* 15: 107-118.
 13. Moriasi, D.N. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.
 14. Traynham, L., R. Palmer, and A. Polebitski. 2011. Impacts of future climate conditions and forecasted population growth on water supply systems in the Puget Sound region. *J.*