



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۶

ارزیابی عدم قطعیت تغییر اقلیم و اثرات آن بر احتمال تواتر آبدهی ورودی سد جامیشان

مریم حافظپرست مودت^{۱*}، علی بافکار^۲، الهه پناهی^۳

^{۱*} استادیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه رازی؛ کرمانشاه؛ ایران

^{*} نویسنده مسئول مکاتبات: m.hafezparast@razi.ac.ir

^۲ استادیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه رازی؛ کرمانشاه؛ ایران

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد منابع آب؛ دانشگاه رازی؛ کرمانشاه؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۳

چکیده

به منظور ارزیابی عدم قطعیت تغییر اقلیم بر آبدهی ورودی به سد جامیشان واقع در شمال شرقی استان کرمانشاه، ابتدا تغییرات پارامترهای دما و بارش منطقه در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۵۹ با استفاده از مدل ترکیبی حاصل از میانگین وزنی خروجی هفت مدل اقلیمی تحت سه سناریو انتشار A1B، B1 و A2 محاسبه شد، سپس داده‌های بارش و دمای روزانه محاسبه شده برای دوره‌های آبی تحت هر سناریو به مدل بارش-رواناب روزانه IHACRES که واسنجی و صحت‌سنجی شد، وارد شده و رواناب دوره‌های آبی تحت هر سناریو پیش‌بینی شد. به‌منظور تعیین دوره‌های پرآبی و کم‌آبی در وضعیت موجود و دوره‌های آبی، با استفاده از ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکف، احتمال تواتر ماه‌های پرآب، نرمال و کم‌آب محاسبه شد. نتایج نشان داد، در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹، بارش و رواناب سالانه کاهش و دمای سالانه افزایش می‌یابد. در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ که تغییرات شدیدتر است دمای سالانه بین $+2$ و -0.66 درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. بارش و رواناب سالانه در سناریوهای A1B و B1 کاهش و در سناریو A2 افزایش نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم؛ زنجیره مارکوف؛ عدم قطعیت؛ IHACRES

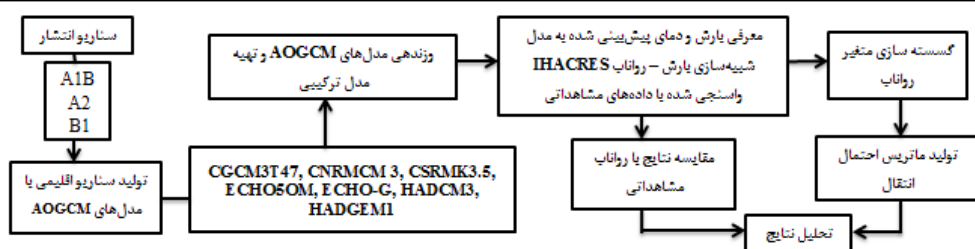
مقدمه

متوسط دمای سطحی کره زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند به $1/1$ تا $6/4$ درجه سانتی‌گراد برسد و باعث پدیده تغییر اقلیم شده و سبب ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژیکی شود (IPCC, 2007). Wilby و Harris (۲۰۰۶)، اثر تغییر اقلیم بر جریان‌های کم رودخانه در انگلستان را با مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش-رواناب و عدم قطعیت مربوط

طبق گزارش‌های IPCC (INTERGOVERNMENTAL) PANEL ON CLIMATE CHANGE) در صورت ادامه روند کنونی افزایش گازهای گلخانه‌ای مخصوصاً گاز CO₂ در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی، غلظت این گاز تا قبل از پایان قرن ۲۱ می‌تواند به بیش از ۶۰۰ ppm رسیده و

برای شبیه‌سازی جریان در حوضه‌های منطقه بکار گرفته شود. Soojin و همکاران (۲۰۱۵)، از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی جریان داده‌های بارش آینده که با استفاده از سناریو تغییر اقلیم مدل چندگانه بیزی استفاده شد و نتایج شبیه‌سازی تغییر مدت زمان جریان در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۱۰۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. کمال و مساح (۱۳۹۰)، در تحقیقی تاثیر عدم قطعیت مربوط به مدل‌های شبیه‌سازی سناریو انتشار A2 را در رودخانه قره‌سو کرمانشاه را بررسی کردند در این راستا از نه مدل AOGCM و دو مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES و SIMHYD استفاده شد و نتایج نشان داد که در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM و مدل‌های هیدرولوژی باعث تعیین دقیق‌تر تغییرات رواناب در منطقه مطالعاتی می‌شود. آشفته و مساح (۱۳۹۱)، تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قرنقو در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ را با لحاظ نمودن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM را بررسی نمودند. با واسنجی مدل IHACRES و با استفاده از روش مونت کارلو رواناب ماهانه در دوره آتی شبیه‌سازی گردید. خردادادی و همکاران (۱۳۹۲)، بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر پنج پارامتر هواشناسی در زیرحوضه تهران-کرج از مدل گردش عمومی HADCM3 تحت سناریو انتشار A2 برای ۳ دوره آینده استفاده کردند. قاسمی و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر رژیم رواناب حوضه شهرچای ارومیه در دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۹ با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM را بررسی کردند. برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های AOGCM با روش MOTP وزن‌دهی شدند. رواناب رودخانه حوضه در دوره آتی نیز با مدل IHACRES شبیه‌سازی گردید.

به پارامترهای آن‌ها با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف و روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM بیش‌ترین سهم و سناریوهای گازهای گلخانه‌ای کمترین سهم را در برآورد تابع احتمالاتی رواناب دارند. Mwangi و همکاران (۲۰۰۸)، مدل بارش-رواناب IHACRES را برای ۶ حوضه در بالادست رودخانه تانا در کنیا بکاربردند. Vaze و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از چهار مدل بارش-رواناب تأثیر تغییرات اقلیم روی واکنش‌های هیدرولوژیکی ۶۱ حوضه جنوب شرق استرالیا را بررسی کردند و تخمین مدل IHACRES مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد. Semenov و همکاران (۲۰۱۰)، بیان کردند که گروه مدل چندگانه (Multi-model ensemble) بر عدم قطعیت ناشی از تفاوت ساختاری در مدل‌های جهانی اقلیمی و نیز عدم قطعیت به علت تغییرات در شرایط اولیه یا پارامترهای مدل، در پیش‌بینی اقلیم تاکید دارد. Meshkinnezhad و همکاران (۲۰۱۳)، با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد دز در دوره‌های آتی، با استفاده از مدل تصادفی تولید داده‌های اقلیمی ClimGen و مدل اقلیمی CGCM3 براساس دو سناریو انتشار A2 و B1 تولید کردند. سپس این داده‌ها به مدل بارش-رواناب IHACRES که با استفاده از اطلاعات دوره پایه برای منطقه واسنجی و صحت‌سنجی شده بود معرفی و مقدار رواناب برای دوره ۲۰۹۱-۲۱۰۰ محاسبه گردید. نتایج حاکی از کاهش ۵۰ درصدی رواناب در منطقه سد در دوره آتی می‌باشد. Javid و Apoorva (۲۰۱۵)، مدل IHACRES را با گام زمانی روزانه برای شش حوضه در منطقه غرب کارناتا بکار بردند و ثابت کردند که مدل IHACRES با حداقل داده‌های ورودی به‌خوبی می‌تواند



شکل ۱. الگوریتم روند انجام پژوهش

حوضه آبریز گاوهرود، از شرق به حوضه آبریز خرم‌رود، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه مریم نگار و از غرب به زیرحوضه‌های عالی سیاه و گاوهرود منتهی می‌شود. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۲ دقیقه الی ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی در قلمرو تراست زاگرس واقع گردیده است. این محدوده در تقسیمات کشوری در استان کرمانشاه واقع می‌باشد. شکل ۲ موقعیت منطقه را نشان می‌دهد.

مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

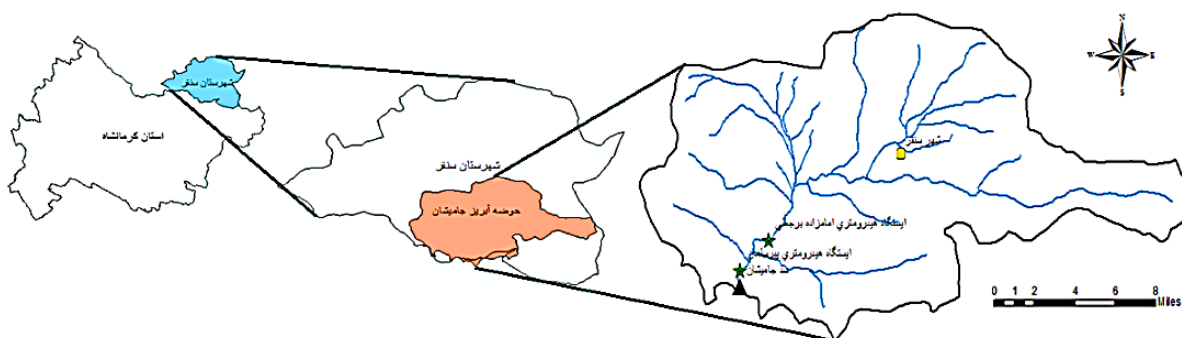
مدل‌های گردش عمومی یا AOGCM ها که نشان‌دهنده فرایندهای فیزیکی در اتمسفر، اقیانوس و یخچال‌ها و سطح زمین هستند در حال حاضر به‌عنوان پیشرفته‌ترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی پاسخ آب و هوای جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند.

در این پژوهش برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر آبدهی ورودی به سد جامیشان (سنقر) در استان کرمانشاه از هفت مدل اقلیمی و دو دوره آتی و سه سناریو استفاده شد. برای کاهش اثر عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی از روش وزندهی مدل‌های اقلیمی استفاده شد. در ادامه تغییرات بارش و دما برای هر دوره و هر سناریو حاصل از مدل ترکیبی اقلیمی مشخص شده و اثرات آن در مدل بارش - رواناب مفهومی و روزانه IHCRES که به خوبی واسنجی و صحت‌سنجی شده است، محاسبه گردید و تغییرات آبدهی این رودخانه تعیین شد. در ادامه به‌منظور بررسی احتمال تواتر آبدهی در هر یک از دوره‌ها و وضع موجود از ماتریس‌های احتمال انتقال در زنجیره مارکوف استفاده شد و مراحل این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده حوضه آبریز سد جامیشان از شمال به



شکل ۲. موقعیت حوضه آبریز جامیشان

ریز مقیاس نمایی و تولید سناریوهای اقلیمی

خروجی مدل‌های اقلیمی دقت تجزیه مکانی و زمانی مورد نیاز مدل‌های هیدرولوژیکی را ندارد، لذا لازم است که خروجی مدل‌های اقلیمی برای منطقه مورد نظر ریزمقیاس شود چندین روش برای کوچک مقیاس کردن و یا تبدیل خروجی‌های AOGCM به متغیرهای سطحی در مقیاس حوضه رودخانه توسعه یافته‌اند (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲). بیش‌ترین روش‌های به کار رفته عبارت‌اند از: ۱- روش‌های نسبت و تفاوت. ۲- کوچک مقیاس کردن آماری. ۳- کوچک مقیاس کردن دینامیکی (Lane و همکاران، ۱۹۹۹). در این پژوهش به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌ها به لحاظ مکانی از روش تناسبی که در آن متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه مورد نظر در آن قرار می‌گیرد، استفاده شده است. همچنین از روش عامل تغییر (معادلات ۱ تا ۴) برای ریزمقیاس‌نمایی زمانی داده‌ها با استفاده از نرم افزار اکسل (EXCEL) استفاده شد.

$$\Delta T_i = \bar{T}_{GCM,Fut,i} - \bar{T}_{GCM,Base,i} \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM,Fut,i}}{\bar{P}_{GCM,Base,i}} \right) \quad (2)$$

$$T = T_{Obs} + \Delta T \quad (3)$$

$$P = P_{Obs} \times \Delta P \quad (4)$$

در معادله (۱) ΔT_i سناریو تغییر اقلیم مربوط به دما برای متوسط دراز مدت ۲۰ ساله برای هرماه، $\bar{T}_{GCM,Fut,i}$ متوسط دمای ۲۰ ساله شبیه‌سازی شده توسط هر مدل AOGCM در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) برای هرماه، $\bar{T}_{GCM,Base,i}$ متوسط دمای شبیه‌سازی شده توسط هر مدل AOGCM در دوره مشاهداتی برای هر ماه است. در معادله (۲)، برای بارندگی نیز موارد فوق برقرار است. در معادله (۳)، T سری زمانی حاصل از سناریو اقلیمی دما برای دوره آتی، T_{Obs} سری زمانی دمای مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۲)، و ΔT سناریو تغییر اقلیم

امروزه تهیه و استخراج داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی (در مقیاس ماهانه) از طریق مراکز مختلف تحقیقاتی، امکان‌پذیر است. یکی از معتبرترین مراکز ارائه‌دهنده این داده‌ها که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، سایت CCCSN^۱ است که متعلق به سازمان محیط زیست کانادا می‌باشد. پیش‌بینی تولید گازهای گلخانه‌ای به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد و فرضیات اساسی آن‌ها برای ارزیابی اثرات و آسیب‌های تغییرات اقلیمی با توجه به تغییرات اجتماعی-اقتصادی، جمعیتی و فناوری می‌باشد. SRES به توصیف سناریوهای انتشار گزارش ویژه IPCC اشاره دارد. سناریوهای SRES، به چهار خانواده سناریو A1، A2، B1 و B2 گروه‌بندی شده‌اند که انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه عوامل جمعیتی، اقتصادی و تکنولوژی را در طیف وسیعی بررسی می‌کنند. سناریو A1، معرفی سریع فناوری‌های جدید و کارآمدتر، رشد بسیار سریع اقتصاد و جمعیت را برای جهان فرض می‌کند، و برای توصیف جایگزین‌های تکنولوژی به سه گروه تقسیم می‌شود: A1F1 سوخت‌های فسیلی، A1T منابع انرژی غیر فسیلی، A1B تعادل در تمام منابع. سناریو A2، جهانی بسیار ناهمگن با رشد جمعیت بالا، توسعه اقتصادی و تغییرات تکنولوژیکی آهسته را توصیف می‌کند. سناریو B1، توصیفی از یک جهان همگرا، با همان جمعیت سناریو A1، تغییرات سریع در ساختار اقتصادی و میل به سمت خدمات و اطلاعات اقتصادی است. سناریو B2، توصیفی از یک جهان با جمعیت و رشد اقتصادی متوسط با تاکید بر راه‌حل‌های محلی برای پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است (IPCC, 2007). در این پژوهش سه سناریو A1B، A2 و B1 در نظر گرفته شده است.

^۱ www.cccsn.ec.gc.ca

واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (Littlewood et al., 2007).

$$u_k = S_k \times r_k$$

$$S_k = C \times r_k + \left(1 + \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) S_{k-1}, S_0 = 0 \quad (6)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062f(R-t_k)} \quad (7)$$

$$\tau_w(t_k) > 1 \quad (8)$$

$$x_k = a^q x_{k-1} + b^q u_{k-1} + a^s x_{k-1} \quad (9)$$

در این معادله‌ها S_k ، ضریب رطوبتی حوضه است. مقدار شاخص S_k را در معادله (۷) در هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد، کنترل می‌کند که در آن R دمای مرجع، τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه و f فاکتور تعدیل دما است. در معادله (۶) پارامتر C به گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان گردد. سپس بارندگی مؤثر توسط مدول خطی هیدروگراف معادله (۹) به رواناب سطحی تبدیل خواهد شد. در معادله (۹) پارامترهای s و q پارامترهای مربوط به تفکیک هیدروگراف حوضه به دو قسمت هیدروگراف سریع (q) و هیدروگراف کند (s) می‌باشند. به طور کلی، در این روش سه پارامتر c و f ، τ_w ، a^q از مدول غیرخطی کاهش و سه پارامتر از چهار پارامتر a^q ، a^s ، b^q و b^s از مدول خطی هیدروگراف (معادله ۹) می‌بایست براساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد مطالعه واسنجی گردد (Jakemam, 1993).

واسنجی و ارزیابی قابلیت مدل IHACRES جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب

به منظور بکارگیری مدل بارش-رواناب IHACRES جهت پیش‌بینی جریان رودخانه در دوره‌های آتی ابتدا بایستی مدل مذکور برای منطقه مورد استفاده واسنجی شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از آزمون‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، سپس با استفاده از مقادیر بارش و درجه حرارت پیش‌بینی شده توسط میانگین وزنی

کوچک مقیاس شده می‌باشد. در معادله (۴) برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار است.

بررسی عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی با روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دما و بارندگی (MOTP)

یکی از عمده‌ترین منابع عدم قطعیت در مباحث تغییر اقلیم ناشی از بکارگیری مدل‌های مختلف AOGCM است که خروجی‌های متفاوتی را برای متغیرهای اقلیمی تولید می‌کنند. برای دخالت عدم قطعیت مدل‌های AOGCM، روش MOTP^۱ مورد استفاده قرار گرفت. در این روش میانگین ماهانه متغیرهای شبیه‌سازی شده توسط مدل در شبکه‌ای که ایستگاه هواشناسی در آن قرار دارد با مقادیر داده‌های مشاهداتی طی دوره پایه، مقایسه و براساس میزان توانمندی مدل در شبیه‌سازی مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناسی وزن هر یک از مدل‌ها مطابق معادله (۵) با استفاده از ترم افزار اکسل (EXCEL) محاسبه می‌شود (مساح و همکاران، ۱۳۸۵).

$$W_{ij} = \frac{\frac{1}{\Delta F_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta F_{ij}}} \quad (5)$$

در اینجا F متغیر هواشناسی مورد بررسی، ΔF اختلاف بین متغیر شبیه‌سازی شده و تحت سناریوهای مختلف با مقدار مشاهداتی در دوره پایه، W وزن شبیه‌سازی‌های هر مدل گردش عمومی جو تحت هر سناریو در ماه مورد نظر، و i و j به ترتیب نشان‌دهنده ماه و مدل گردش عمومی می‌باشند.

مدل بارش-رواناب IHACRES

مدل بارش-رواناب IHACRES یک مدل مفهومی و یکپارچه است. اساس این روش از دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود. به این منظور، در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر (u_k) تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف

¹ Mean Observation Temperature-Precipitation

واقع، P احتمال شرطی است و بیان می‌کند که نتیجه هر فرآیند در زمان $t+1$ تنها به شرایط در زمان t بستگی دارد. فرآیندهایی که چنین خاصیتی دارند یک زنجیره مارکوف مرتبه اول نامیده می‌شوند. احتمال شرطی P_{ij} ، $P(X_{t+1} = j | X_t = i)$ احتمال انتقال سامانه از حالت i به j نامیده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

که در آن، $N(X_t = i, X_{t+1} = j)$ تعداد انتقالات از حالت i به حالت j و $N(X_t = i)$ تعداد کل دوره‌های زمانی در حالت i می‌باشد. معمولاً P_{ij} را با آرایش مربعی $n \times n$ مرتب می‌کنند که n تعداد دسته یا بازه برای گسسته‌سازی جریان می‌باشد و نتیجه آن ماتریس مربع P است که ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف نامیده می‌شود:

$$P_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i) = \frac{N(X_t = i, X_{t+1} = j)}{N(X_t = i)} \quad (15)$$

در ماتریس P ، احتمال ورود جریان از حالت i به حالت j بزرگتر یا مساوی صفر می‌باشد (برای هر $i, j \in E$)، $P_{ij} \geq 0$ است) و مجموع احتمالات هر سطر باید برابر صفر یا یک باشد یعنی برای هر $i \in E$ یا $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 0$ یا 1 است. ابتدا بایستی جریان رودخانه گسسته‌سازی شود که از روش طول بازه‌های مساوی انجام شده و فراوانی هر بازه از طریق شمارش تعداد مقادیری که بین حدود بالا و پایین آن بازه قرار دارند، تعیین می‌شود. حال، برای به دست آوردن احتمالات انتقال بین بازه‌های مختلف، تعداد انتقال‌ها از هر بازه در هر دوره زمانی به هر بازه در دوره زمانی بعدی تعیین شده و براساس کل حالات هر بازه در هر دوره زمانی، احتمال وقوع انتقال‌ها محاسبه می‌شود (آشفته و بزرگ حداد ۱۳۹۴).

مدل‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی جریان رودخانه دوره‌های مذکور تحت سناریوهای مختلف پیش‌بینی شود.

معیارهای ارزیابی

به منظور بررسی توانایی مدل‌های استفاده شده در این پژوهش در شبیه‌سازی پارامترها، از معیارهای ضریب همبستگی (R)، معادله (۱۰)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) معادله (۱۱)، میانگین خطای مطلق (MAE) معادله (۱۲) و معیار ناش ساتکلایف (NSE) معادله (۱۳) استفاده شد.

$$R = \frac{Cov(x_{i(OBS)}, \hat{x}_i)}{\sqrt{var(x_{i(OBS)}) \times var(\hat{x}_i)}} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i(OBS)} - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{i(OBS)} - \hat{x}_i|}{n} \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i(OBS)} - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i(OBS)} - \bar{x}_{OBS})^2} \quad (13)$$

در روابط (۱۰) تا (۱۳)، $X_{i(OBS)}$ مقدار مشاهداتی پارامتر در ماه i ، \hat{x}_i مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر توسط مدل در ماه i ، \bar{x}_{OBS} میانگین مقادیر مشاهداتی پارامتر در کل دوره.

بررسی تواتر آبدی‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده با مدل زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف حالت خاصی از مدل‌هایی است که در آنها حالت فعلی یک سیستم به حالت‌های قبلی آن بستگی دارد. با این روش می‌توان احتمال وقوع و دوره‌ی بازگشت پدیده‌هایی نظیر دبی را محاسبه نمود.

ماتریس احتمال انتقال

فرآیند تصادفی $X = [X_t, t \in N]$ یک زنجیره مارکوف نامیده می‌شود، اگر برای هر $t \in N$ شرط زیر صادق باشد:

$$P(X_{t+1} = j | X_0, X_1, X_2, \dots, X_t) = P(X_{t+1} = j | X_t) \quad (14)$$

عبارت بالا بیانگر احتمال وجود جریان در زمان $t+1$ در حالت j است، به شرط اینکه در زمان t حالت سامانه مشخص و حالت‌های رخ داده قبلی نیز مشخص باشد. در

جدول ۱. مشخصات ایستگاههای منطقه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	پارامتر	طول جغرافیایی (درجه و دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه و دقیقه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
سنقر	کلیماتولوژی	دما	۳۵ و ۴۷	۳۴ و ۴۷	۱۶۸۰
پیرسلیمان	هیدرومتری	بارش و دبی	۲۷ و ۴۷	۳۴ و ۴۳	۱۵۳۰
حسن آباد	بارانسنجی	بارش	۲۵ و ۴۷	۳۴ و ۳۸	۱۴۲۰
سطر	بارانسنجی	بارش	۲۸ و ۴۷	۳۴ و ۴۹	۱۸۱۰
سنگ سفید	بارانسنجی	بارش	۱۱ و ۴۷	۳۴ و ۴۶	۲۰۳۰
سورن اباد	بارانسنجی	بارش	۲۸ و ۴۷	۳۴ و ۵۵	۱۷۸۰
فارسینج	بارانسنجی	بارش	۴۴ و ۴۷	۳۴ و ۴۲	۱۷۶۰
مرزبانی	بارانسنجی	بارش	۰۵ و ۴۷	۳۴ و ۴۲	۱۶۵۰

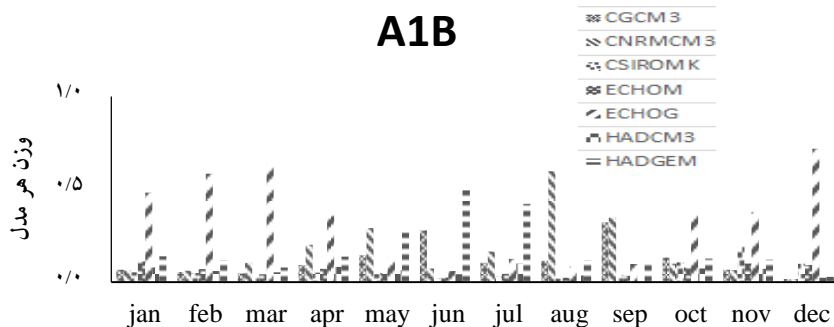
نتایج و بحث

انتخاب ایستگاه

پس از بررسی ایستگاه‌ها به لحاظ طول دوره آماری ایستگاه کلیماتولوژی سنقر به عنوان ایستگاه مبنا برای پارامتر دما و ۷ ایستگاه بارانسنجی برای پارامتر بارش و ایستگاه هیدرومتری پیرسلیمان برای پارامتر دبی انتخاب شد. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه کوهستانی می‌باشد، سعی شده است از ایستگاه‌هایی برای پارامتر بارش استفاده شود که ارتفاعات مختلف منطقه را پوشش دهند و در نهایت میانگین بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی به عنوان بارش منطقه در نظر گرفته شد. مشخصات ایستگاه‌های مذکور در جدول ۱ آورده شده است. پس از تکمیل نواقص آماری، دوره ۱۹۹۹-۲۰۱۱ میلادی به عنوان دوره مشترک انتخاب شد.

خروجی مدل‌های AOGCM

ابتدا خروجی هر یک از مدل‌های ۷ گانه تحت هریک از سناریوها (A1B و A2 و B1) در دوره پایه با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته و براساس محاسبه معیارهای خطا، اکثر مدل‌ها، شبیه‌سازی قابل قبولی را انجام داده‌اند، به منظور کاهش عدم قطعیت خروجی مدل‌های مختلف به ازای هر سناریو مدل‌ها وزن‌دهی شده و میانگین‌گیری انجام شد که نتایج نشان داد میانگین وزنی، شبیه‌سازی بهتری از پارامترها در دوره پایه را ارائه می‌کند. نتایج معیارهای خطا به تفکیک مدل و سناریو برای پارامترهای بارش و دما در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. وزن هر یک از مدل‌ها برای هر سه سناریو محاسبه شده و به دلیل محدودیت صفحات فقط نتایج سناریوی A1B در شکل ۳ و ۴ برای پارامترهای بارش و دما نشان داده شده است.



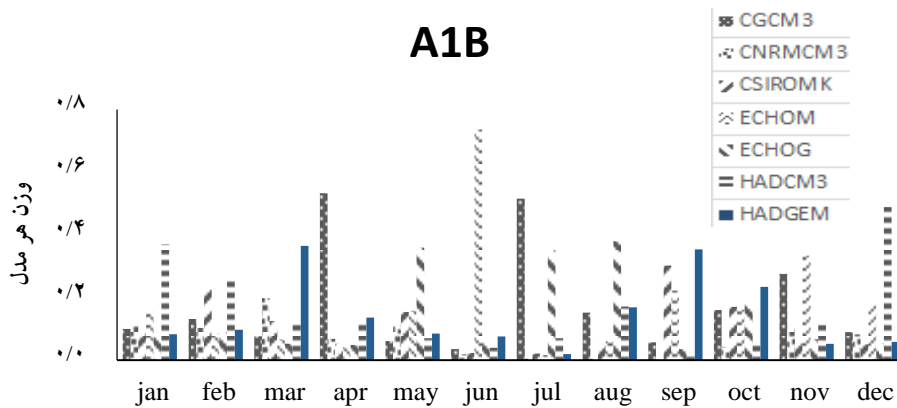
شکل ۳. وزن هریک از مدل‌ها تحت سناریوی A1B برای پارامتر دما

جدول ۲. معیارهای خطا به تفکیک مدل و سناریو برای پارامتر دما

NSE	R	MAE	RMSE	میانگین		
				۱۲/۶۴		مشاهداتی
۰/۸۷	۰/۹۱	۲/۵۷	۲/۸۵	۱۰/۷۴	CGCM3T47	A1B
۰/۸۹	۰/۹۱	۲/۲۴	۲/۶۲	۱۱/۱۸	CNRMCM3	
۰/۵۸	۰/۹۱	۴/۷۷	۵/۲۲	۱۷/۳۵	CSIROMK3.5	
۰/۷۱	۰/۹۱	۴/۰۲	۴/۳۴	۱۶/۶۳	ECHOM5OM	
۰/۹۷	۰/۹۲	۱/۱۵	۱/۴۲	۱۳/۶۰	ECHO-G	
۰/۸۰	۰/۹۱	۳/۵۵	۳/۶۲	۹/۰۲	HADCM3	
۰/۹۵	۰/۹۱	۱/۶۳	۱/۷۹	۱۱/۰۲	HADGEM1	
۱/۰۰	۰/۹۲	۰/۴۲	۰/۴۷	۱۲/۶۱	مدل ترکیبی	
						دما
۰/۸۸	۰/۹۱	۲/۵۳	۲/۷۸	۱۰/۸۳	CGCM3T47	
۰/۸۹	۰/۹۱	۲/۲۸	۲/۷۱	۱۱/۱۹	CNRMCM3	
۰/۵۷	۰/۹۰	۴/۷۵	۵/۲۹	۱۷/۴۴	CSIROMK3.5	
۰/۷۰	۰/۹۱	۴/۰۱	۴/۳۶	۱۶/۶۲	ECHOM5OM	
۰/۹۸	۰/۹۲	۱/۰۲	۱/۲۴	۱۳/۵۱	ECHO-G	
۰/۸۱	۰/۹۱	۳/۳۵	۳/۴۷	۹/۲۰	HADCM3	
۰/۹۶	۰/۹۱	۱/۵۰	۱/۶۷	۱۱/۱۵	HADGEM1	
۱/۰۰	۰/۹۲	۰/۳۹	۰/۴۴	۱۲/۶۲	مدل ترکیبی	
۰/۸۸	۰/۹۱	۲/۵۳	۲/۷۸	۱۰/۷۹	CGCM3T47	B1
۰/۸۸	۰/۹۱	۲/۳۲	۲/۷۴	۱۱/۱۴	CNRMCM3	
۰/۵۷	۰/۹۱	۴/۷۸	۵/۲۷	۱۷/۳۶	CSIROMK3.5	
۰/۷۰	۰/۹۱	۴/۰۹	۴/۴۰	۱۶/۷۰	ECHOM5OM	
۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۹۸	۱/۲۴	۱۳/۴۹	ECHO-G	
۰/۸۱	۰/۹۱	۳/۳۴	۳/۴۷	۹/۲۰	HADCM3	
۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۵۹	۰/۷۶	۱۲/۹۱	مدل ترکیبی	

بیشترین کاهش بارش در فصل زمستان با کاهش ۲۴/۲- درصدی خواهد بود. تحت سناریو A2، تغییرات بارش از ۷۹/۱- درصد در ماه نوامبر تا ۲۱۷+ درصد در ماه ژوئیه مورد انتظار است. بارش در فصول پاییز و زمستان به ترتیب کاهش ۲۰/۵ و ۱/۴ درصدی و طی فصول بهار و تابستان به ترتیب افزایش ۲۴/۹ و ۶۲/۹ درصدی خواهد داشت.

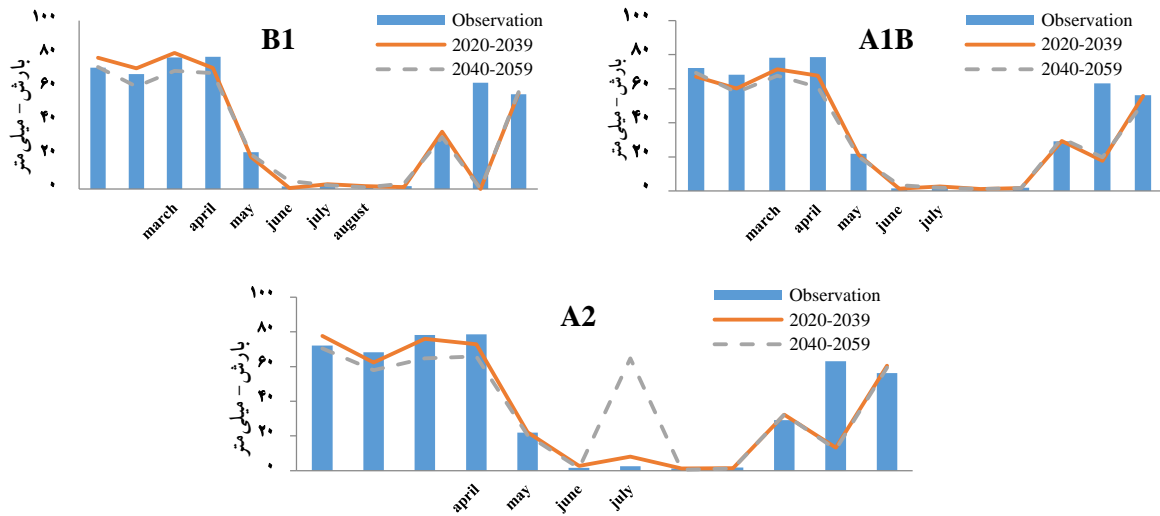
نتایج نشان داد مدل اقلیمی HADCM3 بیشترین وزن و مدل CNRMCM3 کمترین وزن را دارا می‌باشند. مقادیر بارش مشاهداتی و آتی برای هر سناریو در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹، سناریو A1B، تغییرات بارش از ۷۲- درصد در ماه نوامبر تا ۲/۹+ درصد در ماه ژوئیه را پیش‌بینی می‌کند. بارش طی همه فصول کاهش یافته و



شکل ۴. وزن هریک از مدل‌ها تحت سناریوی A1B برای پارامتر بارش

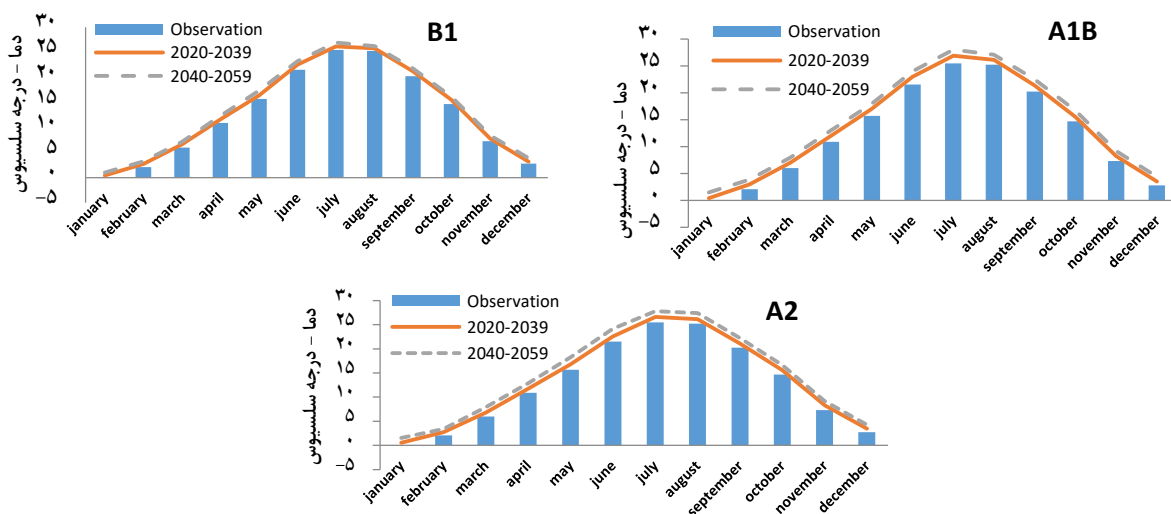
جدول ۳. معیارهای خطا به تفکیک مدل و سناریو برای پارامتر بارش

NSE	R	MAE	RMSE	میانگین		
				۳۹/۵۳		مشاهداتی
۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۷۰	۰/۶۵	۳۱/۰۴	CGCM3T47	A1B
-۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۵۵	۰/۹۳	۳۶/۰۰	CNRMCM3	
۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۷۰	۰/۸۰	۲۳/۷۳	CSIROMK3.5	
۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۷۸	۰/۷۱	۲۰/۳۹	ECHOM5OM	
۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۸۳	۰/۷۹	۲۰/۱۵	ECHO-G	
۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۷۷	۰/۵۳	۴۸/۲۷	HADCM3	
۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۶۸	۰/۶۶	۳۰/۰۶	HADGEM1	
۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۸۰	۰/۳۷	۳۱/۹۲	مدل ترکیبی	
						بارش
۰/۷۳	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۷۰	۳۱/۱۳	CGCM3T47	
۰/۸۱	۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۶۱	۳۰/۹۲	CNRMCM3	
۰/۸۱	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۷۲	۲۳/۷۷	CSIROMK3.5	
۰/۷۹	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۷۶	۲۰/۰۰	ECHOM5OM	
۰/۸۱	۰/۱۳	۰/۲۴	۰/۸۲	۲۲/۲۴	ECHO-G	
۰/۵۹	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۷۵	۴۵/۸۷	HADCM3	
۰/۷۶	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۶۸	۳۱/۲۰	HADGEM1	
۰/۵۶	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۳	۳۱/۸۵	مدل ترکیبی	
						B1
۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۵۰	۳۱/۴۸	CGCM3T47	
۰/۸۴	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۲۱	۳۳/۳۲	CNRMCM3	
۰/۷۴	۰/۵۴	۰/۱۷	۰/۳۴	۲۰/۱۹	CSIROMK3.5	
۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۴۳	۲۰/۲۱	ECHOM5OM	
۰/۷۴	۰/۵۳	۰/۱۷	۰/۳۹	۲۱/۷۳	ECHO-G	
۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۵۰	۵۱/۶۹	HADCM3	
۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۳۰	۰/۴۰	۳۲/۱۳	مدل ترکیبی	



شکل ۵. مقادیر پیش‌بینی شده بارش آبی تحت هر سناریو
 جدول ۴. تغییرات بارش به تفکیک مدل تحت سناریو A1B

مدل ترکیبی	HADGEM	HADCM3	ECHO-G	ECHOM5OM	CSIROMK3/5	CNRMCM3	CGCCM3	ماه	دوره
-۵/۱	-۱/۳	۱/۷	-۶/۹	-۱۹/۵	-۰/۳	-۱۷/۹	۲/۴	ژانویه	۲۰۲۰-۲۰۳۹
-۸/۱	-۵/۸	-۱۶/۱	۰/۶	۱/۲	-۱۲/۹	-۱۳/۲	۷/۳	فوریه	
-۶/۸	-۵/۴	-۴/۳	۶/۳	-۹/۱	-۲۴/۷	-۱۲/۴	۵/۲	مارس	
-۱۰/۸	-۸/۹	-۱۵/۹	-۲/۸	-۱۵/۶	۲۶/۸	-۳۰/۵	-۱۲/۵	آوریل	
-۰/۶	۰/۳	-۳/۰	-۱/۲	-۱۳/۲	۴/۹	۴/۴	-۱/۸	می	
-۰/۲	-۰/۶	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	۰/۳	۰/۵	-۰/۳	ژوئن	
۰/۱	-۰/۱	-۱/۲	۲/۱	-۲/۵	-۱/۱	-۱/۴	-۰/۵	ژوئیه	
-۰/۱	-۰/۵	-۰/۷	۰/۶	-۰/۷	۰/۹	-۰/۹	۰/۱	آگوست	
-۰/۱	-۰/۷	-۰/۲	-۰/۱	۳/۱	-۱/۰	-۱/۱	-۰/۲	سپتامبر	
۰/۱	-۱۵/۳	۶/۴	۶/۹	۲۷/۲	۴/۴	-۱۰/۸	-۳/۸	اکتبر	
-۴۵/۴	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	۱۰/۸	نوامبر	
-۰/۵	-۹/۷	۱/۲	۴/۶	-۱/۵	۲/۷	-۲/۶	-۲/۵	دسامبر	
-۲/۹	-۱۷/۳	۱۵/۰	-۹/۹	-۱۵/۳	-۲۸/۱	-۷/۶	۰/۵	ژانویه	۲۰۴۰-۲۰۵۹
-۱۰/۲	۹/۳	-۱۲/۹	-۵/۸	-۷/۴	-۳۲/۲	-۰/۲	-۲/۴	فوریه	
-۱۰/۵	-۳۰/۲	-۱/۸	۶/۳	-۳۲/۳	-۱۴/۶	۱۶/۶	-۶/۵	مارس	
-۱۷/۵	-۳۲/۰	-۲۰/۲	-۰/۷	-۱۵/۳	۳۳/۲	-۱۹/۰	-۱۵/۱	آوریل	
-۱/۸	-۴/۰	-۷/۴	-۲/۱	-۱۳/۷	۳/۵	۵/۱	-۰/۸	می	
۱/۸	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	۴/۵	۰/۴	۰/۷	-۰/۵	ژوئن	
-۰/۶	۰/۶	-۱/۷	۰/۱	-۲/۵	-۲/۲	-۰/۵	-۰/۶	ژوئیه	
-۰/۱	-۱/۰	-۰/۸	-۰/۸	۶/۹	-۰/۲	-۰/۴	-۰/۱	آگوست	
-۰/۲	-۰/۲	-۰/۱	-۰/۲	۰/۸	-۰/۸	-۰/۵	-۰/۲	سپتامبر	
۱/۷	-۱۲/۴	-۸/۲	۱/۸	۴۶/۷	۱۲/۶	-۱۰/۶	-۳/۳	اکتبر	
-۴۳/۴	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	۱۹/۲	نوامبر	
-۴/۹	-۲۴/۱	-۱/۳	۱/۶	-۲/۵	-۱۵/۷	-۱۷/۳	۵/۶	دسامبر	



شکل ۶. دماهای پیش‌بینی شده دوره آبی در هر سناریو
 جدول ۵. تغییرات بارش به تفکیک مدل تحت سناریو A2

دوره	ماه	CGCM3	CNRMCM3	CSIROMK3/5	ECHOM5OM	ECHO-G	HADCM3	HADGEM	مدل ترکیبی
۲۰۲۰-۲۰۳۹	ژانویه	۹/۵	۳/۸	۲۴/۷	۱۰/۳	۳/۳	-۶/۷	۱۵/۳	۵/۴
	فوریه	-۰/۱	۴۹/۵	-۳۴/۱	۳/۶	-۴/۷	-۱۳/۲	۰/۲	-۶/۰
	مارس	-۶/۸	۴۲/۴	۷/۸	۱/۷	-۳/۷	۰/۱	-۱۹/۲	-۲/۳
	آوریل	-۴/۱	-۸/۰	۴۷/۷	۱۷/۶	۱/۸	-۸/۸	-۱۶/۰	-۵/۶
	می	-۰/۲	۱۱/۰	۱/۲	-۹/۲	-۴/۴	-۴/۲	-۰/۴	۰/۳
	ژوئن	-۰/۱	۰/۸	۰/۴	۲/۷	-۰/۴	-۰/۵	-۰/۳	۰/۵
	ژوئیه	-۰/۶	-۰/۴	-۰/۹	۱۵/۹	-۰/۳	-۱/۱	-۰/۷	۵/۵
	آگوست	-۰/۲	-۰/۵	-۱/۰	-۱/۲	۰/۸	-۰/۲	۰/۰	-۰/۱
	سپتامبر	۰/۱	-۰/۲	-۱/۴	۱/۵	-۱/۱	-۰/۳	-۱/۱	-۰/۴
	اکتبر	۱/۹	۱۴/۱	-۱۵/۳	۱۳/۳	۴/۱	۷/۸	-۵/۷	۳/۰
	نوامبر	۸/۰	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۹/۴	-۴۹/۹
	دسامبر	۴/۳	۱۲/۸	۲۰/۹	۲۵/۴	-۱۰/۶	-۷/۱	-۱۹/۴	۴/۲
۲۰۵۹	ژانویه	۲/۰	۴/۱	-۶/۴	-۵/۶	-۹/۳	۳/۰	۰/۲	-۱/۷
	فوریه	۰/۵	-۱/۲	-۳۶/۰	-۱۸/۴	-۱۳/۷	۷/۹	-۱۹/۹	-۱۰/۴
	مارس	-۱۱/۸	-۲/۳	-۱۶/۸	-۱۸/۰	-۵/۲	-۹/۱	-۲۸/۴	-۱۳/۵
	آوریل	-۱۹/۷	-۳۰/۷	-۷/۶	۱۸/۶	۵/۸	-۱۴/۷	-۱۶/۵	-۱۲/۶
	می	-۵/۰	۴/۰	۳/۳	-۰/۵	-۵/۰	-۸/۱	-۱۱/۳	-۱/۴
	ژوئن	-۰/۵	۰/۷	۱/۷	-۰/۴	-۰/۹	-۰/۸	-۰/۳	۰/۰
	ژوئیه	-۱/۰	-۰/۴	-۲/۲	۱۱۵۶/۸	۰/۷	-۱/۷	-۱/۳	۶۲/۱
	آگوست	-۰/۲	-۰/۷	-۱/۰	-۱/۱	-۱/۰	-۰/۴	-۰/۸	-۰/۸
	سپتامبر	۰/۳	-۰/۶	-۱/۷	۱/۲	-۰/۷	-۰/۷	-۱/۶	-۰/۶
	اکتبر	-۰/۲	۳/۳	-۲/۳	۲۱/۶	۴/۵	۲/۹	۱/۸	۳/۳
	نوامبر	-۲/۲	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	۲/۱	-۵۰/۸
	دسامبر	۵/۳	۱۱/۹	۳۲/۰	۲/۲	-۱۱/۲	-۵/۰	-۵/۴	۳/۰

جدول ۶. تغییرات بارش به تفکیک مدل تحت سناریو B1

مدل ترکیبی	HADCM3	ECHO-G	ECHOM5OM	CSIROMK3/5	CNRMCM3	CGCCM3	ماه	دوره
۵/۷	۲/۱	۱۰/۲	-۴/۲	۲۴/۸	۲۸/۴	-۳/۴	ژانویه	
۳/۴	-۰/۷	-۳/۸	۱۱/۴	۵۲/۵	-۳/۵	-۳/۵	فوریه	
۲/۷	-۰/۱	۳/۵	۲۰/۵	۳۹/۵	-۱۵/۵	-۸/۳	مارس	
-۶/۶	-۱۰/۷	۷/۵	۱۸/۵	۱۱/۶	-۱۸/۹	-۱۰/۳	آوریل	
-۲/۸	-۳/۹	-۲/۱	-۱۸/۳	۲/۵	۴/۵	-۲/۷	می	
-۰/۸	-۰/۱	-۰/۲	-۱/۳	-۰/۳	۰/۳	-۰/۲	ژوئن	۲۰۲۰-
۰/۵	۰/۶	-۰/۵	۹/۰	۵/۳	۰/۲	-۰/۷	ژوئیه	۲۰۲۹
۰/۵	-۰/۲	۱/۳	۲/۸	-۰/۲	-۰/۵	۰/۱	آگوست	
-۰/۶	-۰/۳	-۰/۶	۰/۰	-۱/۶	-۰/۸	-۰/۶	سپتامبر	
۵/۰	-۴/۱	۷/۰	۱۲/۴	-۵/۷	۶/۰	-۱/۶	اکتبر	
-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	نوامبر	
۰/۵	۱/۶	۴/۹	-۰/۷	-۹/۰	۱۰/۱	-۱/۶	دسامبر	
۰/۴	۲/۲	۲/۸	۷/۶	-۱۱/۳	-۱۰/۵	-۰/۴	ژانویه	
-۷/۳	-۱۲/۴	۴/۱	۱۴/۵	۱۲/۶	-۲۴/۴	-۵/۷	فوریه	
-۸/۰	-۱۲/۴	-۳/۸	-۱۱/۷	۸/۸	-۱۲/۵	-۵/۳	مارس	
-۹/۷	-۲۰/۶	-۱۰/۵	۱/۵	۳۶/۸	-۲۱/۵	-۷/۳	آوریل	
-۱/۲	-۹/۲	-۸/۲	-۱۰/۹	۱۸/۵	-۰/۲	-۱/۹	می	
۳/۳	-۰/۵	-۰/۵	۶/۳	۰/۱	۰/۳	-۰/۴	ژوئن	۲۰۲۰-
-۰/۲	-۱/۲	-۰/۵	-۲/۵	۱۵/۷	-۰/۶	-۱/۲	ژوئیه	۲۰۲۹
-۰/۲	۰/۶	-۰/۱	-۱/۲	-۰/۴	-۰/۴	-۰/۳	آگوست	
۱/۵	۰/۱	-۰/۱	۹/۹	-۱/۷	-۰/۶	-۰/۴	سپتامبر	
۱/۶	-۶/۸	۴/۶	۹/۲	۳۷/۸	-۷/۲	-۸/۶	اکتبر	
-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	-۶۳/۱	نوامبر	
۱/۳	۳/۶	-۳/۲	۳/۷	-۲۳/۱	۱۲/۰	۴/۹	دسامبر	

منظور پیش‌بینی رواناب آینده، بارش و دمای پیش‌بینی شده توسط هر سناریو برای هر دوره آتی به مدل داده شده و رواناب آینده پیش‌بینی شد. رواناب پیش‌بینی شده برای هر دوره تحت هر سناریو در شکل ۸ آمده‌است.

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل و محاسبه معیارهای خطا، مشخص شد که مدل IHACRES از توانایی لازم برای شبیه‌سازی رواناب منطقه در مقیاس روزانه و ماهانه برخوردار است. دقت مدل برای داده‌های روزانه بیش‌تر از داده‌های ماهانه می‌باشد. در گام بعدی به

جدول ۷. تغییرات دما به تفکیک مدل تحت سناریو A1B

مدل ترکیبی	HADGEM	HADCM3	ECHO-G	ECHOM5OM	CSIROMK3/5	CNRMCM	CGCCM3	ماه	دوره
۰/۵	۰/۸	۱/۳	۰/۴	۰/۶	-۰/۱	-۰/۹	۰/۹	ژانویه	۲۰۲۰
۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۰	۰/۹	۰/۹	-۰/۴	۰/۷	فوریه	-
۱/۰	۱/۲	۰/۶	۱/۱	۱/۱	۰/۷	۰/۷	۰/۸	مارس	۲۰۲۹
۱/۱	۱/۴	۰/۶	۰/۷	۱/۳	۰/۲	۲/۰	۱/۱	آوریل	
۱/۳	۱/۸	۱/۳	۰/۶	۱/۰	۰/۴	۱/۵	۱/۳	می	
۰/۲۵	۱/۵	۲/۴	۱/۰	۱/۰	۱/۲	۰/۷	۱/۶	ژوئن	
۰/۲۵	۱/۵	۲/۱	۱/۴	۱/۳	۰/۷	۱/۰	۱/۲	ژوئیه	
۰/۹	۱/۰	۱/۵	۱/۰	۱/۰	۱/۲	۰/۷	۱/۰	آگوست	
۰/۵	۱/۳	۲/۴	۰/۹	۰/۶	۱/۰	۱/۱	۱/۲	سپتامبر	
۰/۹	۱/۰	۰/۷	۰/۸	۰/۴	۱/۰	۱/۳	۰/۹	اکتبر	
۰/۹	۱/۱	۰/۲	۱/۱	۱/۰	۰/۸	۰/۲	۰/۹	نوامبر	
۰/۷	۰/۸	-۰/۱	۰/۷	۰/۹	۱/۰	-۰/۶	۰/۴	دسامبر	
۱/۵	۱/۹	۲/۱	۱/۵	۱/۶	۰/۸	۱/۱	۱/۵	ژانویه	۲۰۳۰
۱/۸	۱/۴	۱/۷	۱/۹	۱/۶	۲/۳	۱/۶	۱/۶	فوریه	-
۲/۰	۲/۲	۱/۹	۲/۱	۲/۱	۲/۰	۱/۰	۱/۸	مارس	۲۰۵۹
۲/۱	۳/۲	۱/۷	۱/۷	۲/۳	۰/۷	۲/۹	۱/۸	آوریل	
۲/۳	۳/۳	۳/۱	۱/۵	۲/۴	۱/۵	۱/۸	۲/۰	می	
۲/۵	۲/۵	۴/۷	۲/۳	۲/۱	۱/۲	۱/۵	۲/۶	ژوئن	
۲/۵	۲/۷	۳/۴	۲/۷	۲/۵	۱/۸	۱/۸	۲/۱	ژوئیه	
۱/۸	۲/۲	۳/۱	۲/۵	۲/۵	۲/۴	۱/۵	۲/۰	آگوست	
۲/۳	۲/۴	۳/۲	۲/۴	۲/۱	۲/۷	۲/۲	۲/۱	سپتامبر	
۲/۰	۲/۱	۱/۷	۲/۱	۱/۷	۲/۵	۲/۱	۱/۸	اکتبر	
۱/۹	۱/۸	۱/۲	۲/۱	۱/۹	۲/۱	۰/۸	۲/۰	نوامبر	
۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱/۷	۱/۹	۰/۳	۱/۰	دسامبر	

IHACRES، جدول ۱۱ مقادیر معیارهای ارزیابی مدل و شکل ۷ سری بلند مدت جریان دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهند. مقایسه حجم جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۱۲ آمده است.

واسنجی و ارزیابی قابلیت مدل IHACRES جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب از کل ۱۳ سال دوره مشاهداتی (۱۹۹۹-۲۰۱۱ میلادی)، از ۸ سال نخست برای واسنجی و ۵ سال دیگر جهت صحت‌سنجی مدل برای منطقه استفاده شد. جدول ۱۰ مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل

جدول ۸. تغییرات دما به تفکیک مدل تحت سناریو A2

مدل ترکیبی	HADGEM	HADCM3	ECHO-G	ECHOM5OM	CSIROMK3/5	CNRMCM3	CGCCM3	ماه	دوره
۰/۶	۱/۲	۰/۲	۰/۵	۰/۶	۰/۸	۱/۱	۰/۴	ژانویه	
۰/۶	۰/۳	۰/۳	۰/۸	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۰/۴	فوریه	
۰/۸	۰/۳	۱/۲	۰/۹	۰/۴	-۰/۲	-۰/۱	۰/۸	مارس	
۰/۹	۱/۳	۰/۹	۱/۱	۰/۴	-۰/۹	۰/۷	۰/۸	آوریل	
۱/۱	۱/۹	۱/۶	۱/۱	۰/۴	۰/۶	۰/۵	۰/۹	می	
۱/۰	۱/۱	۱/۹	۱/۵	۰/۸	۰/۳	۰/۲	۰/۹	ژوئن	-۲۰۲۰
۱/۱	۱/۴	۱/۱	۱/۲	۰/۶	۰/۷	۰/۴	۱/۲	ژوئیه	۲۰۲۹
۰/۹	۱/۴	۰/۸	۰/۹	۰/۶	۱/۶	۰/۸	۱/۱	اگوست	
۰/۹	۱/۶	۱/۳	۱/۰	۱/۰	۰/۵	۰/۷	۰/۹	سپتامبر	
۱/۰	۱/۱	۱/۹	۰/۹	۰/۴	۱/۱	۰/۶	۱/۰	اکتبر	
۱/۰	۱/۱	۰/۹	۰/۸	۰/۶	۱/۴	۱/۱	۱/۰	نوامبر	
۰/۷	۱/۰	۰/۵	۰/۷	۰/۹	۰/۲	۱/۴	۰/۵	دسامبر	
۱/۶	۲/۷	۱/۲	۱/۶	۱/۵	۱/۲	۱/۲	۱/۳	ژانویه	
-۰/۲۵	۱/۶	۰/۸	۱/۴	۱/۵	۱/۵	۰/۵	۱/۳	فوریه	
۱/۹	۱/۴	۱/۲	۲/۱	۱/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۶	مارس	
۲/۰	۲/۰	۱/۱	۱/۶	۱/۳	۱/۰	۳/۰	۲/۴	آوریل	
۲/۶	۳/۶	۲/۶	۲/۱	۱/۸	۱/۸	۲/۲	۲/۷	می	
۲/۶	۲/۷	۳/۴	۲/۸	۱/۹	۰/۵	۱/۰	۳/۱	ژوئن	-۲۰۲۰
۲/۳	۲/۴	۲/۵	۲/۶	۲/۰	۱/۹	۱/۵	۲/۵	ژوئیه	۲۰۲۹
۲/۱	۲/۲	۲/۸	۲/۲	۲/۰	۲/۵	۲/۰	۲/۲	اگوست	
۲/۰	۲/۲	۲/۷	۲/۵	۲/۰	۲/۵	۱/۷	۲/۲	سپتامبر	
۲/۰	۱/۹	۲/۵	۲/۱	۱/۶	۲/۵	۱/۳	۲/۱	اکتبر	
۱/۹	۲/۱	۱/۰	۱/۷	۱/۴	۲/۶	۱/۲	۱/۹	نوامبر	
۱/۵	۱/۷	۰/۳	۱/۵	۱/۹	۱/۳	۱/۲	۱/۰	دسامبر	

نشان می‌دهد طی ماه‌های نوامبر تا فوریه افزایش دبی و در سایر ماه‌ها کاهش دبی اتفاق می‌افتد.

احتمال تواتر دبی با استفاده از زنجیره مارکوف

جدول ۱۳ مشخصات دبی ماهانه طی ۱۳ سال را نشان می‌دهد. در جدول مذکور تعداد ماه‌های پرآب و کم‌آب، میانگین دبی ماهانه، بیشینه دبی مشاهده شده طی دوره، همچنین انحراف معیار و ضریب تغییرات دبی ماهانه طی دوره مشاهداتی (۱۹۹۹-۲۰۱۱) و دو دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۵۹) تحت سه سناریو A1B و A2 و B1، محاسبه و ارائه شده است.

در دوره ۲۰۲۰ - ۲۰۳۹، تحت سناریو A1B، در ماه‌های ژانویه و نوامبر افزایش دبی به میزان ۰/۲۵ و ۰/۰۷ مترمکعب در ثانیه پیش‌بینی می‌شود اما در سایر ماه‌ها دبی پیش‌بینی شده کاهش خواهد بود به طوری که بیش‌ترین کاهش دبی مربوط به ماه آوریل به میزان ۱/۷۲ مترمکعب در ثانیه و کم‌ترین کاهش مربوط به ماه‌های اکتبر و دسامبر به میزان ۰/۰۲ مترمکعب در ثانیه است. در سناریو A2، طی ماه‌های نوامبر تا فوریه افزایش دبی و در سایر ماه‌ها کاهش دبی مورد انتظار است. پیش‌بینی سناریو B1 نیز

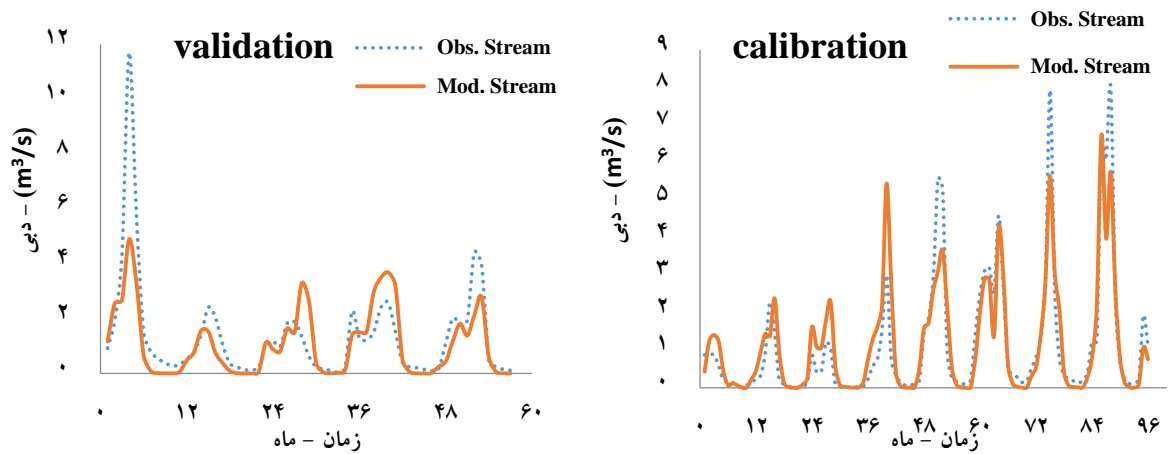
جدول ۹. تغییرات دما به تفکیک مدل تحت سناریو B1

مدل ترکیبی	HADCM3	ECHO-G	ECHOM5OM	CSIROMK3/5	CNRMCM3	CGCCM3	ماه	دوره
۰/۵	-۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۷	۰/۶	۰/۷	ژانویه	
۰/۶	۱/۰	۰/۷	-۰/۱	۰/۴	۰/۳	۰/۶	فوریه	
۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۲	۰/۰	۰/۹	۰/۷	مارس	
۰/۷	۰/۲	۰/۶	۰/۸	-۰/۳	۱/۲	۰/۷	آوریل	
۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۱	۱/۲	می	
۱/۰	۲/۴	۰/۷	۱/۰	۰/۳	۰/۱	۱/۲	ژوئن	-۲۰۲۰
۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۶	۱/۱	۰/۳	۰/۹	ژوئیه	۲۰۲۹
۰/۵	۱/۴	۰/۹	۰/۷	۱/۴	۰/۵	۱/۰	آگوست	
۱/۰	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۱/۱	۱/۰	۱/۲	سپتامبر	
۰/۸	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۱/۲	۱/۱	۰/۵	اکتبر	
۰/۵	-۱/۰	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	نوامبر	
۰/۴	-۰/۴	۰/۷	۰/۱	-۰/۱	۰/۶	۰/۲	دسامبر	
۱/۱	۰/۱	۱/۴	۰/۶	۱/۳	-۰/۴	۰/۸	ژانویه	
۱/۲	۱/۱	۱/۲	۰/۵	۱/۰	۰/۸	۱/۲	فوریه	
۱/۲	۱/۳	۱/۲	۰/۸	۰/۸	۱/۰	۱/۲	مارس	
۱/۴	۱/۲	۱/۷	۱/۳	-۰/۱	۱/۲	۱/۴	آوریل	
۱/۶	۲/۶	۲/۲	۱/۵	۰/۷	۱/۱	۱/۴	می	
۱/۷	۳/۹	۱/۹	۱/۵	۰/۴	۰/۵	۱/۹	ژوئن	-۲۰۲۰
۱/۴	۲/۴	۱/۹	۱/۳	۱/۳	۰/۲	۱/۶	ژوئیه	۲۰۵۹
۱/۰	۲/۰	۱/۹	۱/۵	۱/۸	۰/۹	۱/۵	آگوست	
۱/۶	۰/۴	۱/۸	۱/۶	۲/۲	۱/۵	۱/۷	سپتامبر	
۱/۵	۱/۱	۱/۵	۱/۶	۲/۲	۱/۲	۱/۲	اکتبر	
۱/۲	۰/۰	۱/۶	۰/۹	۱/۲	۰/۸	۰/۹	نوامبر	
۱/۱	۰/۵	۱/۲	۱/۴	۱/۰	۰/۴	۰/۳	دسامبر	

طبق جدول ۱۳، میانگین دبی ماهانه طی دوره‌های آتی نسبت به حالت پایه کاهش خواهد یافت، غیر از پیش‌بینی سناریو A2 که افزایش ۵ درصدی میانگین دبی سالانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل IHACRES

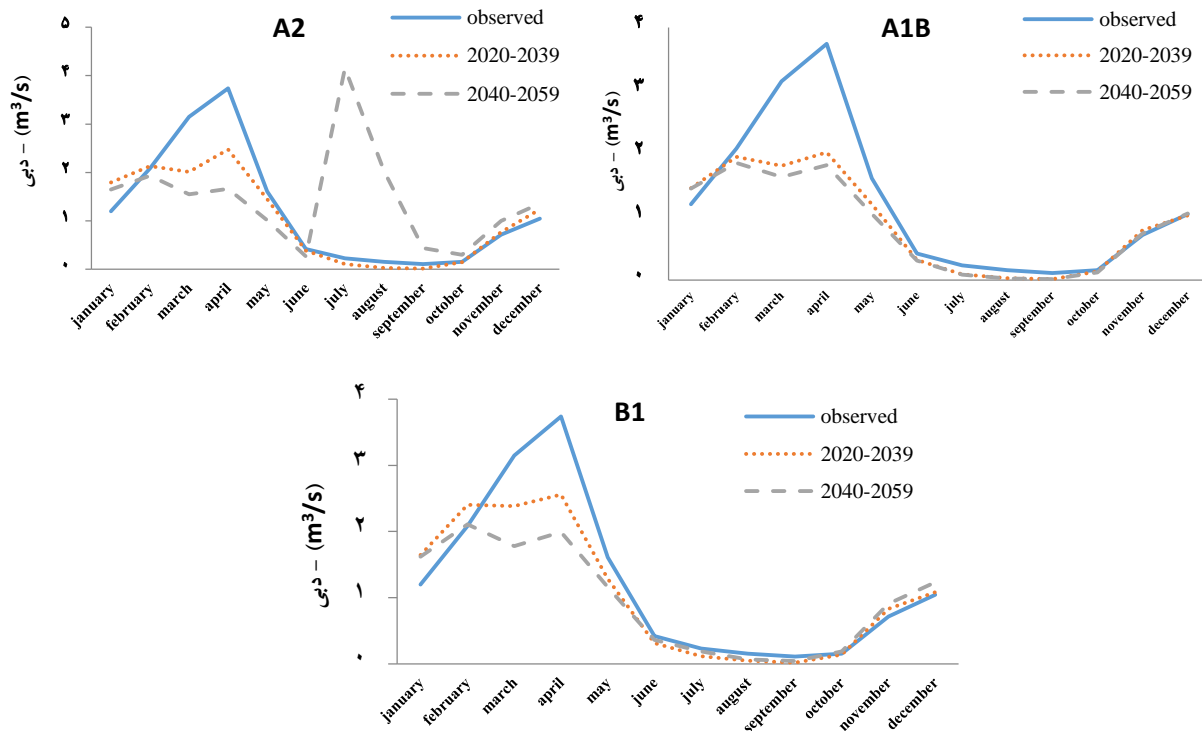
T(w)	f	R	L	P
۵۵	۰	۲۰	۰	۱



شکل ۷. مقایسه رواناب مشاهداتی متوسط حوضه با رواناب محاسباتی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

جدول ۱۱. مقادیر معیارهای ارزیابی مدل

دوره	پایه زمانی	RMSE	R	MAE	NSE
واسنجی	روزانه	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۳۶	۰/۶۸
	ماهانه	۰/۷۳	۰/۹۰	۰/۴۵	۰/۹۹
	سالانه	۰/۳۴	۰/۸۱	۰/۳۰	۰/۷۳
صحت‌سنجی	روزانه	۰/۸۹	۰/۷۲	۰/۲۷	۰/۵۰
	ماهانه	۱/۱۹	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۹۹
	سالانه	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۶۵



شکل ۸. رواناب پیش‌بینی شده برای هر دوره تحت هر سناریو در مدل IHACRES

جدول ۱۲. حجم جریان مشاهداتی و محاسباتی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی (MCM)

	جریان کم >۶۰٪	جریان متوسط ۴۰٪ < ۵۵٪	جریان زیاد <۳۵٪
واسنجی	مشاهداتی	۳۹۸/۵	۶۸۳۵/۴۳
	شبیه‌سازی شده	۱۸۹/۷۷	۶۵۵۴/۵۵
صحت‌سنجی	مشاهداتی	۳۰۸	۲۴۴۳/۱۲
	شبیه‌سازی شده	۸۴/۵۵	۲۰۴۱/۸۷

ماتریس فوق احتمال تغییر وضعیت و انتقال حالت را نشان می‌دهد. برای مثال احتمال انتقال فرایند در یک مرحله از ماه پرآب (W) به ماه پرآب برابر ۰/۲ است یعنی $P(W \rightarrow W) = 0.2$. در صورتی که احتمال انتقال از پرآب به نرمال ($W \rightarrow N$) در یک مرحله برابر ۰/۴ است.

بررسی وضعیت ماتریس احتمال پایا

از ضرب مکرر ماتریس‌های احتمال در ماتریس اولیه، ماتریس احتمال تغییر وضعیت دبی در n ماه یا سال آیند به دست می‌آید؛ که جهت پیش‌بینی کم‌آبی و پرآبی در ماه‌ها یا سال‌های آینده استفاده می‌شود. تغییر حالات بی‌شماری را می‌توان برای زنجیره مارکوف تصور و برآورد نمود. وقتی که ماتریس احتمال تغییر حالت را چندین بار به توان برسانیم در ماتریس تغییر وضعیت، پدیده جالب توجهی رخ می‌دهد. در این حالت همه سطرهاى ماتریس تغییر وضعیت با هم برابر می‌شوند به طوری که اگر به توان رساندن ماتریس تغییر وضعیت را ادامه دهیم، درایه‌ها هیچ‌گونه تغییری نخواهند کرد. برای دبی ایستگاه پیرسلیمان در دوره مشاهداتی ماتریس تغییر وضعیت در مرحله سیزدهم و تا ۴ رقم اعشار به این شرایط رسید.

$$P^{13} = \begin{bmatrix} 0.0380 & 0.0697 & 0.8923 \\ 0.0380 & 0.0697 & 0.8923 \\ 0.0380 & 0.0697 & 0.8923 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در هر دو دوره آتی بیش‌ترین کاهش میانگین مربوط به پیش‌بینی سناریو A1B به ترتیب به میزان ۳۱ و ۳۹ درصد می‌باشد. تعداد ماه‌های پرآب در سناریوهای A2 و B1 در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹ به ترتیب افزایش ۵ و ۳ درصدی داشته و در سایر سناریوها کاهش خواهد یافت. تعداد ماه‌های کم‌آب نیز در هر دوره تحت هر سه سناریو کاهش خواهد یافت بجز در سناریو A2 دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ که تعداد ماه‌های کم‌آب به شدت افزایش می‌یابد. تعداد ماه‌های نرمال تحت هر سه سناریو در هر دو دوره افزایش خواهد یافت غیر از سناریو A2 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ که تعداد ماه‌های نرمال کاهش شدیدی دارد.

وضعیت احتمالی دوره‌های پرآبی و کم‌آبی

با فرض سه حالتی بودن ماتریس فراوانی، وضعیت دبی ماهانه ایستگاه پیرسلیمان در دوره مشاهداتی به صورت جدول ۱۴ مرتب شده است. اعداد بالایی مقادیر مشاهده شده (O) و اعداد داخل پرانتز مقادیر مورد انتظار (E) است.

با توجه به تعداد تغییر وضعیت‌ها به حالت‌های دیگر و نیز با عنایت به تعریف احتمال، ماتریس احتمال تغییر حالت از ماتریس فراوانی به شرح زیر حاصل شد.

$$P = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.18 & 0.27 & 0.55 \\ 0.02 & 0.04 & 0.94 \end{bmatrix} \quad (16)$$

جدول ۱۳. مشخصات آماری دبی ماهانه ایستگاه پیرسلیمان طی دوره‌های مختلف آماری

دوره	سناریو	میانگین دبی ماهانه طی دوره (m3/s)	تعداد ماه‌های پرآب	تعداد ماه‌های نرمال	تعداد ماه‌های کم‌آب	بیشینه دبی ماهانه طی دوره (m3/s)	کمینه دبی ماهانه طی دوره (m3/s)	انحراف معیار دبی ماهانه طی دوره (m3/s)	ضریب تغییرات دبی ماهانه طی دوره (m3/s)
مشاهداتی	پایه	۱/۲۳	۵	۱۱	۱۳۷	۹/۲۹	۰/۰۱	۱/۷۳	۱/۴۱
-۲۰۲۰	A1B	۰/۹۲	۶	۵۶	۱۷۸	۴/۳۷	۰	۰/۸۸	۰/۹۵
۲۰۳۹	A2	۱/۰۷	۲۰	۷۷	۱۴۳	۳/۸۵	۰	۰/۹۸	۰/۹۲
	B1	۱/۰۷	۱۵	۶۵	۱۶۰	۴/۲۱	۰	۱/۰۱	۰/۹۵
-۲۰۴۰	A1B	۰/۸۴	۴	۵۷	۱۷۹	۴/۱۴	۰	۰/۷۶	۰/۹۱
۲۰۵۹	A2	۱/۲۸	۱	۱	۲۳۸	۵۳/۱۷	۰	۳/۸۴	۳
	B1	۰/۹۴	۶	۸۴	۱۵۰	۳/۸۶	۰	۰/۸۴	۰/۸۹

کم‌آب دیگر حدود ۸۹/۲۳ درصد می‌باشد. در جدول (۱۵) ماتریس فراوانی، ماتریس احتمال و ماتریس احتمال پایا سالانه برای دوره مشاهداتی و دوره‌های آتی تحت سه سناریو محاسبه و ارائه گردیده است.

چنانچه ملاحظه می‌شود در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹، بیش‌ترین میزان احتمال وقوع ماه‌های پرآب متوالی مربوط به پیش‌بینی سناریو A2 حدود ۳۵ درصد و کم‌ترین میزان احتمال وقوع چنین وضعیتی متعلق به پیش‌بینی سناریو B1 با احتمال حدود ۲۷ درصد است. همچنین بیش‌ترین احتمال وقوع یک ماه پرآب بعد از یک ماه کم‌آب مربوط به پیش‌بینی سناریو B1 در حدود ۲ درصد است.

بنابراین با توجه به ماتریس احتمال پایای فوق، احتمال وقوع ماه پرآب بعد از ماه پرآب دیگر حدود ۳/۸ درصد، احتمال وقوع ماه نرمال بعد از ماه پرآب ۶/۹۷ درصد، احتمال وقوع کم‌آبی بعد از یک ماه پرآب حدود ۸۹/۲۳ درصد می‌باشد.

همچنین، احتمال وقوع ماه پرآب بعد از ماه نرمال حدود ۳/۸ درصد و نیز، احتمال وقوع ماه نرمال بعد از ماه نرمال دیگر حدود ۶/۹۷ درصد و احتمال وقوع ماه کم‌آب پس از ماه نرمال حدود ۸۹/۲۳ درصد است. و نیز احتمال وقوع ماه پرآب بعد از ماه کم‌آب حدود ۳/۸ درصد و نیز، احتمال وقوع ماه نرمال بعد از ماه کم‌آب حدود ۶/۹۷ درصد و احتمال وقوع ماه کم‌آب پس از ماه

جدول ۱۴. جدول دو بعدی مقادیر مشاهداتی و مورد انتظار ماتریس فراوانی دو حالت ایستگاه پیرسلیمان در دوره مشاهداتی

تغییر وضعیت زنجیره مارکوف دو حالت	پرآب W	نرمال N	کم‌آب D	∑
پرآب W	۱ (۰/۱۶۴)	۲ (۰/۳۶۲)	۲ (۴/۴۷۴)	۵
نرمال N	۲ (۰/۳۶۲)	۳ (۰/۷۹۶)	۶ (۹/۸۴۲)	۱۱
کم‌آب D	۲ (۴/۴۷۴)	۶ (۹/۸۴۲)	۱۲۸ (۱۲۱/۶۸۴)	۱۳۶
∑	۵	۱۱	۱۳۶	۱۵۲

جدول ۱۵. ماتریس فراوانی، ماتریس احتمال و ماتریس پایای دوره‌های مختلف ایستگاه پیرسلیمان					
دوره	سناریو	ماتریس فراوانی	ماتریس احتمال	ماتریس احتمال پایا	
مشاهداتی	پایه	$F = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 6 \\ 2 & 6 & 128 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.18 & 0.27 & 0.55 \\ 0.02 & 0.04 & 0.94 \end{bmatrix}$	$P^{13} = [0.0380 \quad 0.0697 \quad 0.8923]$	
	A1B	$F = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 0 \\ 3 & 33 & 20 \\ 1 & 18 & 158 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0.05 & 0.59 & 0.36 \\ 0.01 & 0.1 & 0.89 \end{bmatrix}$	$P^{20} = [0.0281 \quad 0.2275 \quad 0.7444]$	
۲۰۳۹-۲۰۲۰	A2	$F = \begin{bmatrix} 7 & 13 & 0 \\ 12 & 43 & 21 \\ 0 & 21 & 122 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.65 & 0 \\ 0.16 & 0.56 & 0.28 \\ 0 & 0.15 & 0.85 \end{bmatrix}$	$P^{29} = [0.0791 \quad 0.3213 \quad 0.5997]$	
	B1	$F = \begin{bmatrix} 4 & 9 & 2 \\ 8 & 39 & 18 \\ 3 & 16 & 140 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.27 & 0.6 & 0.13 \\ 0.12 & 0.6 & 0.28 \\ 0.02 & 0.1 & 0.88 \end{bmatrix}$	$P^{24} = [0.0615 \quad 0.2615 \quad 0.6769]$	
	A1B	$F = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 2 & 30 & 25 \\ 1 & 23 & 154 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0.03 & 0.53 & 0.44 \\ 0.01 & 0.13 & 0.86 \end{bmatrix}$	$P^{14} = [0.0194 \quad 0.2367 \quad 0.7439]$	
۲۰۵۹-۲۰۴۰	A2	$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 237 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$P^2 = [0 \quad 0 \quad 1]$	
	B1	$F = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 0 \\ 4 & 56 & 23 \\ 0 & 23 & 127 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0.05 & 0.67 & 0.28 \\ 0 & 0.15 & 0.85 \end{bmatrix}$	$P^{22} = [0.2540 \quad 0.3400 \quad 0.6346]$	

پس از بررسی توانایی ۷ مدل AOGCM در شبیه‌سازی بارش و دما در منطقه مشخص شد که مدل‌های مختلف نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند که این موضوع بیانگر وجود عدم قطعیت در خروجی مدل‌های اقلیمی می‌باشد. به منظور کاهش عدم قطعیت، یک مدل ترکیبی بر اساس میانگین وزنی همه مدل‌ها ارائه گردید که دقت بالاتری نسبت به هریک از مدل‌ها دارد. سپس پارامترهای بارش و دما برای دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۲۰ و ۲۰۵۹-۲۰۴۰ تحت سه سناریو A1B و A2 و B1 بر اساس مدل ترکیبی وزنی پیش‌بینی شد.

کم‌ترین میزان احتمال وقوع ماه‌های کم‌آب متوالی مربوط به پیش‌بینی سناریو A2 حدود ۸۵ درصد و بیش‌ترین میزان احتمال وقوع چنین وضعیتی متعلق به پیش‌بینی سناریو A1B با احتمال حدود ۸۹ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود طبق پیش‌بینی هر سه سناریو برای هر دو دوره آبی مورد مطالعه نسبت به دوره مشاهداتی احتمال وقوع پرابی افزایش و احتمال کم‌آبی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی اثر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر احتمال تواتر رواناب ورودی به سد جامیشان

جدول ۱۶. احتمال پایای ماه‌های پراب و کم‌آب همه دوره‌ها برای ایستگاه پیرسلیمان

دوره	مشاهداتی			۲۰۳۹-۲۰۲۰			۲۰۵۹-۲۰۴۰		
	سناریو	پایه	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	
احتمال پرابی		۰/۰۳۸	۰/۰۲۸۱	۰/۰۷۹۱	۰/۰۶۱۵	۰/۰۱۹۴	۰	۰/۰۲۵۴	
احتمال نرمال		۰/۰۶۹۷	۰/۰۲۲۷۵	۰/۰۳۲۱۳	۰/۰۲۶۱۵	۰/۰۲۳۶۷	۰	۰/۰۳۴۰۰	
احتمال کم‌آبی		۰/۰۸۹۲۳	۰/۰۷۴۴۴	۰/۰۵۹۹۷	۰/۰۶۷۶۹	۰/۰۷۴۳۹	۱	۰/۰۶۳۴۶	

نتایج نشان داد در هر دو دوره بارش سالانه تحت هر سه سناریو کاهش یافته و کاهش در دوره دوم شدیدتر از دوره اول است. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹، میزان کاهش بارش سالانه تحت سه سناریو A1B، A2 و B1 به ترتیب ۶/۵، ۳/۷ و ۴/۶ میلی‌متر است. در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹، سناریو A1B، تغییرات بارش از ۶۸/۸- درصد در ماه نوامبر تا ۱۲۰/۸+ درصد در ماه ژوئن را پیش‌بینی می‌کند. بارش طی فصول تابستان و پاییز و زمستان به ترتیب کاهش ۱۴/۹ و ۲۳/۹ و ۱۰/۸ درصدی و در فصل بهار افزایش ۳۰/۱ درصدی خواهد داشت. در این دوره نیز همانند دوره قبل هر سه سناریو کاهش بارش سالانه را پیش‌بینی می‌کنند. میزان کاهش بارش سالانه تحت سه سناریو A1B، A2 و B1 به ترتیب ۷/۴، ۱/۹ و ۶/۸ میزان ۲/۶ و کم‌ترین افزایش به میزان ۱/۴ سانتی‌گراد در ماه فوریه است. تحت سناریو B1، بیش‌ترین افزایش دما در ماه ژوئن به میزان ۱/۷ و کم‌ترین افزایش به ماه اوت به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد تعلق دارد. به‌طور کلی تحت هر سه سناریو A1B و A2 و B1 افزایش دمای سالانه به میزان ۲، ۲ و ۱/۳ درجه سانتی‌گراد است. تحت هر سه سناریو افزایش دمای سالانه طی دوره دوم بیشتر از دوره اول است. به منظور پیش‌بینی رواناب آینده از مدل بارش - رواناب روزانه IHACRES استفاده شد و مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی واسنجی و صحت‌سنجی شد و سپس رواناب آینده تحت سه سناریو و برای دو دوره پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که در هر دو دوره آینده تحت هر سه سناریو رواناب سالانه کاهش یافته به جز سناریو A2 که در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ افزایش دبی سالانه را پیش‌بینی می‌کند. بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش دبی به میزان ۰/۷۷ و ۰/۰۱ به ترتیب متعلق به ماه‌های مارس و اکتبر است. در دوره ۲۰۴۰ - ۲۰۵۹، تحت سناریو A1B، در ماه‌های نوامبر تا ژانویه افزایش دبی به ترتیب به میزان ۰/۰۲، ۰/۰۱ و ۰/۲۵ مترمکعب در ثانیه پیش‌بینی می‌شود

میلی‌متر است. سناریوهای A1B و B1 کاهش بارش شدیدتری را برای دوره دوم نسبت به دوره اول پیش‌بینی می‌کنند اما سناریو A2 کاهش بارش دوره دوم را کمتر از دوره اول نشان می‌دهد. همچنین دمای سالانه نیز در هر دو دوره تحت هر سه سناریو افزایش خواهد یافت. در مجموع هر سه سناریو A1B، A2 و B1 افزایش دمای سالانه به میزان ۱ و ۰/۹ و ۰/۷ درجه سانتی‌گراد را در دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۹ پیش‌بینی می‌کنند. در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ نیز تحت هر سه سناریو در همه ماه‌ها افزایش دما رخ خواهد داد. تحت سناریو A1B بیش‌ترین افزایش دما در ماه‌های ژوئن و ژوئیه به میزان ۲/۵ و کم‌ترین افزایش دما در ماه ژانویه به میزان ۱/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در سناریو A2 بیش‌ترین افزایش در ماه‌های مه و ژوئن به اما در سایر ماه‌ها دبی پیش‌بینی شده کاهشی خواهد بود، در سناریو A2، طی ماه‌های مارس تا ژوئن کاهش دبی در سایر ماه‌ها افزایش دبی مورد انتظار است. فصل بهار کاهش دبی حدود ۵/۸ درصد طی فصول تابستان و پاییز و زمستان افزایش دبی در حدود ۱۱۵۱/۹، ۶۱/۲ و ۵/۸ درصد خواهند داشت. پیش‌بینی سناریو B1 نیز نشان می‌دهد بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش دبی به میزان ۳/۹۶ و ۰/۰۳ به ترتیب متعلق به ماه‌های ژوئیه و ژانویه است. طی فصول تابستان و پاییز کاهش دبی حدود ۱۸/۷ و ۳۳ درصد و در فصول بهار و زمستان افزایش دبی در حدود ۱۳/۷ و ۴/۵ درصد اتفاق خواهد افتاد.

در نهایت به منظور بررسی تواتر دوره‌های پربابی و کم‌آبی از ماتریس احتمال انتقال و روش زنجیره مارکوف استفاده شد و احتمال رخداد ماه‌های پرباب و کم‌آب در دوره مشاهداتی و هر یک از دوره‌های آتی و سناریوهای اقلیمی محاسبه شد.

نتایج روند تغییرات بارش و دما در این پژوهش به نتایج محققانی از جمله کمال و مساح (۱۳۹۰)، که در حوضه آبریز کرمانشاه در زمینه تغییر اقلیم پرداخته‌اند

اگرچه هنوز سناریوی چهارم در تمام دنیا قابل استناد است ولی مقایسه نتایج این سناریو با گزارش پنجم می‌تواند افق جدیدی را در پیش‌بینی‌های اقلیمی ایجاد کند. روش‌های استوکاستیکی نیز می‌تواند برای پیش‌بینی جریان آینده همراه با عدم قطعیت در افق‌های کوتاه مدت موثر باشد.

همخوانی دارد. بررسی دقیق مدل‌ها و نتایج آنها در این پژوهش راهکاری در جهت برنامه‌ریزی بهینه سد در مباحث تخصیص منابع و مصارف است که در ادامه این پژوهش به آن پرداخته شده است. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی جهت پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی از مدل‌های گزارش پنجم IPCC استفاده گردد.

فهرست منابع

- آشفته، پ.س.، بزرگ حداد، ا. ۱۳۹۴. رویکردی جدید برای ارزیابی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی رواناب. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۲): ۹۵-۱۱۰.
- آشفته، پ.س.، مساح، ع.ر. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر عدم قطعیت مدل‌های چرخه عمومی جو و اقیانوس (AOGCM) و سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای بر رواناب حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوضه قرنقو، آذربایجان شرقی. تحقیقات منابع آب ایران، ۸(۲): ۳۶-۴۷.
- خردادی، م.ج.، علیزاده، ا.، نصیری محلاتی، م.، هوشمند، د. ۱۳۹۲. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی و دوره‌های خشک و تر در صد سال آتی با تلفیق روش‌های وزندهی عکس فاصله و عامل تغییر (مطالعه موردی زیرحوضه تهران کرج). مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۲۱: ۱۷۸-۱۵۵.
- شاه کرمی، ن.، مساح، ع.ر.، مرید، س.، فهمی، ه. ۱۳۸۶. تحلیل عدم قطعیت مدل‌های جفت شده اقیانوس - اتمسفر - گردش عمومی جو بر سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در حوضه زاینده رود. کارگاه فنی اثرات اقلیم در مدیریت منابع آب. قاسمی، ا.، فتاحی، ا.، بابایی، ا. ۱۳۹۲. تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب با رویکرد عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱(۱۳): ۳۷-۵۳.
- کمال، ع.ر.، مساح، ع.ر. ۱۳۹۰. ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM-AR4 و مدل‌های هیدرولوژیکی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره‌سو تحت تاثیر تغییر اقلیم. مجله پژوهش آب ایران، ۵(۹): ۳۹-۵۰.
- مساح، ع.ر.، مرید، س.، محمدزاده، م. و گودس، ک. ۱۳۸۵. بررسی تاثیر عدم قطعیت در توزیع جمعیتی احتمالاتی رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم. دومین کنفرانس منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، بهمن ۱۳۸۵.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Summary for Policymakers Jakeman, A, J., Hornberger, G. M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. Water Resources Research, 29(8): 2637-2649.
- Javid, Y. and Apoorva, K, V.2015. Flow Regionalization Under Limited Data Availability Application of IHACRES in the Western Ghats. Internation Conference On Water Resoures, Coastal And Ocean Engineering (ICWRCOE 2015), Aquatic Procedia 4: 933-941.
- Lane, M.E., Kirshen, P.H and Vogel, R.M. 1999. Indicators of Impact of Global Climate Change on U.S Water Resources, ASCE. Journal Water resources, Planning and Manage, 125(4): 194-204.
- Littlewood, L, G., Clarke, R. T., Collischonn, W, and Croke, B. F.W. 2007. Predicting daily Streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. Environmental Modelling and Software, 22: 1229-1239.
- Meshkin nezhad, S., Mashal, M and Hedayat, N. 2013. Simulation of the climate change impact on runoff in the Dez dam area. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 6(3): 121-126
- Mwangi, J. K., Gathenya, J. M and Ondieki, C. M. 2008. Application of Ihacres Conceptual Rainfall-Runoff Model to Simulate Daily Stream Flow in Upper Tana Basin, Kenya. Journal of Civil Engineering Research and Practice. 5(2): 69-82.

-
- Soojin, M., Hyun, S., and Kang, B. 2015. Future Flow duration Projection of Bayesian Ensemble Model using the IHACRES model. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands July 2015.
- Semenov, Mikhail A., and Stratonovitch, P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate research* 41(1): 1-41.
- Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R and Teng, j. 2010. Climate non-stationary validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394: 447-457.
- Wilby, R.L., Harris, I. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2):1-10.



Assessment of climate change uncertainty and its effects on the probability of the Jamishan dam inflow frequency

Maryam Hafezparast^{1*}, Ali Bafkar² and Elahe Panahi³

¹*) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author email: m.hafezparast@razi.ac.ir

2) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3) M.Sc. Department of water Resource Management, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 22-06-2016

Accepted: 03-11-2016

Abstract

In order to assess the uncertainty of climate change and its effect on the discharge into the Jamishan dam located in the northwestern province of Kermanshah changes in temperature and precipitation parameters in the periods 2020-2039 and 2040-2059 were calculated using a combination of weighted average seven climate model output under three emission scenarios A1B, B1 and A2 respectively, The daily rainfall and temperature forecasts for future periods under each climate scenario was entered to rainfall-runoff calibrated and validated model 'IHACRES' and the daily runoff of future periods under each scenario was predicted. In order to determine periods of high-water and water shortage in the status quo and future periods, using Markov chain transition probability matrix, the Frequency months of wet, normal and drought were calculated. The results showed that in the period 2020-2039, annual rainfall decreases and temperature increases. In the period 2040-2059 the annual temperature changes are most severe between -0.66 and +2 °C. A1B and B1 scenarios show annual rainfall and runoff reduction and increase in the A2 scenario.

Keywords: climate change, IHACRES, Markov chain, uncertainty