

Evaluation of Climate Change Impacts on the Operation Rule Curves of a Dam (Case Study: Dez Dam)

N. Nouri^{1*} and A.R. Massah Bavani²

Abstract

In this study, a methodology is proposed to investigate the hypothesis that states the needs to change dam reservoir rule curves for the future and under climate change conditions. To adapt values of reservoir release to future climatic conditions a model is proposed for evaluation of climate change impacts on reservoir performance. The proposed methodology included LARS-WG model for transformation of CGCM model output under three emission scenarios of A1B, A2, B1 to regional scale, IHACRES model for simulating inflow stream to reservoir for future period of 2017-2030 validated using baseline data (1993-2006), and the evolutionary optimization model of Genetic Algorithms (GA), which is used to optimize reservoir operation. Finally, rule curve of dam operation was calculated for the past and future period according to three emission scenarios of A1B, A2, B1. Applying the proposed methodology in determination of rule curve in Dez Dam located in Khuzestan province showed that despite the modification of rule curve in order to achieve less values of shortages under climate change conditions for the future period, water supply security index would nevertheless decrease. The reduction percent would be between 1.7 to 5.7 percent under scenarios A2, A1B and B1. If the rule curve is not modified, higher values of shortages would occur. Finally, it should be mentioned that ignoring the effects of climate change and using baseline period's operation rules for future period will reduce water supply security percentage.

Keywords: Climate change, Reservoir operation, Genetic Algorithm, Dez dam.

Received: March 8, 2016

Accepted: February 3, 2017

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منحنی فرمان بهره‌برداری سد‌ها (مطالعه موردی سد دز)

نسترن نوری^{۱*} و علی رضا مساح بوانی^۲

چکیده

در این مطالعه، روشی به منظور بررسی فرض نیاز به تغییر در منحنی فرمان مخازن سد‌ها، در دوره آتی و در شرایط رخداد تغییر اقلیم ارائه شده است. بدین منظور، با هدف سازگاری میزان رهاسازی از سد با شرایط اقلیمی آینده، مدلی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد مخزن پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی شامل مدل لارز (LARS-WG) برای تبدیل خروجی‌های مدل گردش عمومی جو (AOGCM) تحت سه سناریوی انتشار A1B, A2, B1 به مقیاس محلی، مدل بارش-رواناب تهیه شده توسط جکمن و هورنبرگر (IHACRES) جهت شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن در دوره آتی (۲۰۱۷-۲۰۳۰) (واستجی شده با آمار دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۰۶)) و مدل بهینه‌سازی فراکوشی الگوریتم ژنتیک (GA) جهت بهینه‌سازی مقدار آب رهاسازی شده از مخزن می‌باشد. در نهایت، منحنی فرمان بهره‌برداری سد برای دوره زمانی گذشته و آینده (در سه سناریوی A1B, A2, B1) محاسبه شده است. نتایج کاربرد متدولوژی پیشنهادی در تعیین منحنی فرمان سد دز در استان خوزستان، نشان داد که علیرغم اصلاح منحنی فرمان با هدف حداقل میزان کمبودها، در شرایط تغییر اقلیم در دوره آتی، شاخص تأمین آب، کاهش می‌یابد که میزان این کاهش حدود ۱/۷ تا ۵/۷ درصد در شرایط رخداد سناریوهای A2, B1 و A1B بوده است. در صورت عدم اصلاح منحنی فرمان، میزان کمبودها به مراتب بیشتر خواهد بود. در نهایت باید گفت که نادیده گرفتن اثر تغییر اقلیم و استفاده از نحوه بهره‌برداری از مخزن دوره پایه برای دوره آینده، موجب کاهش درصد تأمین آب برای تخصیص‌های در نظر گرفته شده خواهد شد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، بهره‌برداری مخزن، الگوریتم ژنتیک، سد دز.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۱۵

1- Civil Engineer MSc., Department of water engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran, Email: n.nouri1986@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aboureihan Campus, University of Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی آب، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

در خصوص بهره‌برداری از مخازن و استخراج قواعد بهینه بهره‌برداری تحت شرایط تغییر اقلیم مطالعات زیادی انجام شده است (Vicuna et al., 2011؛ Georgakakos et al., 2012) و (Majone et al., 2012). در ادامه به چند نمونه از این تحقیقات به طور مختصر اشاره خواهد شد.

(Christensen et al., 2014) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و منابع آب حوضه رودخانه کلرادو با استفاده از مدل مدیریت آب پرداختند که با شبیه‌سازی جریان سیلابی نشان داد که عملکرد سیستم منابع آب تحت اثرات تغییر اقلیم به‌طور میانگین ۷ درصد و در دوره‌های ۱، ۲ و ۳ ساله به ترتیب ۳۶، ۳۲ و ۴۰ درصد کاهش دارد.

در بخشی از تحقیق حاضر نیز به بررسی اثر پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز سد دز پرداخته می‌شود. چرا که برای بررسی تأثیر این پدیده در نحوه بهره‌برداری از مخزن سد و تعیین راهکار سازگاری با آن باید میزان تغییر رواناب ورودی به سد مورد ارزیابی قرار گیرد و تغییرات آن در دوره آینده مشخص گردد. افرادی نیز در زمینه اثر تغییر اقلیم بر عملکرد مخزن تحقیق کرده‌اند، نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم دارای پیامدهای بسیار مهم بر بهره‌برداری سیستم مخزن دارد (Kim et al., 2014). بررسی مطالعات انجام شده نشان دهنده اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن و نیز تأثیر آن بر نحوه عملکرد مخزن در دوره آتی می‌باشد. به طوریکه با کاهش جریان ورودی به مخزن در آینده، میزان عملکرد منحنی فرمان دوره پایه کاهش یافته و عدم ارائه راهکار سازگاری با شرایط جدید موجب ایجاد خسارت و کاهش شاخص‌های تأمین نیاز می‌گردد. (Ashofteh et al., 2015b) با استفاده از برنامه چندمنظوره ژنتیک، مخزن سد آیدوغموش را در استان آذربایجان شرقی، در دو حالت پایه و تحت اثر تغییر اقلیم بهینه‌سازی کردند، نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که قوانین عملکرد مخزن که در تغییر اقلیم نقش دارند منجر به بهبود ۲۹-۳۲ درصدی عملکرد مخازن تحت اثر تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه می‌شوند.

آنچه در مطالعات مختلف به طور مشترک بررسی گردیده، اثر تغییر اقلیم بر عملکرد مخزن و تعیین شاخص‌های مورد نظر در دو دوره زمانی حال و آینده می‌باشد، اما عدم ارائه راهکار سازگاری با تغییر اقلیم در مطالعات دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق پیش رو با استفاده از مدل بهینه‌سازی به روش فراکوشی^۱ (الگوریتم ژنتیک^۲) منحنی فرمان بهینه بهره‌برداری از مخزن سد در هر دو دوره زمانی تعیین می‌گردد و شاخص نهایی عملکرد مدل با

متوسط دمای سطح زمین طی قرن گذشته در حدود ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و انتظار می‌رود این افزایش به افزایش مقادیر تبخیر و تعرق منجر شود و اتمسفر را قادر سازد تا مقادیر بیشتری از بخار آب را جا به جا کند. بنابراین گرم شدن جهانی زمین، ممکن است چرخه هیدرولوژی را تسریع کرده و منابع آب جهانی دوباره توزیع شود. این امر موجب تغییر بیشتر پارامترهای اقلیمی می‌شود (Kamal, 2009).

بررسی‌های IPCC (2007) نشان می‌دهد که اثر تغییر اقلیم و خسارت ناشی از آن، مهمترین عامل مخرب در زمینه مدیریت منابع آب در دسترس است. با توجه به اینکه حتی تغییر کوچکی در متغیرهای هیدرولوژیکی می‌تواند منجر به تغییرات محسوسی در عملکرد سامانه‌های منابع آب شود، راه‌کارهای متعددی جهت کاهش این اثرات نامطلوب و خسارات ناشی از آن ارائه شده است.

مدیریت بهره‌برداری و عملکرد مخازن ذخیره، نقش مهمی در مدیریت منابع آب هر منطقه ایفا می‌کند. با توجه به محدودیت منابع آب، بهره‌برداری از مخازن سدها به دلیل ارزش اقتصادی ناشی از بهره‌برداری بهینه از منابع آب، افزایش نیازهای آبی، و کمبود منابع آب در دسترس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو استفاده از روشی که مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن سدها را فراهم کند، ضروری می‌باشد. قواعد فرمان بهره‌برداری از سدها پرکاربردترین و معمول‌ترین روش برای مدیریت و تدوین قوانین بهره‌برداری از آنها است.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تغییر اقلیم به‌ویژه اثرات آن بر پارامترهای هواشناسی، مقابله و روش‌های سازگاری یا تطبیق با آن صورت گرفته است. اکثر این مطالعات از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات مربوط به مقایسه کارایی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری طی سال‌های اخیر روند افزایشی داشته است. محققان بسیاری به بررسی روش‌های مختلف در توسعه روش‌های کاهش مقیاس پارامترهای جوی به منظور تخمین مقادیر بارش و دما در آینده با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری پرداخته‌اند (Hundecha et al., 2008؛ Wang et al., 2012؛ Mendes et al., 2009). در خصوص تحقیقات داخلی به عمل آمده در موضوع تغییر اقلیم و سازگاری با آن، می‌توان به تحقیقات (Ashofte (2014، Hashemi et al. (2009، 2011) و Hadipour et al. (2014) اشاره نمود.

سد دز بر روی رودخانه دز در ۲۳ کیلومتری شمال شرقی شهرستان اندیمشک احداث گردیده است، با احداث سد دز، دریاچه‌ای به طول ۶۵ کیلومتر به وجود آمده که حدود ۳ میلیارد مترمکعب آب را در خود جای داده است. این سد اولین سد از مجموعه سدهای چندمنظوره می‌باشد که در اسفند ماه ۱۳۴۱ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. قبل از احداث این سد سیلاب‌های مخرب هر ساله خسارات بسیاری بر مناطق پایین‌دست و زمین‌های کشاورزی وارد می‌کرد. هدف اصلی از بهره‌برداری از این سد علاوه بر کنترل سیلاب، تأمین آب کشاورزی دشت دزفول و تولید انرژی برقی می‌باشد. موقعیت و مشخصات سد دز، این سد را تبدیل به یکی از مهمترین سدهای ایران نموده است که نقشه مهمی در مدیریت و بهره‌برداری از یکی از پرآب‌ترین رودخانه‌های کشور را فراهم نموده است. این سد حساسیت بالایی نزد مدیران وزارت نیرو داشته و از این رو چشم‌انداز این سد در آینده و چگونگی تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت این سد از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. لذا، مطالعه بر روی نحوه تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی مخزن سد دز و همچنین تأثیر آب بر تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست امری ضروری می‌نماید.

۲-۱- آمار و اطلاعات مورد نیاز

در این مقاله در ابتدا آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مناسب در منطقه جمع‌آوری شد، از بین ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود منطقه، ایستگاه‌های، رحیم آباد سیلاخور، آب باریک الیگودرز، سپیددشت سزار، چرخ و فلک، زردفهره، کشور و ونایی در داخل حوضه با طول دوره آماری ۲۰۰۶-۱۹۹۳ و ارتفاع

خروجی مرحله بهینه‌سازی در تأمین تخصیص در نظر گرفته شده است. همچنین در هیچ یک از مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده است از ۱۵ مدل گردش عمومی جو^۳ (AOGCM) استفاده نشده است که در این مطالعه تحت سه سناریو B1، A1B و A2 متغیرهای اقلیمی منطقه از ۱۵ مدل AOGCM استخراج گردیده است. سد مورد مطالعه جهت تأمین نیاز شرب، کشاورزی، صنعت، ماهیگیری و زیست‌محیطی احداث گردیده و تولید برقی و کنترل سیلاب در آن لحاظ نشده است. همچنین در این مطالعه از خروجی‌های روزانه مدل‌های AOGCM استفاده شده است. دما و بارش آینده شبیه‌سازی شده، برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب تحت شرایط تغییر اقلیم، در رابطه با مدل‌های هیدرولوژیکی مناسب و مدل‌های بهینه‌سازی جدید استفاده می‌شود.

۲-۲- مشخصات حوزه آبریز

حوزه آبریز دز بخشی از ارتفاعات زاگرس میانی را در بر می‌گیرد و از لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، جزئی از حوزه آبریز خلیج فارس می‌باشد. این حوزه در محدوده بین ۳۲°،۳۵' تا ۳۴°،۰۷' عرض جغرافیایی شمالی و ۴۸°،۲۰' تا ۵۰°،۲۰' طول جغرافیایی شرقی در جنوب غربی ایران واقع شده است. حوزه دز از غرب به حوزه کرخه از شمال به حوزه قره‌چای و زاینده‌رود و از شرق و جنوب به حوزه کارون محدود است. شکل ۱ حوضه آبریز و ساختگاه سد دز و نقشه مدل رقومی ارتفاع^۴ (DEM) حوضه بالادست آن را نشان می‌دهد.

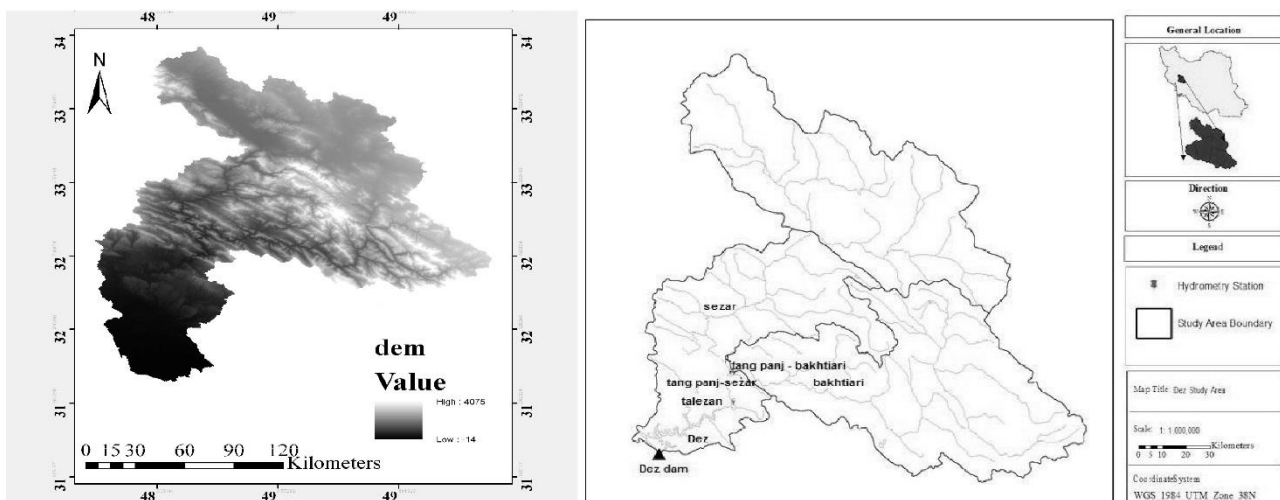


Fig. 1- Dez Dam basin and site and its DEM map
شکل ۱- حوزه آبریز و ساختگاه سد دز و نقشه DEM

سناریوها استفاده می‌شود تا وضعیت آبی مخزن سد در تحت تأثیر تغییر اقلیم در حالت‌های خوشبینانه، متوسط و بدبینانه بدست بیاید. در این تحقیق پس از تهیه آمار و اطلاعات مورد نیاز، ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل‌های AOGCM به مقیاس محلی با استفاده از مدل LARS-WG انجام شد. سپس مدل بارش- رواناب IHACRES با استفاده از اطلاعات دما، بارش، رواناب روزانه در دوره پایه واسنجی و صحت‌سنجی شد. در ادامه با استفاده از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل AOGCM تحت سه سناریوی انتشار مورد نظر و مدل بارش- رواناب صحت‌سنجی، رواناب ورودی به مخزن سد در دوره آبی شبیه‌سازی شد. در نهایت، از مدل فراکوشی الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد در دو حالت ۱- بر اساس آمار تاریخی موجود (دوره پایه) و ۲- شرایط رخداد تغییر اقلیم در دوره آبی استفاده شد. در این مرحله منحنی فرمان برای دو دوره زمانی پایه و آبی، تحت سه سناریو A2, A1B و B1 تهیه و در پایان شاخص تأمین آب محاسبه گردید.

۳-۱- تولید سناریوهای دما و بارش منطقه در دوره‌های آبی

به منظور بررسی سیستم‌های جوی و تغییرات آنها در مقیاس جهانی از مدل‌های پیچیده‌ای تحت عنوان مدل‌های گردش عمومی (GCM) استفاده می‌شود. این مدل‌ها رفتار فیزیکی سیستم زمین، جو و اقیانوس را به شکل ریاضی شبیه‌سازی می‌نمایند. نتایج حاصل از بررسی مدل‌های GCM نشان می‌دهد که این مدل‌ها با وجود محدودیت‌هایی از جمله استفاده از پارامترهای هیدرولوژیکی اندک جهت ساده نمودن مدل، توزیع ناهمگون مکانی شبکه اطلاعاتی و

متوسط ۲۰۵۸ متر و برای دما، ایستگاه خرم‌آباد، از خارج از حوضه با مختصات $48^{\circ}28'$ و $33^{\circ}43'$ برای سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۳ به عنوان ایستگاه‌های منتخب انتخاب شدند، در نهایت با توجه به دوره آماری که برای ایستگاه‌های بارش و دما موجود است، برای ایستگاه هیدرومتری تله زنگ داده‌های مشترک، مربوط به سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۳ انتخاب شد، همچنین برای ایستگاه‌های باران‌سنجی، با استفاده از روش تیسسن‌بندی در سامانه اطلاعات جغرافیایی^۵ (GIS) میانگین بارش حوضه برای داده‌های روزانه سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۳ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه‌های هیدرومتری، سینوپتیک، باران‌سنجی منتخب حوضه و همچنین نقشه تیسسن‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب حوضه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- روش تحقیق

هیئت بین‌دول تغییر اقلیم^۶ (IPCC) در گزارش چهارم خود، سناریوهای انتشاری برای مطالعات تغییر اقلیم منتشر نمود که مبتنی بر شرایط مختلفی را از قبیل اجتماعی، اقتصادی، تکنولوژی و محیط‌زیستی می‌باشد. بر همین اساس، IPCC چهار عنوان اصلی A1، A2، B1 و B2 را برای توصیف رابطه میان انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در هوا و اثرات آنها بر روی نواحی مختلف جهان در طول قرن ۲۱ تعریف نمود.

به طور کلی از سناریو A2 می‌توان به عنوان یک سناریو بدبینانه، و سناریو B1 یک سناریو خوشبینانه نام برد. همچنین سناریو A1B نیز یک سناریو با شدت متوسط است. از این رو در این مطالعه از این

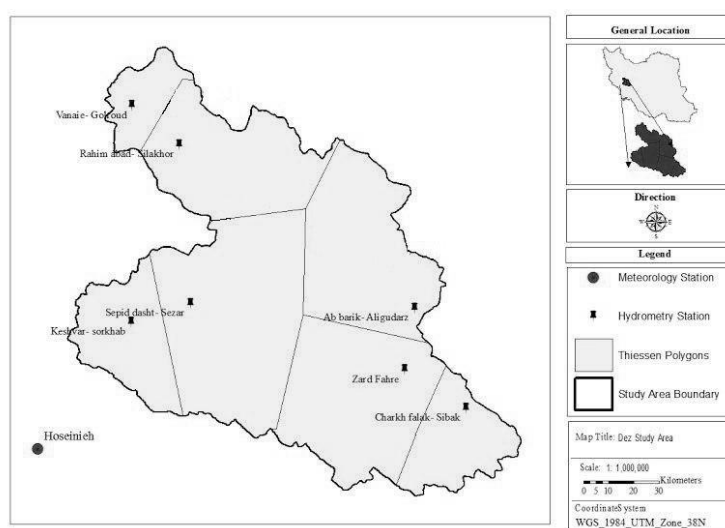


Fig. 2- Thiessen polygons for rain gauge stations of Dez basin
شکل ۲- تیسسن‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب حوضه دز

ماکزیمیم نزدیک به یک تعیین شده‌اند، مقادیر باقیمانده P_i به طور هموار روی مقیاس احتمال توزیع شده است.

برای بارندگی، سه مقدار نزدیک به یک استفاده شده‌اند: $P_{n-1}=0/999$ ، $P_{n-2}=0/995$ و $P_{n-3}=0/985$. این مقادیر اجازه تقریب بهتر از حوادث بارندگی روزانه فوق‌العاده زیاد که با احتمال خیلی پایین اتفاق می‌افتد را می‌دهند، به عنوان مثال بارندگی در مدت فعالیت هاریکن‌ها از آنجا که احتمال بارندگی خیلی پایین روزانه (کمتر از ۱ میلی‌متر) معمولاً نسبتاً بالاست و چنین بارندگی پایین تأثیر خیلی کمی در روش مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی دارد، از دو مقدار $v_1=0/5$ mm و $v_1=1$ mm برای تقریب بارندگی درون بازه $[0, 1]$ منطبق با احتمالات محاسبه شده و $i=1, 2$ ، $P_i = P(v_{obs} \leq v_i)$ استفاده می‌شود. برای محاسبه دوره‌های به شدت خشک و تر دو مقدار نزدیک به یک $P_{n-1}=0/99$ ، $P_{n-2}=0/98$ استفاده می‌شود. برای دمای حداقل و حداکثر دو مقدار نزدیک به صفر دو مقدار نزدیک به یک $(P_2=0/01)$ ، $(P_3=0/02)$ ، $(P_{n-1}=0/99)$ ، $(P_{n-2}=0/98)$ برای محاسبه دماهای به شدت بالا و پایین استفاده می‌شود (Semenov, 2010).

۲-۳- مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب حوزه آبریز

به این منظور در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی موثر u_k تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی (X_k) در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (آشفتنه و همکاران ۲۰۱۳). در شکل ۳ چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب توسط این مدل نشان داده شده است.

مدل IHACRES برای شبیه‌سازی به اطلاعات محدودی نیاز دارد. شکل ۳ چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب را در این مدل نشان می‌دهد که در آن؛ r_k نشان دهنده بارش، t_k دما، u_k بارش موثر و X_k رواناب تخمینی است. ضریب تعیین (R^2) در این مطالعه برای اندازه‌گیری کیفیت پیش‌بینی توسط مدل IHACRES انتخاب شده است.

داده‌ها که به عنوان ورودی مدل به کار گرفته می‌شود و بالاخره درشت مقیاس بودن نتایج مدل، تا حد زیادی وضعیت اقلیمی حال و آینده را شبیه‌سازی می‌نمایند (IPCC, 2007). یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی AOGCM، کم بودن درجه تفکیک آنها (Resolution)، و در واقع بزرگ مقیاس بودن مکانی سلول محاسباتی آنها نسبت به منطقه مورد بررسی است که ریز مقیاس‌نمایی آنها را با استفاده از روش‌های مناسب ضروری می‌سازند (Massah Bavani et al., 2010).

یکی از روش‌های ریز مقیاس‌نمایی استفاده از مدل LARS-WG است. این مدل، سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند. یک مولد آب و هوای تصادفی از آب و هوای روزانه مشاهده شده یک ایستگاه برای محاسبه یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی، به علاوه ارتباط بین آنها استفاده می‌کند. LARS-WG یک مولد آب و هوای تصادفی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود. اولین نسخه LARS-WG در بوداپست در سال ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از ارزیابی ریسک کشاورزی در مجارستان توسعه یافته بود سپس در سال ۱۹۹۸ توسط سمونوف بازنگری و تعدیل شد. LARS-WG از یک توزیع نیمه‌تجربی^۸ (SED) برای تقریب زدن توزیع‌های احتمال دوره‌های خشک‌تر، بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشید روزانه استفاده می‌کند. SED همچون تابع توزیع احتمال تجمعی^۹ (PDF) تعریف شده است. تعداد طبقات استفاده شده در SED برابر ۲۳ می‌باشد که در مقایسه با $n=10$ که در نسخه قبلی استفاده شده بود، نمایش صحیح‌تری از توزیع مشاهده شده ارائه می‌دهد. برای هر متغیر اقلیمی V ، مقدار $V(i)$ منطبق با احتمال $P(i)$ به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$V_i = \min \{V_i P(V_{obs} \leq V) \geq P_i \quad ; i=0, \dots, n \quad (1)$$

در اینجا P_0 احتمال بر پایه داده‌های مشاهده شده $\{V_{obs}\}$ را مشخص می‌کند. برای هر متغیر اقلیمی، دو مقدار P_n و P_0 برابر، با مقادیر متناظر $v_0 = \min\{v_{obs}\}$ و $v_n = \max\{v_{obs}\}$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند. برای تقریب به دقت مقادیر حدی متغیرهای اقلیمی، بعضی P_i ها برای مقادیر مینیمم متغیر نزدیک به صفر و برای مقادیر

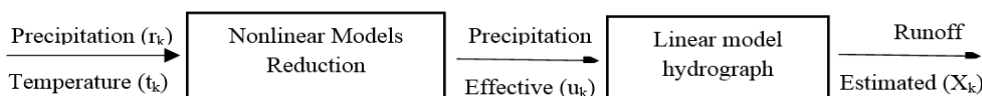


Fig. 3- How to simulate rainfall-runoff with linear and nonlinear models
شکل ۳- چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب همراه با مدول‌های خطی و غیر خطی

ضریب تعیین یک شاخص نرمال شده است که میزان عملکرد مدل را نشان می‌دهد (Anderson and Sclove, 1978) که توسط معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (X_{sm} - \mu_{sm})(X_{om} - \mu_{om})}{\sigma_{sm} \sigma_{om}} \quad (2)$$

که در آن X_{sm} و X_{om} به ترتیب داده مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است و μ_{sm} و μ_{om} به ترتیب میانگین داده مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و σ_{sm} و σ_{om} به ترتیب انحراف معیار داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و n تعداد داده است.

۳-۳- بهره‌برداری از مخزن

محدودیت منابع آبی و افزایش روزافزون نیازهای آبی در زمینه‌های شرب، کشاورزی، صنعت، تولید برق، مسائل زیست‌محیطی و نیز تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر منابع طبیعی ایجاب می‌نماید که مطالعات برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به منظور ذخیره‌سازی و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها به نحو مطلوب صورت پذیرد.

۳-۳-۱- منحنی فرمان بهره‌برداری از سد دز

منحنی فرمان بهره‌برداری، منحنی یا دسته منحنی‌های نشان دهنده بهترین وضعیت بهره‌برداری از مخزن در شرایط ویژه از قبل تعیین شده هستند. منحنی‌های فرمان در قالب دستورالعمل‌های بهره‌برداری ارائه می‌شوند. دستورالعمل‌های بهره‌برداری به مجموعه توصیه‌ها و دستورالعمل‌هایی اطلاق می‌شود که نحوه بهره‌برداری از سد را برای افراد مسئول مشخص می‌سازند، درحالی‌که منحنی‌های فرمان یک چهارچوب پیش‌بینی شده هستند که نحوه بهره‌برداری از مخزن را مشخص و در حقیقت سیاست کلی استفاده از مخزن را بر اساس روش‌های علمی بیان می‌نمایند.

هر مسأله بهینه‌سازی نیازمند به یک یا چند تابع هدف است. انتخاب تابع هدف با توجه به هدف بهره‌برداری و روش حل مسأله بستگی دارد. در اینجا چون روش مورد استفاده محدودیت خطی بودن ندارد، تابع هدف به صورت کمینه‌کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار نیاز و مقدار رهاسازی شده از مخزن، به بیشینه نیاز در طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته شد، که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^T \left(\frac{De_t - Re_t}{De_m} \right)^2 \quad (3)$$

که در این رابطه، F تابع هدف، De مقدار نیاز پایین دست سد،

De_{max} = بیشترین مقدار نیاز در طول دوره بهره‌برداری و Re = مقدار خروجی از مخزن در طول دوره بهره‌داری (T) است. شبیه‌سازی مخزن عبارتست از تعیین حجم ذخیره مخزن در هر دوره بر اساس دبی ورودی به مخزن، رهاسازی و تلفات که با توجه به شرایط آب و هوایی و زمین‌شناسی محل رخ می‌دهد. شبیه‌سازی مخزن بر اساس رابطه پیوستگی، رابطه (۴)، انجام می‌گیرد.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t - Sp_t - Loss_t \quad (4)$$

که در این رابطه، t = شماره دوره مورد نظر، S_t و S_{t+1} = به ترتیب حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ، Q_t = حجم جریان ورودی رودخانه به مخزن در طول دوره t ، Re_t = حجم رهاسازی از مخزن در طول دوره t ، Sp_t = حجم سرریز از مخزن در طول دوره t و $Loss_t$ = مقدار تلفات تبخیر در طول دوره t ، می‌باشند.

به منظور محاسبه تلفات تبخیر از مخزن، از رابطه (۵) استفاده می‌شود. سطح آزاد آب دریاچه در هر دوره زمانی به عنوان تابعی از حجم ذخیره در همان دوره در نظر گرفته می‌شود که از منحنی حجم-سطح مخزن به دست می‌آید. در این مطالعه رابطه حجم سطح به صورت یک تابع توانی درجه چهار بیان شده است.

$$Loss_t = Ev_t \times \bar{A}_t \quad (5)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (6)$$

$$A_t = a_0 + a_1 S_t + a_2 S_t^2 + a_3 S_t^3 + a_4 S_t^4 \quad (7)$$

در این رابطه‌ها، Ev_t = تبخیر از سطح مخزن در طول دوره t ، S_{max} = متوسط سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره t و A_{t+1} و A_t به ترتیب سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره t سطح می‌باشند. سرریز از مخزن قیدهایی را در محاسبات اعمال می‌کند، به طوری که:

$$(8)$$

$$SP_t = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - Re_t > S_{max} \\ 0 & \text{if } S_t + Q_t - Re_t \leq S_{max} \end{cases}$$

سایر قیدهها نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (9)$$

$$Re_{min} \leq Re_t \leq Re_{max} \quad (10)$$

۳-۳-۲- الگوریتم ژنتیک GA

الگوریتم ژنتیک (GA) مشهورترین الگوریتم فراکاوشی است که توسط Holland (1975) معرفی گردید. GA کار خود را با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌کند. هر راه‌حل در GA

با توجه به جدول وضعیت عملکرد مدل، در حوزه در دوره واسنجی، R^2 بالای ۰/۷۰ و در دوره صحت‌سنجی، R^2 بالای ۰/۶۵ است. همچنین ایستگاه دارای خطای قابل قبولی می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه در چند مورد مدل نتوانسته پیک رواناب را شبیه‌سازی کند اما عملکرد مدل در حوزه در خوب بوده و به خوبی رواناب را شبیه‌سازی کرده است. هیدروگراف ارائه شده برای ایستگاه نیز این موضوع را تایید می‌کند.

۲-۴- سناریوهای دما و بارش منطقه در دوره‌های آتی:

در شکل‌های ۵ تا ۷ تغییرات دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه در دوره آینده نسبت به دوره گذشته بصورت نمودارهای جعبه‌ای آمده است.

با توجه به نمودار جعبه‌ای داده‌های بارندگی در شکل ۵، کاهش بارندگی در اکثر سناریوها در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ دسامبر و سپتامبر نسبت به دوره‌ی پایه مشهود است و تقریباً هر سه سناریوی مورد بررسی روند یکسانی از تغییرات آینده بارش را دارا می‌باشند.

بیشترین درصد افزایش میانه بارش حوضه مربوط به ماه جون تحت سناریو B1 بوده که مقدار آن برابر ۱۲۰ درصد می‌باشد. علت اینکه این مقدار درصد تغییر زیاد می‌باشد این است که در ماه ژوئن مقادیر بارش در دوره مشاهداتی بسیار کم و نزدیک به صفر بوده است. بنابراین افزایش ۱۲۰ درصدی بارش در میزان بارش کل حوضه تأثیرگذار نخواهد بود.

نمودار جعبه‌ای داده‌های دمای حداقل در شکل ۶ به طور کلی افزایش مقادیر دمای حداقل در دوره‌ی آتی را نسبت به دوره‌ی پایه نشان می‌دهد. آنچه در داده‌های دما قابل توجه است، افزایش دمای کمینه در دوره‌ی آتی برای همه سناریوها نسبت به دوره‌ی پایه است. این در حالیست که در مقادیر بیشینه‌ی دمای دوره‌ی آتی در شکل ۷ افزایش دیده می‌شود. بیشترین میزان افزایش میانه دمای حداقل حوضه مربوط به ماه جولای تحت سناریو B1 و A2 بوده که مقدار آن به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۸ درجه سلسیوس است.

یک کروموزوم نامیده می‌شود و به مجموعه تمام راه‌حل‌ها جمعیت می‌گویند. این کروموزوم‌ها به تعداد ابعاد مسأله دارای ژن هستند، طی فرآیند بهینه‌سازی این ژن‌ها توسط عملگرهای ژنتیکی ترکیب^{۱۰} و جهش^{۱۱} بهبود می‌یابند. از آنجا که هر کروموزوم یک راه‌حل است بنابراین می‌توان برای هر کروموزوم یک تابع هدف محاسبه نمود. پس از آن کروموزوم‌ها بر اساس شایستگی تابع هدف متناظر با آنها، برای انتقال به نسل بعد انتخاب می‌گردند. در تولید هر نسل جدید سه عملگر انتخاب، جهش و ترکیب، فرآیند بهینه‌سازی را به نحوی پیش می‌برند که کروموزوم‌های ایجاد شده، مقدار تابع هدف را در هر تکرار بهتر و بهتر کنند، تا جایی که فرآیند بهینه‌سازی توسط یکی از شرط‌های توقف، پایان یابد.

۴- نتایج و بحث

۱-۴- واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش- رواناب منطقه

در واقع در این مرحله باید بتوان ارتباط بین دما و بارش و رواناب را برقرار نمود، در جدول ۱ نتایج بهترین عملکرد مدل IHACRES در دوره واسنجی و صحت‌سنجی بین دما و بارش مشاهداتی ایستگاه دمای خرم‌آباد و میانگین وزنی بارش حوضه و رواناب مشاهده‌ای حوضه در ایستگاه تله زنگ ارائه شده است. در بهترین عملکرد مدل مقادیر پارامترهای f (فاکتور تعدیل حرارت حوضه) و τ_{in} (مدت زمانی که طول می‌کشد حوضه خشک شود) به ترتیب برابر ۴,۰۰۰ و ۳۰,۰۰۰ می‌باشد. با توجه به مقادیر این جدول مشاهده می‌شود که مدل IHACRES توانسته جریان ورودی به مخزن را به خوبی شبیه‌سازی کند و عملکرد مدل قابل قبول می‌باشد. در این جدول BIAS خطای کل در حجم جریان^{۱۲}، RMSE جذر میانگین مربعات خطا^{۱۳} و R^2 ضریب تعیین می‌باشد.

شکل ۴ هیدروگراف رواناب مشاهداتی و مدل شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی را برای ایستگاه منتخب حوضه نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در این هیدروگراف گام زمانی روزانه بوده و هر گام زمانی معرف یک روز می‌باشد.

Table 1- The performance of the IHACRES model in selected stations

جدول ۱- وضعیت عملکرد مدل IHACRES در ایستگاه‌های منتخب حوضه

	Year Selected	RMSE	BIAS	R^2
Calibration	1998-2002	112.53	31.8	0.71
Verification	2002-2006	232.61	69.54	0.68

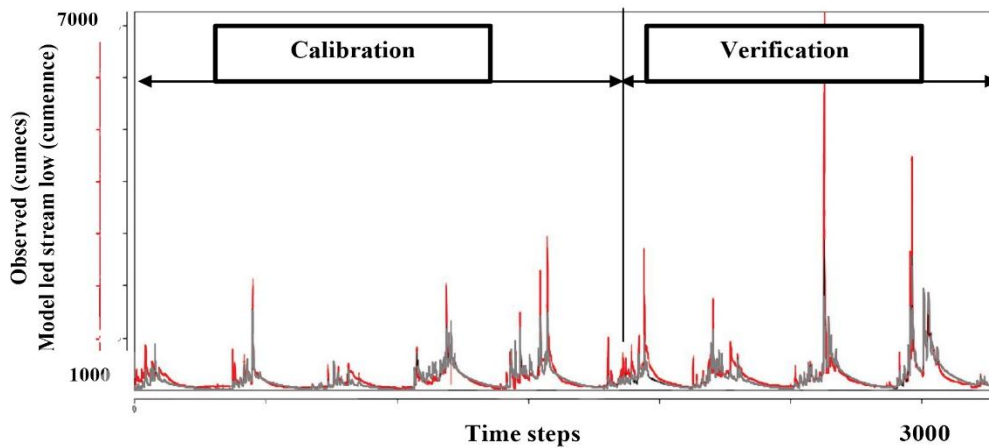


Fig. 4- Observed runoff hydrograph for the calibration and verification periods
 شکل ۴- هیدروگراف رواناب مشاهداتی مدل شده در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی

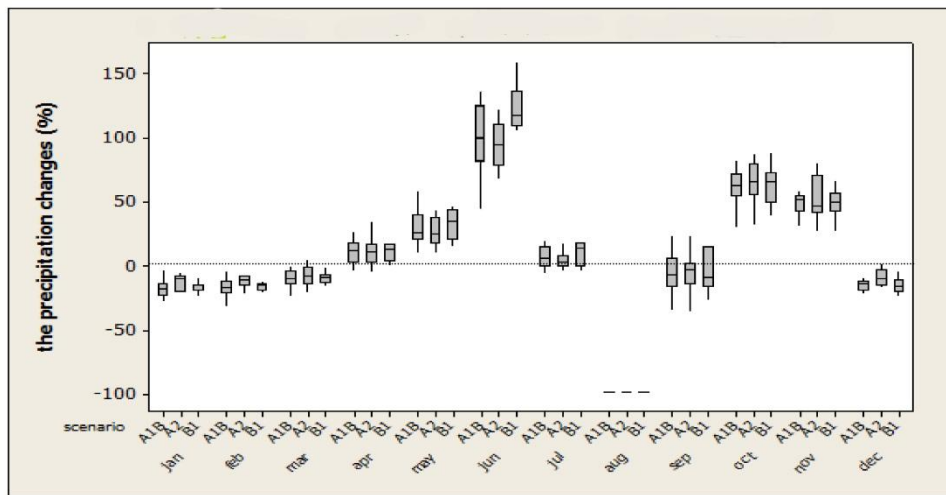


Fig. 5- Percentage change in precipitation
 شکل ۵- درصد تغییرات بارش

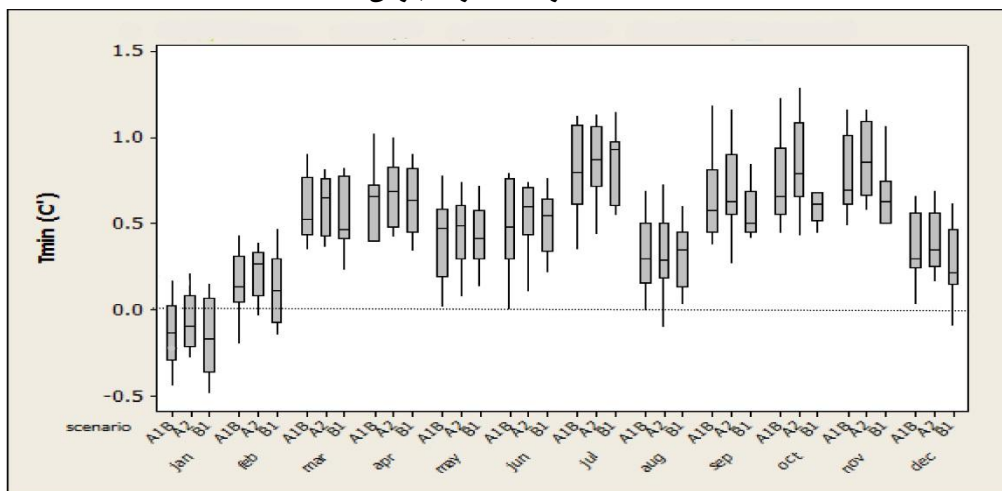


Fig. 6- Minimum temperature variation
 شکل ۶- تغییرات دمای حداقل

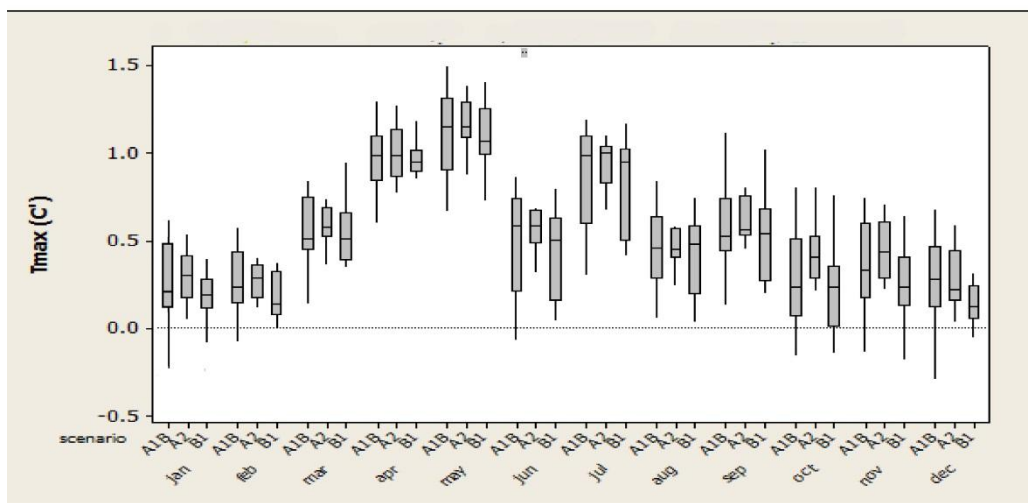


Fig. 7- Maximum temperature variation

شکل ۷- تغییرات دمای حداکثر

به منظور بررسی درصد تغییرات رواناب، این تغییرات تحت سه سناریوی مذکور در جدول ۲ ارائه گردید.

۴-۴- بهره‌برداری از مخزن

در این مطالعه، از روش GA در سامانه تک مخزنه، به صورت بهره‌برداری بلندمدت استفاده شده است و بدین منظور، جعبه ابزار مربوطه در نرم‌افزار (Overman, 2011) و منحنی فرمان SQ به کار گرفته شده است. تابع هدف شاخص کل کمبود نسبی می‌باشد که از رابطه ۳ حاصل می‌شود، در نتیجه کمینه تابع هدف مطلوب است و در اجراهای متعدد برنامه کمینه تابع هدف به عنوان بهینه‌ترین مقدار انتخاب شده است. جدول ۳ مشخصات به کار گرفته شده، متوسط مدت زمان اجرا (دقیقه) و همچنین مقدار تابع هدف این برنامه را نمایش می‌دهد.

در ادامه به بررسی مقادیر شاخص تأمین آب در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۷) تحت سناریوهای A1B، B1 و A2 و در دوره مشاهداتی (۲۰۰۶-۱۹۹۳) پرداخته شد. این مقادیر از نسبت مقدار آب تخصیص داده شده به مقدار آب مورد نیاز بر حسب درصد محاسبه گردید. جدول ۴ مقادیر شاخص تأمین آب را برای این دو دوره نشان می‌دهد که بیانگر این مطلب است که مقدار متوسط سالانه شاخص تأمین در سه سناریو حدود ۱/۷ تا ۵/۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. همچنین منحنی فرمان سد مربوطه در شکل ۹ ارائه گردید. با توجه به جدول مقادیر شاخص تأمین آب، مشاهده می‌شود که در دوره آتی تحت سه سناریوی A1B، B1 و A2 با کاهش شاخص

به طور کلی میزان دمای حداقل در فصل زمستان (ژانویه تا مارس) کاهش می‌یابد و بیشترین میزان کاهش میانه دمای حداقل حوضه در ماه ژانویه و تحت سناریو B1 رخ می‌دهد که مقدار آن برابر ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین نمودار شکل ۷ نیز افزایش مقدار دما در دوره‌ی آتی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش میانه دمای حداکثر حوضه مربوط به فصل تابستان و ماه می، تحت سناریوهای A1B و A2 بوده که مقدار آن برابر با ۱/۲ درجه سلسیوس است، همچنین بیشترین میزان کاهش دمای حداکثر حوضه در ماه دسامبر و فوریه و تحت سناریو B1 و به مقدار ۰/۲ درجه سلسیوس رخ می‌دهد.

۴-۳- بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب منطقه در دوره آتی:

شکل ۸ میانگین درازمدت ماهانه رواناب ورودی به مخزن سد در دو دوره پایه و آینده تحت سه سناریوی انتشار مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رواناب در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای مختلف نتایج نسبتاً متفاوتی را نشان می‌دهد. به طور کلی در ماه‌های دسامبر، نوامبر، سپتامبر، آگوست، جولای و ژوئن افزایش رواناب مشاهده شده در حالی که در مابقی ماه‌ها با کاهش رو به رو بوده است. حداکثر میزان تغییرات افزایشی رواناب دوره آتی نسبت به پایه در ماه جولای بوده و درصد تغییر مربوطه برابر با ۲۷/۵ می‌باشد و حداکثر میزان تغییرات کاهش‌ی رواناب در ماه فوریه بوده که مقدار مربوطه برابر با ۱۱/۷- می‌باشد.

۵ - جمع بندی

هدف از این تحقیق بررسی چگونگی تغییرات سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز در دوره‌های آبی است. بدین منظور از آمار جریان ورودی روزانه به مخزن سد دز و همچنین داده‌های بارش و دمای حوضه در دوره پایه ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ استفاده گردید. جهت استخراج اطلاعات تغییر اقلیم، دوره آبی از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ در نظر گرفته شد و تحت سه سناریو A1B، A2 و B1 متغیرهای اقلیمی منطقه از ۱۵ مدل AOGSM استخراج شد. نتایج نشان داد که:

تأمین آب نسبت به دوره مشاهداتی مواجه هستیم. با مقایسه نمودار منحنی فرمان با مقادیر افزایشی و کاهش‌ی جدول ۱۰ روند منطقی بین مقادیر مشاهده گردید.

به طور کلی حداکثر و حداقل تأمین نیاز به ترتیب در ماه‌های ژانویه و آگوست می‌باشد که این مقدار حداقل در فصل تابستان اتفاق افتاده که مطابق با الگوی کشت منطقه، بالاترین میزان نیاز وجود دارد و موجب کاهش شاخص تأمین آب شده است. میزان تغییرات درصد این شاخص در دوره مشاهداتی بین ۳۱/۱ و ۱۲۷/۶ بوده در حالی که به طور کلی این مقدار در دوره آبی در سه سناریوی مذکور بین ۲۷/۹ و ۱۲۵/۲ می‌باشد.

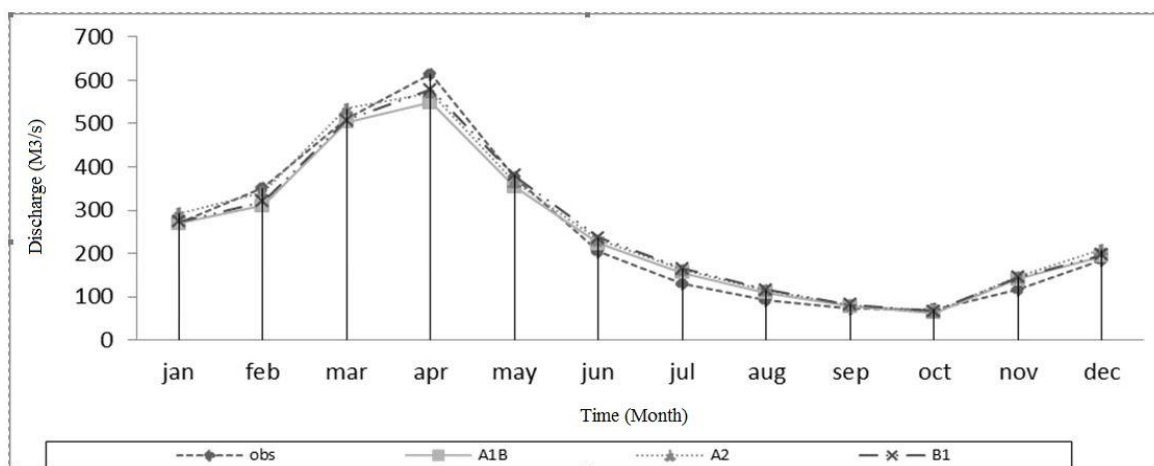


Fig. 8- Changes in longterm inflow to Dez reservoir

شکل ۸- رواناب درازمدت ورودی به مخزن سد دز

Table 2- Percentage change in Mean Inflow

جدول ۲- میزان درصد تغییر میانگین رواناب

	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A1B	3.54	-0.9	-11.7	-5.78	-10.64	-5.7	9.04	20.24	20.1	7.36	-10.19	21.18	5.03
A2	8.95	8.03	-3.06	4.97	-6.9	-2.8	13.2	96.24	24.9	11.57	-7.61	26.68	45.1
B1	8.2	0.93	-9.18	-0.4	-5.78	1.24	15.8	56.27	27.5	13.89	-4.87	24.94	6.78

Table 3- Specifications of GA method in reservoir operation

جدول ۳- مشخصات روش GA در بهره‌برداری مخازن

	The objective function	execution time	elitism	Mutation	Coupling	chromosomes	Repetition
Base	20	10	1	0.1	0.6	50	5000
A1B	21	12	1	0.1	0.6	50	5000
A2	20	12	1	0.1	0.6	50	5000
B1	20	11	1	0.1	0.6	50	5000

Table 4- Water supply index values (percent)
جدول ۴- مقادیر شاخص تأمین آب (درصد)

Time	Percent of supply			
	Re obs	Re B1	Re A2	Re A1B
Jan	127.6	125	125.2	119.2
Feb	88.1	91.1	89.01	86.4
Mar	48.1	57.3	54.3	56.8
Apr	32.9	40	37.4	40
May	31.1	35.9	34.4	34.4
Jun	34.2	36.4	36.3	34
Jul	32.2	33.4	34.5	31.1
Aug	34.1	31	32.1	27.9
Sep	38.6	32.3	34	28.5
Oct	56.9	43.3	47.1	38.8
Nov	88.9	73.5	78.1	68.2
Dec	121.8	109.9	113.5	103.3
Annual	61.4	59.07	59.7	55.7

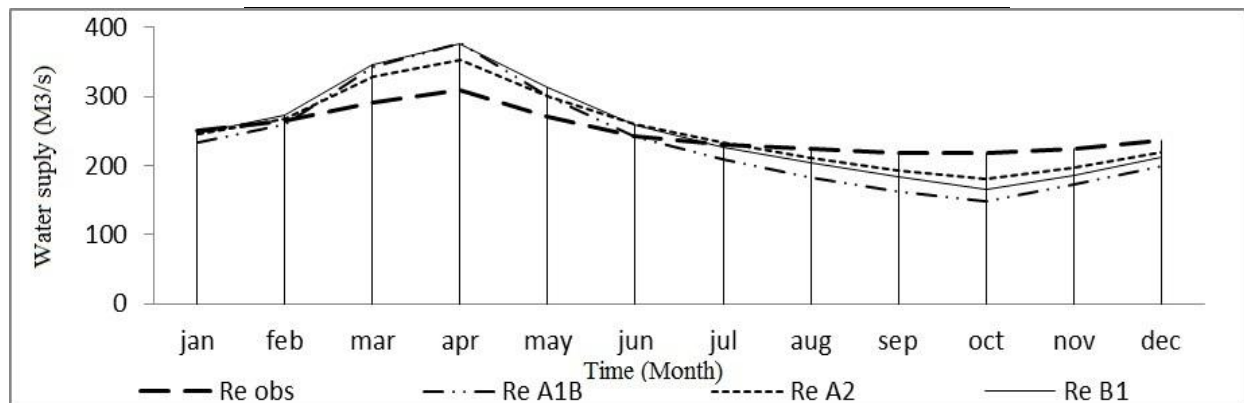


Fig. 9- Operation rule curve for the dam in the base and future period

شکل ۹- منحنی فرمان بهره‌برداری سد در دوره مشاهداتی و آتی

◀ داده‌های دمای حداکثر نیز افزایش را در دوره آتی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. بیشترین درصد افزایش میانه دمای حداکثر حوضه، مربوط به فصل تابستان و ماه می تحت سناریوی A1B و A2 بوده که مقدار آن برابر ۱/۲ درجه سلسیوس است و بیشترین میزان درصد کاهش دمای حداکثر در ماه دسامبر و فوریه و تحت سناریوی B1 و به مقدار ۰/۲ درجه سلسیوس رخ می‌دهد.

◀ با بررسی نتایج بدست آمده از شبیه سازی رواناب ورودی به مخزن سد دز توسط مدل بارش- رواناب IHACRES، مشخص گردید که مدل در منطقه مطالعاتی مورد نظر عملکرد خوبی داشته است. ضریب نش در مرحله واسنجی ۰/۷۱۷ و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۰/۶۸۱ می‌باشد. همچنین با استفاده از این مدل

به طور کلی درصد متوسط تغییرات بارش در حوضه آبریز سد دز در تمام سناریوها در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارچ کاهش را نشان داده و در مابقی ماه‌ها با افزایش بارندگی روبه‌رو هستیم، به طوری‌که بیشترین افزایش درصد متوسط تغییرات بارش مربوط به ماه می سناریوی B1 ۱۲۰٪ بوده است.

◀ میانه تغییرات دمای حداقل و حداکثر، در تمامی ماه‌ها افزایش دما را نشان می‌دهد و بیشترین درصد افزایش میانه دمای حداقل حوضه، مربوط به ماه جولای تحت سناریوی B1 و A2 بوده که مقدار آن برابر ۰/۹ و ۰/۸ درجه سلسیوس است. بیشترین درصد کاهش میانه دمای حداقل حوضه در ماه ژانویه و تحت سناریوی B1 رخ می‌دهد و مقدار آن ۰/۸ درجه سلسیوس می‌باشد.

- 11- Mutation
- 12- Overall Error in Flow Volume
- 13- Root Mean Square Error

۶- مراجع

- Ashofteh PS, Bozorg Haddad O, Mariño MA (2013b) Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change. *Journal of Water Resour Manag* 27(1):255-274
- Ashofteh PS, Bozorg Haddad O, Mariño MA (2013a) Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 139(2):85-97
- Georgakakos KP, Graham NE, Cheng FY, Spencer C, Shamir E, Georgakakos A P, Yao H, Kistenmacher M (2012) Value of adaptive water resources management in northern California under climatic variability and change: Dynamic hydroclimatology. *Journal of Hydrology* 412(1):34-46
- Hadi Pour S, Harun SB, Shahid Sh (2014) Genetic programming for the downscaling of extreme rainfall events on the east coast of peninsular Malaysia. *Atmosphere* 5:914-936
- Hashmi MZ, Shamseldin AY, Melville BW (2009) Statistical downscaling of precipitation: state-of-the-art and application of bayesian multi-model approach for uncertainty assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6(5):6535-6579
- Hashmi MZ, Shamseldin AY, Melville BW (2011) Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 25(4):475-484
- Hundecha Y, Bárdossy A (2008) Statistical downscaling of extremes of daily precipitation and temperature and construction of their future scenarios. *International Journal of Climatology* 28(5):589-610
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. The 5th assessment report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 530p
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2013) Summary for policy makers: how much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research* 29(8):2637-2649
- IPCC AR4 (2007) General guidelines on the use of cenario data for climate impact and adaptation

میزان شاخص خطای MARE در مرحله واسنجی ۰/۰۵ و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۰/۶۸ محاسبه گردید که این نتایج عملکرد مناسب مدل بارش - رواناب را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج تغییرات رواناب ورودی به مخزن در دوره آتی نشان می‌دهد که، میانگین درازمدت رواناب ورودی به مخزن سد دز در مقیاس ماهانه در دوره آتی (۲۰۱۷-۲۰۳۰) تحت هر سه سناریو مورد بررسی در ماه‌های دسامبر، نوامبر، سپتامبر، آگوست، جولای و ژوئن افزایش داشته در حالی که در مابقی ماه‌ها با کاهش رو به رو بوده است. حداکثر میزان تغییرات افزایشی رواناب دوره آتی نسبت به پایه در ماه جولای بوده و درصد تغییر مربوطه برابر با ۲۷/۵ می‌باشد و حداکثر میزان تغییرات کاهش‌ی رواناب در ماه فوریه بوده که مقدار مربوطه برابر با ۱۱/۷- درصد می‌باشد.

با توجه به جدول مقادیر شاخص تأمین آب، مشاهده می‌شود که در دوره آتی تحت سه سناریوی B1، A1B و A2 با کاهش شاخص تأمین آب نسبت به دوره مشاهداتی مواجه هستیم و مقدار متوسط سالانه شاخص تأمین در سه سناریو حدود ۱/۷ تا ۵/۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد.

- بررسی نتایج مدل بهره‌برداری از مخزن نشان می‌دهد که استفاده از منحنی فرمان فعلی برای دوره آتی موجب کاهش شاخص تأمین آب می‌گردد که میزان این کاهش در دوره مشاهداتی بین ۳۱/۱ و ۱۲۷/۶ بوده در حالی که به طور کلی این مقدار در دوره آتی در سه سناریوی مذکور بین ۲۷/۹ و ۱۲۵/۲ می‌باشد.

در نهایت باید گفت که نادیده گرفتن اثر تغییر اقلیم و استفاده از نحوه بهره‌برداری از مخزن دوره پایه برای دوره آینده، موجب کاهش درصد تأمین تخصیص می‌گردد. لذا سازگاری با تغییر اقلیم از طریق تولید منحنی فرمان برای شرایط متغیر می‌تواند در بهبود عملکرد مخزن مؤثر باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Evolutionary Method
- 2- Genetic Algorithm (GA)
- 3- Atmosphere-Ocean General Circulation Models-AOGCMs
- 4- Digital Elevation Model
- 5- Geographic Information System
- 6- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 7- Downscaling
- 8- Semi-empirical Distribution
- 9- Cumulative Probability Distribution Function
- 10- Crossover

- AOGCM models for assessing climate change impact on regional scale. *Journal of Earth Physics and Space* 36(4):99–110 (In Persian)
- Mendes D, Marengo JA (2010) Temporal downscaling: a comparison between artificial neural network and autocorrelation techniques over the Amazon Basin in present and future climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology* 100(3-4):413–421
- Overman E (2011) A MATLAB tutorial. Department of Mathematics, the Ohio State University, Columbus, OH, USA, 180p
- Vicuña S, Dracup J A, Dale L (2011) Climate change impacts on two high-elevation hydropower systems in California. *Climatic Change* 109(1):151–169
- Wang X, Yang T, Shao Q, Acharya K, Wang W, Yu Z (2012) Statistical downscaling of extremes of precipitation and temperature and construction of their future scenarios in an elevated and cold zone. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26(3):405–418
- assessment. V2, June 2007, TGICA, T R Carter, 470p
- Kamal A (2009) Assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change. Master of Science Thesis, University of Tehran
- Karamoz M, Araghinejad Sh (2006) Advanced hydrology. Amirkabir University of Technology Press, 464p (In Persian)
- Kim S, Kwak J, Seong H, Kim HS (2014) Evaluation of drought and flood risks in a multipurpose dam under climate change: a case study of Chungju Dam in Korea. *Journal of Nat Hazards* 73:1663–1678
- Majone B, Bovolo CI, Bellin A, Blenkinsop S, Fowler H J (2012) Modeling the impacts of future climate change on water resources for the Gállego river basin (Spain). *Water Resources Research* 48(1):1–18
- Massah Bavani AR, Morid S, Mohammadzadeh M (2010) Comparison of downscaling approaches and