



## بهره برداری بهینه از مخازن با افزایش بهره وری آب: راهکار سازگاری با تغییر اقلیم آبی (مطالعه موردی: سد جره)

سیدمجید موسوی، حسام سیدکابلی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۱۶  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۲۰  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۲۳  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۱۳

### کلمات کلیدی:

ضریب بهره وری  
بهینه سازی  
تغییر اقلیم  
مخزن  
سازگاری

**خلاصه:** با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب، اتخاذ سیاست های سازگار با تغییر اقلیم به منظور کاهش معضلات اجتماعی-اقتصادی ناشی از آن و توسعه پایدار منابع آب، برای تصمیم سازان آب اجتناب ناپذیر خواهد بود. یکی از روش های سازگاری، افزایش بهره وری آب در پایین دست مخازن است که اثرات تغییر اقلیم شامل کاهش رواناب های ورودی به مخزن و افزایش نیاز آبی شبکه آبیاری را تعدیل خواهد کرد. در این مطالعه تأثیر بهره وری آب به عنوان راهکار سازگاری با تغییر اقلیم آبی در بهره برداری بهینه از مخزن سد جره مورد بررسی قرار گرفت. ۱۵ سناریو تغییر اقلیم با استفاده از ریزمقیاس کردن خروجی مدل های CMIP5 برای دو دوره آبی نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۴) و دور (۲۰۷۰-۲۰۹۴) تولید شد. برپایه این سناریوها میزان رواناب ورودی به مخزن و نیاز آبی پایین دست برای هر دو دوره مدل سازی شد. یک مدل بهینه ساز با در نظر گرفتن پارامتر ضریب بهره وری به منظور تعریف چهار سناریوی بهره وری آب در پایین دست (صفر-۱ S، S<sub>2</sub>-۰/۱، S<sub>3</sub>-۰/۳ و S<sub>4</sub>-۰/۵) توسعه داده شد. نتایج نشان می دهد که میزان جریان ورودی به مخزن تا ۱۸/۸٪ کاهش و میزان تقاضای آب تا ۲۹٪ افزایش پیدا می کند. تخصیص آب به منظور جبران افزایش نیاز در دوره های آبی تا ۱۸/۷٪ نسبت به دوره پایه تحت سناریو S<sub>1</sub> افزایش پیدا می کند که ممکن است اعتماد پذیری سیستم مخزن در تخصیص آب را کاهش دهد. افزایش ضریب بهره وری آب تا ۰/۵ در دوره آبی، اعتماد پذیری سیستم را تا ۲۰٪ افزایش می دهد که منجر به کاهش معضلات اجتماعی-اقتصادی ناشی از تغییر اقلیم در منطقه خواهد شد.

### ۱- مقدمه

است اثرات متفاوتی بر روی سیستم های مختلف از جمله منابع آب، کشاورزی و تمام سیستم هایی که در تعامل با سیستم های اقلیمی هستند داشته باشد [۱]. طبق گزارش پنجم هیئت بین الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> (IPCC) [۲]، درجه حرارت جهانی هوا در سطح زمین بیش از اقیانوس ها افزایش خواهد یافت که منجر به تشدید وقوع پدیده های حدی مانند سیل و خشکسالی می شود. این موضوع بهره برداری بهینه از سدها را در آینده بیش از پیش مورد توجه قرار داده است. اما آنچه قابل تأمل و پر اهمیت است، شناسایی اقدامات سازگاری مناسب برای توانمندسازی این بخش به منظور مقابله کارا و اثربخش با این

استفاده بهینه از منابع آب با دیدگاه توسعه پایدار یک چالش جهانی بحساب می آید. اما این موضوع در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت بسزایی برخوردار است. کمبود بارندگی و محدود بودن منابع آب شیرین از یک سو و بهره برداری با راندمان پائین از سوی دیگر باعث شده تا چالش امنیت غذایی و آب دوچندان شود. از طرفی افزایش انتشار گازهای گلخانه ای در دهه های اخیر چرخه هیدرولوژیکی را دستخوش تغییرات شگرفی کرده است. بر این اساس، تشدید تغییرات در پارامترهای اقلیمی در دوره های آبی ممکن

1 Intergovernmental Panel Climate Change

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: hkaboli@jsu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



تغییرات است.

شیوه مدیریت آب و سازگاری با تغییر اقلیم دارای روابط درونی و پیچیده با عوامل دیگر است که تغییر در این عوامل سبب تشدید اثرات بر بخش آب خواهد شد. راه حل های اعمالی برای مقابله با چنین چالش هایی (موجود در حوزه انرژی زیستی و امنیت غذایی) اگر بدون توجه به تأثیرات این راه حل ها بر بخش آب اتخاذ شود، می تواند منجر به وخیم تر شدن مسائل و موضوعات آبی شده و موجب شکست از درون می شود. یکی از روش های سازگاری با اثرات تغییر اقلیم ایجاد سیاست های بهره برداری بهینه از سدها براساس سناریوهای مختلف رواناب ورودی به مخزن است. در مراجع [۴ و ۳] با شبیه سازی رواناب ورودی به مخزن و تغییرات نیاز پایین دست براساس اثرات تغییر اقلیم، میزان رهاسازی از سد و الگوی کشت بهینه شده است. به نظر می رسد که میزان بهره‌وری آب و روش های مدیریت آب در شبکه‌های آبیاری بیش از بهینه سازی الگوی کشت در افزایش سازگاری با اثرات تغییر اقلیم موثر است. بطوریکه افزایش راندمان مصرف بدون تغییر الگوی کشت می تواند منجر به افزایش اعتمادپذیری سیستم مخزن گردد. از طرفی تغییر الگوی کشت بسیار وابسته به تصمیم گیران محلی است که مدیریت آن بسیار دشوارتر خواهد بود. بنابراین ایجاد تعادل بین الگوی کشت (نیاز پایین دست) و میزان رهاسازی با حفظ اعتمادپذیری بالا می تواند یک راهکار سازگاری با اثرات تغییر اقلیم باشد. در این مقاله اثر مدیریت مصرف بر اساس ضریب بهره‌وری آب بر نحوه بهره برداری از سدها به عنوان یک روش سازگار با تغییر اقلیم ارائه شده است که می تواند منجر به اتخاذ سیاست های کلان جهت حفظ پایدار محیط زیست در شرایط تغییر اقلیم آینده شود.

ایجاد سیاست های بهره برداری سازگار با اثرات تغییر اقلیم با استفاده از چهار زیر مدل شامل: تصویرسازی عوامل اقلیمی موثر بر چرخه هیدرولوژیک براساس سناریوهای انتشار گاز گلخانه‌ای، شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن براساس سناریوهای اقلیمی آبی، نیاز آبی پایین دست مخزن تحت شرایط تغییر اقلیم و مدل بهینه ساز بهره برداری مخزن انجام می گیرد. تصویرسازی پارامترهای اقلیمی شامل بارش و دما براساس گزارش های هیئت بین دول تغییر اقلیم انجام می گیرد که در حال حاضر گزارش پنجم با عنوان 'CMIP۵'

مورد استفاده قرار می گیرد [۵]. برای مثال در مرجع [۶] چهار مدل CMIP۵ از بین ۱۴ مدل برای بررسی تغییرات دما و بارش در حوضه کشف رود انتخاب شد. نتایج نشان می دهند که تا انتهای قرن بیست و یکم نسبت به دوره ی پایه متوسط دمای حوضه بین ۳/۳-۰/۵۶ درجه سانتیگراد افزایش و بارش تا ۱۰/۷ درصد کاهش پیدا می کند. مرجع [۷] با بررسی ۱۵۰ مطالعه تغییر اقلیم در ایران اظهار دارد که دما در اغلب نقاط ایران روند افزایشی دارد و تا افق ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۵ درجه در نواحی اقلیمی مختلف ایران افزایش دما رخ خواهد داد. مرجع [۸] نیز بر پایه ۹ سناریو تغییر اقلیم نشان می دهد که بارش سالانه در حوضه آبریز سد دز تا اواسط قرن ۲۱ حدود ۱ درصد و تا انتهای قرن حاضر حدود ۶ درصد کاهش می یابد. نتایج بررسی این سناریو های تغییر اقلیم در حوضه آبریز علویان [۸] برای بارش سالانه کاهش حدود ۱۰ و ۱۳ درصدی را به ترتیب برای اواسط و انتهای قرن حاضر نشان می دهد. البته با توجه به مقیاس جهانی مدل های CMIP۵ خروجی این مدل ها جهت کاربرد در مقیاس منطقه ای و یک حوضه نیاز به کاهش مقیاس دارند؛ که روش های آماری و دینامیکی مختلفی برای کوچک مقیاس کردن خروجی مدل های CMIP۵ معرفی شدند [۹].

زیر مدل دوم به شبیه سازی اثر تغییر اقلیم بر جریان های سطحی می پردازد. با داشتن یک مدل هیدرولوژیک واسنجی شده برای یک حوضه آبریز می توان به بررسی اثر تغییر اقلیم آبی بر رواناب های ماهانه و فصلی به ازای سناریوهای اقلیمی مدل های CMIP۵ پرداخت. در مرجع [۱۰] بررسی ۹ سناریو تغییر اقلیم در حوضه بالادست والنیتینا در ایتالیا نشان داد که میزان رواناب تا اواسط قرن ۲۱ به طور متوسط ۵ درصد و تا انتهای قرن حاضر حدود ۸ درصد کاهش می یابد، همچنین بارش بصورت برف کاهش یافته و غالب جریان سطحی در دوره های آبی ناشی از باران خواهد بود. همچنین مرجع [۸] میزان کاهش رواناب ورودی به دو سد مخزنی دز و علویان به ترتیب حدود ۱۳ و ۱۸ درصد را تا افق ۲۱۰۰ پیش بینی کردند. مرجع [۱۱] نیز براساس ۱۰ سناریو تغییر اقلیم آبی میزان کاهش ۲۹/۵ درصدی را برای متوسط رواناب سالانه رودخانه خرم آباد در افق ۲۱۰۰ پیش بینی می کند. دامنه مدل های هیدرولوژیک براساس هدف شبیه سازی، مقیاس زمانی و نوع اطلاعات در دسترس بصورت توزیعی [۸ و ۱۰]، نیمه توزیعی [۱۱] و آماری [۱۴، ۱۳ و

یک تقسیم بندی کلی می توان به روش های کلاسیک و فرا ابتکاری اشاره کرد. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری در حل مسائل بهره برداری از مخزن مانند مطالعات مراجع [۱۹، ۴ و ۳] مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر مدیریت مصرف آب در پایین دست در بهره برداری از مخزن است که منجر به سازگاری با تغییر اقلیم آتی در حوضه آبریز سد جره خواهد شد. برای اینکار در زیرمدل اول از خروجی ۵ مدل CMIP۵ تحت سه سناریو انتشار<sup>۲</sup> RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵- که توسط مدل ریزمقیاس برپایه شبکه عصبی برای حوضه آبریز مورد مطالعه کوچک مقیاس شده اند- استفاده شده است. شبیه سازی رواناب نیز با استفاده از مدل شبکه عصبی چند لایه پرسپترون انجام گرفته است. همچنین تابع هدف زیرمدل بهینه ساز برپایه ضریب بهره وری آب بازنویسی شده و از الگوریتم ژنتیک جهت حل استفاده شده است.

## ۲- روش تحقیق

بررسی اثر مدیریت مصرف آب در پایین دست بر بهره برداری از مخازن به عنوان روش سازگاری با اثرات تغییر اقلیم در چهار بخش: (۱) تولید سناریوهای تغییر اقلیم آتی (۲) شبیه سازی رواناب ورودی به مخزن (۳) برآورد نیاز آبی پایین دست (۴) مدل بهینه ساز بهره برداری مخزن تعریف می شوند.

### ۱-۲- تولید سناریوهای تغییر اقلیم آتی

جهت تولید سناریوهای اقلیمی از خروجی ۵ مدل CMIP۵ استفاده شده است (جدول ۱). با توجه به بزرگ مقیاس بودن این مدل ها یک مدل ریزمقیاس برپایه شبکه عصبی توسعه داده شده است. برای ریزمقیاس کردن خروجی مدل ها از داده های تحلیل مجدد<sup>۳</sup> NCEP/NCAR به عنوان یک نماینده بزرگ مقیاس جوی استفاده شده است. مجموعه داده های تحلیل مجدد NCEP/NCAR با استفاده از اقلیم مشاهداتی اخذ شده از سال ۱۹۴۸ تا به امروز در قالب شبکه های منظم با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵×۲/۵ درجه تولید و در دسترس هستند. در مرحله پیش پردازش روش ریزمقیاس آماری،

[۱۲] تقسیم بندی می شوند. مراجع [۱۴، ۱۳ و ۱۲] نشان دادند که برای شبیه سازی رواناب در مقیاس ماهانه، مدل شبکه عصبی در مقایسه با سایر روش ها میزان رواناب ماهانه را بخوبی مدل می کند. چنانچه مقیاس زمانی شبیه سازی ماهانه باشد و اطلاعات کافی از حوضه برای واسنجی مدل های توزیعی و نیمه توزیعی در دسترس نباشد، روش های آماری جایگزین مناسبی خواهند بود [۱۲]

از آنجائیکه عمده مصرف آب در پایین دست مربوط به بخش کشاورزی است، نیاز آبی مزارع تحت سناریوهای اقلیمی آتی با استفاده از روش های محاسبه تبخیر و تعرق در زیر مدل سوم محاسبه می شود. روش های مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق مانند هارگریوز- سامانی و پنمن-مونتیس<sup>۱</sup> (FAO-PM) وجود دارد که مراجع [۱۷، ۱۶ و ۱۵] با آزمون روش های مختلف دریافتند که روش FAO-PM نسبت به دیگر روش ها ارجحیت دارد.

زیر مدل چهارم به بهینه سازی بهره برداری از مخزن برپایه تغییرات در جریان ورودی به مخزن و نیاز پایین دست می پردازد. علاوه بر این دو عامل میزان تبخیر از مخزن نیز تحت تاثیر گرمایش جهانی بوده و در مخازن بزرگ از اهمیت بسیاری برخوردار است. این زیر مدل می تواند از نظر تابع هدف، قیود و روش حل در مطالعات مختلف با توجه به اهداف محققین و نیاز کاربردی متفاوت باشد. برای مثال مرجع [۳] یک مدل چند هدفه حداکثر سازی قابلیت اطمینان از برآورد ساختن نیازهای آبیاری و به حداقل رساندن کمبودهای آبیاری را برای ایجاد سیاست بهینه بهره برداری مخزن آیدوقموش در دوره ی آینده (۲۰۲۶-۲۰۳۹) توسعه داده است. مرجع [۴] نیز یک مدل بهینه سازی غیر خطی با تلفیق یک مدل تعادل خاک/ آب یکپارچه به منظور تعیین سیاست های رهاسازی بهینه ی مخزن و الگوی کشت بهینه ارائه کرده است. مرجع [۱۸] در تحقیقی به مدل سازی تخصیص بهینه آب بر اساس ارزیابی امنیتی آب و کاربرد آن در منطقه ای در شمال چین برای بهبود منافع مصرف آب تا سال ۲۰۲۰ پرداخته است. مرجع [۱۰] نیز تابع هدف حداکثر سازی تولید برق آبی را در شرایط تغییر اقلیم آتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها از روش بهینه سازی کلاسیک خطی مختلط برای حل مدل استفاده کردند. برای حل مدل های ریاضی در نظر گرفته شده در مسائل بهره برداری بهینه از مخازن روش های مختلفی وجود دارد که در

2 Representative Concentration Pathway

3 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research

1 Food and Agriculture Organization Penman-Monteith

جدول ۱. مشخصات مدل‌های اقلیمی مورد استفاده  
Table 1. characteristics of used climate models

ردیف	نام مدل	مرکز	کشور	وضوح (درجه)
۱	mri-cgcm <sup>۳ ۱</sup>	موسسه پژوهشی هواشناسی	ژاپن	۱/۱۲۵×۱/۱۲۱
۲	bcc-csm <sup>۱-۱ ۲</sup>	اداره هواشناسی-مرکز اقلیمی پکن	چین	۲/۸۱×۲/۷۹
۳	GFDL-CM <sup>۳ ۳</sup>	آزمایشگاه ژئوفیزیک دینامیک سیلات	آمریکا	۲/۵×۲
۴	MPI-ESM-LR <sup>۴</sup>	موسسه هواشناسی مکس پلاتک	آلمان	۱/۸۷۵×۱/۸۶۵
۵	MPI-ESM-MR <sup>۵</sup>	موسسه هواشناسی مکس پلاتک	آلمان	۱/۸۷۵×۱/۸۶۵

می گیرد.

$$VC_{m.f}(i) = V_{m.f}(i) \times \Delta f(i) \quad i = ۱.۲. .... ۱۲ \quad (۳)$$

$$VC_{m.f}(i) = V_{m.f}(i) + \Delta S(i) \quad i = ۱.۲. .... ۱۲ \quad (۴)$$

مقادیر ماهانه اصلاح شده مدل های CMIP5 در دوره آتی (f) و مقادیر ماهانه ی CMIP5 اصلاح نشده در دوره آتی هستند.

(۳) مدل ریزمقیاس نمایی با ایجاد یک مدل شبکه عصبی که داده های تحلیل مجدد (NCEP/NCAR) در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) به عنوان ورودی و داده های مشاهده‌ای در دوره پایه به عنوان هدف تعریف می شود. برای این منظور از قسمت Nonlinear Input-output شبکه Neural Net Time Series موجود در جعبه ابزار نرم افزار متلب استفاده شد. جهت آموزش، اعتبارسنجی و سنجش در مدل به ترتیب از ۷۰٪، ۱۵٪ و ۱۵٪ داده ها استفاده شده است. به علاوه اینکه تعداد لایه پنهان ۱۰ عدد در نظر گرفته شد. در نهایت از تابع Levenberg-Marquardt جهت آموزش استفاده شد. جزئیات بیشتر در مرجع [۲۲] ارائه شده است.

(۴) با ایجاد مدل در مرحله ۳، داده های مدل CMIP5 اصلاح شده در مرحله دوم به عنوان ورودی وارد مدل شبکه عصبی شده و خروجی داده های ریزمقیاس شده برای آینده خواهند بود.

## ۲-۲- شبیه سازی رواناب ورودی به مخزن

رایج ترین شبکه عصبی در پیشبینی و حل مسائل غیرخطی، شبکه های چند لایه پرسپترون است. شبکه عصبی مصنوعی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است دارای دو لایه (ورودی-خروجی) است که با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا آموزش

داده های NCEP به عنوان داده های مشاهده‌ای در نظر گرفته شده اند و به عنوان یک معیار برای اصلاح جهت گیری های سیستماتیک در مدل های CMIP5 به کار گرفته می شوند. در مرحله بعد، متغیر بوجود آمده از NCEP به عنوان پیش بینی های جوی برای توسعه مدل تجربی هستند، که اساس برنامه ریزی پیش بینی اقلیمی مد نظر برای دهه های آتی (بارش و دما) را تشکیل می دهند [۹].

به طور خلاصه مراحل ریزمقیاس خروجی مدل های CMIP5 استفاده از شبکه عصبی به صورت زیر است:

(۱) هم سایز کردن داده های NCEP و CMIP5 با استفاده نرم افزار Cdo در محیط LINUX- Ubuntu و روش bilinear.

(۲) تصحیح انحراف: ابتدا مقادیر تصحیح انحراف با استفاده از داده های تحلیل مجدد NCEP/NCAR و CMIP5 در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) از روش عامل تغییر استخراج خواهد شد [۲۰]. در روش فاکتور تغییر (دلتا) برای پارامترهای دما و رطوبت نسبی تفاوت بین مقادیر میانگین ماهانه (رابطه ۱) و برای پارامترهای بارش و تشعشع خورشیدی مقادیر نسبت (رابطه ۲) ملاک عمل است [۲۱]:

$$\Delta S(i) = \overline{V_{n.b}(i)} - \overline{V_{m.b}(i)} \quad i = ۱.۲. .... ۱۲ \quad (۱)$$

$$\Delta f(i) = \frac{\overline{V_{n.b}(i)}}{\overline{V_{m.b}(i)}} \quad i = ۱.۲. .... ۱۲ \quad (۲)$$

در این روابط و به ترتیب مقادیر میانگین بلند مدت ماهانه ی پارامترهای اقلیمی برای داده های NCEP/NCAR و CMIP5 در دوره پایه یا مشاهده‌ای هستند. تصحیح انحراف داده های CMIP5 در دوره های آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۴ و ۲۰۷۰-۲۰۹۴) برپایه مقادیر تصحیح انحراف بدست آمده از روابط بالا و بکارگیری روابط (۳) و (۴) انجام

1 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research

2 Meteorological Research Institute-Coupled General Circulation Model

3 Beijing Climate Center Climate System Model

4 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Climate Model

5 Max Planck Institute Earth System Model-Low Resolution

6 Max Planck Institute Earth System Model-Medium Resolution

ارتباط و تأثیرپذیری را از شرایط محیط اطراف و به خصوص اقلیم دارد، به گونه ای که ویژگی های اقلیمی در بلند مدت، منجر به تعیین الگوی کشت و توجیه پراکنش گونه های گیاهی مختلف خواهد شد. بنابراین تحت شرایط اقلیمی مختلف مانند تغییر متوسط درازمدت بارش و دما نیاز آبی کشاورزی را تغییر خواهد داد. نیاز آبی کشاورزی همان نیاز ناخالص آبیاری است که با اعمال راندمان آبیاری بر نیاز خالص آبیاری برآورد خواهد شد. نیاز خالص آبیاری براساس میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و ضریب گیاهی برآورد می شود. در این تحقیق از روش ۵۶-FAO برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شده است، که اساس این روش معادله پنمن-مونتیس اصلاح شده است (رابطه ۵).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} U_T (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_T)} \quad (5)$$

در این رابطه تبخیر و تعرق مرجع (میلیمتر بر روز)، شیب منحنی فشار بخار، تابش خالص، ضریب ثابت رطوبتی، T میانگین دمای هوا (درجه سلسیوس)، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه) و کمبود فشار بخار (KPa) هستند. بنابراین برای محاسبه نیاز آبی خالص در کل دوره کشت محصول پارامترهایی از قبیل میانگین حداقل و حداکثر درجه حرارت، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی روزانه، سرعت باد، بارش، ضرائب گیاهی اصلاح شده و طول دوره ی کشت مورد نیاز است. در این مطالعه از نرم افزار Cropwat ارائه شده توسط FAO برای برآورد نیاز خالص آبیاری شبکه پایین دست مخزن استفاده شده است. از طرفی نیاز ناخالص آبیاری با استفاده از ضریب بهره وری اعمال شده در مدل بهینه ساز برآورد می شود تا مدل در بررسی تاثیر افزایش راندمان مصرف توانا باشد. همچنین نیاز زیست محیطی بصورت ثابت در مدل بهینه ساز در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۲- مدل بهینه ساز

تابع هدف به طور کلی به صورت حداقل سازی میزان کمبودها و با قابلیت اعمال میزان بهره وری آب توسعه داده شد. بدین منظور ضریبی به عنوان ضریب بهره وری آب در تابع حداقل سازی کمبودها در نظر گرفته شده است تا با تغییر این ضریب بتوان اثر بهره وری آب را در شاخص های عملکردی مخزن مشاهده نمود. تابع هدف به صورت زیر تعریف شده است:

$$\min: Z = \sum_t \left[ \frac{R_t - [D_{at} + (1 - \alpha)r_t + D_{et}]}{\max[D_{at} + (1 - \alpha)r_t]} \right]^2 \quad (6)$$

می یابد. جهت استفاده از یک شبکه دو لایه Feed-Forward ابتدا باید وزن های ارتباط دهنده نرون های شبکه تعیین شوند. در شبکه های پیش رونده، ورودی به هر گره، خروجی گره های لایه قبلی است. لذا داده ها برای تدوین ساختار مدل به سه دسته تقسیم می شوند. اولین دسته داده هایی هستند که برای آموزش (Training Data) جهت تعیین وزن های شبکه در نظر گرفته می شوند. دومین دسته داده های اعتبارسنجی (Validation Data) هستند که جهت ارزیابی نتایج مرحله آموزش و تصمیم گیری درباره توقف آموزش شبکه بکار گرفته می شوند و سومین دسته داده های سنجش (Testing Data) هستند که برای تعیین دقت مدل بکار گرفته می شوند و قبلا در تدوین مدل استفاده نشده اند. در تحقیق حاضر از ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد داده ها به ترتیب جهت آموزش، اعتبارسنجی و سنجش در مدل استفاده شده است. داده های بارش ۹ ایستگاه به عنوان ورودی و داده های دبی مشاهداتی به عنوان هدف جهت آموزش شبکه استفاده شده اند. سپس شبیه سازی دبی های آبی با استفاده از شبکه آموزش دیده صورت گرفته است. به دیگر بیان با استفاده از داده های بارش و رواناب مشاهداتی، شبکه ی عصبی آموزش داده شده است. بعد از آموزش شبکه عصبی با تعداد لایه های پنهان ۱۰ عدد و انتخاب بهترین حالت ممکن، برای صحت سنجی مجدد داده های بارش ایستگاه های منطقه مورد مطالعه را به عنوان ورودی شبکه آموزش داده شده در نظر گرفته و رواناب برآورد خواهد شد. سپس، با مقایسه رواناب بدست آمده و رواناب مشاهداتی منطقه صحت مدل تأیید خواهد شد. در نهایت با استفاده از داده های بارش آبی به عنوان ورودی به شبکه ی آموزش دیده، رواناب آبی برای مدل های منتخب در این پژوهش و هر کدام از سناریو ها شبیه سازی شد. مقادیر دبی خروجی از شبکه عصبی آموزش دیده با توجه به مدل ها و سناریوهای مختلف، برای دو دوره ی آبی در نظر گرفته شده به عنوان ورودی مخزن در مدل بهینه ساز در نظر گرفته شده است. جزئیات بیشتر مدل مورد استفاده در مطالعات [۱۳] ارائه شده است.

#### ۳-۲- برآورد نیاز آبی پایین دست

در این تحقیق نیازهای زیست محیطی و کشاورزی به عنوان نیاز پایین دست مخزن تعریف می شوند که فرض شده نیاز زیست محیطی بدون تغییر باقی خواهد ماند. بخش کشاورزی بیشترین

$$E_o \left( \frac{mm}{day} \right) = \frac{700T_m + 15(T - T_d)}{100 - A(80 - T)} \quad (12)$$

که در آن  $T_m = T + 0.006h$  که  $h$  مقدار ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر و  $T$  مقدار میانگین دما،  $A$  مقدار عرض جغرافیایی بر حسب درجه،  $T_d$  نیز مقدار متوسط دمای نقطه شبنم است. میزان متوسط سطح مخزن ( $\bar{A}_t$ ) با استفاده از رابطه سطح-ذخیره مخزن که بصورت رابطه (۱۳) است برای هر حجم بهینه محاسبه و به مدل وارد خواهد شد:

$$A_t = a \times S_t + b \quad (13)$$

که در آن  $A$  سطح متوسط مخزن بر حسب کیلومتر مربع و  $S$  حجم ذخیره بر حسب میلیون مترمکعب است.  $a$  و  $b$  نیز پارامترهای ثابت بوده که برای سد جره این مقادیر به ترتیب برابر  $0.325$  و  $0.5493$  هستند. همچنین حداکثر ( $S_{max}$ ) و حداقل ( $S_{min}$ ) ذخیره مخزن سد جره به ترتیب برابر با  $35$  و  $232$  میلیون مترمکعب است.

جهت حل مدل بهینه ساز از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یکی از روش های بهینه سازی است که با الهام گرفتن از پروسه تکامل طبیعت و خصوصیات ژنتیکی موجودات طراحی شده است. الگوریتم ژنتیک حل یک مسأله را با مجموعه ای از جواب های تصادفی که جمعیت نامیده می شوند آغاز می کند. هر جمعیت از تعدادی کروموزوم تشکیل می شود و هر کروموزوم هم شامل ژن هایی است که این ژن ها می توانند اعداد باینری، حقیقی، نشانه ها و ... باشند. پس از تولید تصادفی نسل اول، کروموزوم های موجود در این نسل ارزیابی می شوند و براساس برآزش بدست آمده از هر کروموزوم جمعیت نسل بعد به گونه ای تشکیل می شود که مسأله را به سمت حل بهینه هدایت کند. در واقع الگوریتم ژنتیک بر این اصل استوار است که کروموزوم های بهتر (یعنی آنهایی که برآزش مناسب تر داشته اند) شانس بیشتری برای بقاء خواهند داشت. در این پژوهش برای مدل الگوریتم ژنتیک، انتخاب والد در عملگر تزیوج به صورت سعی و خطا، همچنین عملگر جهش نیز با استفاده از روش تصادفی صورت گته است. مدل بهینه ساز الگوریتم ژنتیک با پیاده سازی در نرم افزار MATLAB نسخه R2014a حل شد.

بحث دیگری که در اجرای الگوریتم ژنتیک وجود دارد چگونگی برخورد با محدودیت های مسأله است، زیرا عملگرهای ژنتیک مورد استفاده در الگوریتم باعث تولید جواب های غیرموجه می شود.

$$r_t = \left( \frac{D_{at}}{e} - D_{at} \right) \quad (7)$$

که در آن  $Z$  حداقل سازی کمبود ماهانه،  $R_t$  میزان رهاسازی،  $D_{at}$  نیاز خالص کشاورزی،  $Det$  نیاز زیست محیطی،  $r_t$  آب برگشتی، ضریب بهره وری آب،  $e$  راندمان کلی،  $t$  تعداد دوره ها (تعداد ماه ها ۱... ۱۲) و  $T$  بیانگر کل دوره است. آب برگشتی ( $r_t$ ) تفاوت بین نیاز ناخالص و خالص کشاورزی است که نیاز ناخالص براساس راندمان منطقه و بر مبنای مطالعات میدانی بدست آمده است. میزان نشان دهنده اثر بهره وری آب است، بطوریکه اگر باشد به این معنی است که میزان آب برگشتی به محیط از آب تخصیص یافته به کشاورزی برابر صفر است و میزان بهره وری  $100$  درصد خواهد بود. با کاهش مقدار  $\alpha$  میزان بهره وری آب کاهش یافته تا جائیکه این مقدار برابر با صفر شود. در این تحقیق از چهار سناریوی بهره وری محتمل بر مبنای امکان افزایش راندمان آبیاری در منطقه جهت اعمال در مدل در نظر گرفته شد. ضریب بهره وری صفر،  $0.1$ ،  $0.3$  و  $0.5$  که به ترتیب  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  نامیده می شوند نشان دهنده افزایش راندمان آبیاری به میزان صفر،  $2/4$ ،  $8/39$  و  $16/75$  درصد خواهند بود. بهینه سازی تحت سناریو  $S_1$  بیانگر بهره برداری بهینه در شرایط پایه یا بهره وری در حالت فعلی است.

محدودیت های مسئله مربوط به معادله پیوستگی در مخزن در یک دوره زمانی، ظرفیت حداکثری مخزن، حداقل ذخیره مخزن، میزان سرریزی از مخزن و عدم تجاوز رها سازی از نیاز پایین دست است. قیود مسئله به شکل زیر تعریف می شوند:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t - (E_t \times \bar{A}_t) \quad (8)$$

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

$$0 \leq R_t \leq D_{max} \quad (10)$$

$$SP_t = \begin{cases} S_t + Q_t - (E_t \times \bar{A}_t) - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - (E_t \times \bar{A}_t) \geq S_{max} \\ \text{otherwise} & \end{cases} \quad (11)$$

که در آن  $S_t$  ذخیره ماهانه،  $Q_t$  جریان ورودی در هر دوره،  $SP_t$  میزان سرریزی،  $E_t$  میزان تبخیر و  $\bar{A}_t$  متوسط سطح مخزن است. میزان  $E_t$  در دوره پایه با استفاده از مقادیر نسبت توزیع ماهانه تبخیر در جدول (۱) و متوسط تبخیر سالانه در مدل اعمال شده و برای دوره آتی از رابطه لیناکر [۲۳] رابطه ساده سازی شده پنمن برای نرخ تبخیر از سطح دریاچه - مقدار تبخیر آینده تخمین زده شده است، (رابطه ۱۲):



می کند و رودخانه اله را تشکیل می دهد. از این نقطه به جنوب جریان می یابد و با رودخانه تلخ تلاقی می کند و وارد دشت رامهرمز می شود. طول رودخانه تا محل ایستگاه ماشین (نزدیک محل سد جژه) ۷۷/۴ کیلومتر است. سد جژه با ظرفیت ذخیره سازی ۲۳۱/۵۶ میلیون متر مکعب (در تراز نرمال) در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان رامهرمز در استان خوزستان قرار دارد و با هدف آبیاری ۲۲ هزار هکتار از اراضی دشت رامهرمز احداث شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۵۸۴ میلی متر، متوسط دمای سالیانه حدود ۲۱/۶ درجه سانتی گراد است. بر اساس آمار ثبت شده، متوسط جریان ورودی سالانه به سد ۲۴۶ میلیون متر مکعب بود. تقاضای تخصیص آب از سد جژه به طور کلی در بخش کشاورزی و زیست محیطی دسته بندی می شود. نیاز سالیانه ای که سد بایستی تأمین کند در بخش کشاورزی ۲۹۴/۱۵ میلیون متر مکعب و زیست محیطی ۴۳/۹۵ میلیون متر مکعب است. اراضی کشاورزی در این منطقه شامل دو قسمت، ساحل سمت راست و سمت چپ رودخانه با سطح زیر کشت کنونی تقریبی ۳۵۰۰۰ هکتار است که در حال حاضر در حدود ۴۰ درصد توسط آب سد و ما بقی توسط آب رودخانه اعلاء و چاه های موجود در منطقه آبیاری می شوند. با توجه به روش آبیاری منطقه مورد مطالعه که به صورت سنتی و در کانال های خاکی صورت می گیرد، پرسشنامه هایی جهت تعیین میزان راندمان مصرف تهیه شد. براین اساس راندمان مصرف در این منطقه ۳۰/۴ درصد تعیین گردید. در شکل (۱) محدوده ی منطقه ی مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه های هواشناسی و آب سنجی نشان داده شده است.

جدول (۱) نیازهای ماهانه کشاورزی و زیست محیطی منطقه مورد مطالعه که براساس اهداف از پیش تعیین شده سد و پتانسیل کشاورزی ناحیه پایین دست سد برآورد شده است، به تفکیک ارائه

جدول ۲. نیازهای پائین دست، رواناب ورودی و نسبت توزیع تبخیر ماهانه سد جژه

Table 2. Downstream requirements, inflow and monthly evaporation ratio of Jareh dam

Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	Ma y	Apr	Mar	Feb	Jan	ماه	نیازها (Mm <sup>۳</sup> )
۸/۸	۹/۷	۱۳/۱	۲۰/۶	۲۶	۳۳/۱	۴۰/۵	۴۵/۳	۴۴/۶	۳۴/۳	۱۴/۴	۳/۷	کشاورزی	
۲/۲	۱/۵	۰/۹	۱/۵	۱/۹	۲/۵	۴/۸	۸/۱	۹/۹	۵/۳	۲/۸	۲/۵	زیست محیطی	
۱۱	۱۱/۲	۱۴	۲۲/۱	۲۷/۹	۳۵/۶	۴۵/۳	۵۳/۴	۵۴/۵	۳۹/۶	۱۷/۲	۶/۲	مجموع	
۲۷/۸	۲۰/۶	۱۱/۱	۷/۹	۷/۳	۹/۴	۱۴/۳	۲۵/۶	۳۱/۷	۳۱	۲۸/۵	۳۱/۲	رواناب ورودی به سد (Mm <sup>۳</sup> )	
۵	۶	۹	۱۱	۱۳	۱۴	۱۳	۱۱	۸	۶	۴	۴	توزیع تبخیر ماهانه (/)	

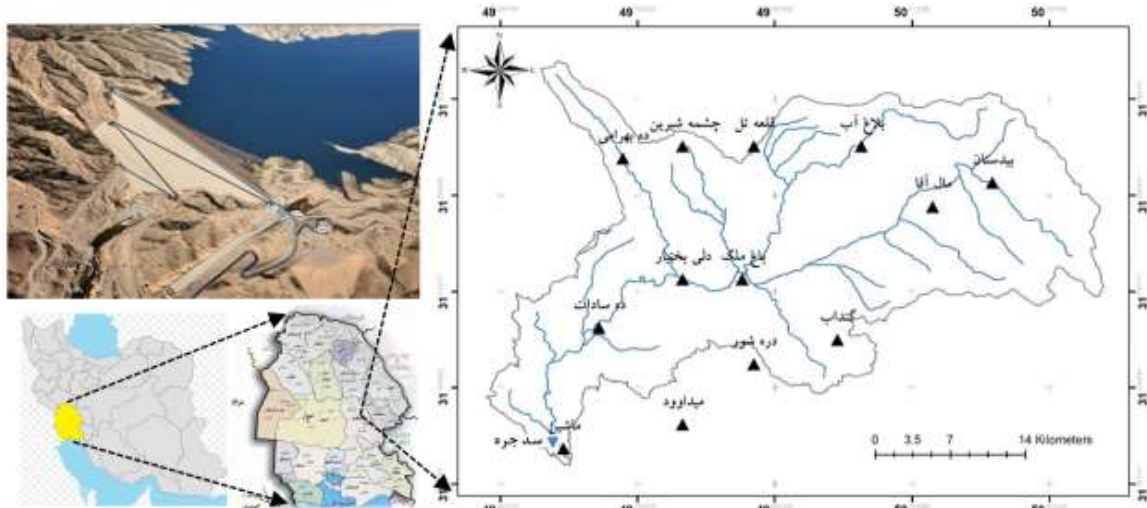
استراتژی جریمه ای از متداولترین تکنیک های مورد استفاده برای سر و کار داشتن با جواب های غیرموجه است که در آن ابتدا محدودیت های مسأله در نظر گرفته نمی شوند. پس برای هر تخلف از محدودیت ها یک جریمه اختصاص داده می شود که این جریمه در تابع هدف قرار می گیرد. به عبارتی روش جریمه جهت نگه داشتن تعداد معینی از جواب های غیرمجاز در هر نسل به کار می رود به نحوی که جستجوی ژنتیک را از هر دو ناحیه مجاز و غیرمجاز به سمت جواب بهینه هدایت می کند. نکته ای که در روش جریمه وجود دارد این است که یک جواب غیرموجه به سادگی حذف نمی شود زیرا ممکن است در ژن های آن اطلاعات مفیدی وجود داشته باشد که با اندکی تغییر به جواب بهینه تبدیل شود. مسأله اصلی در این روش چگونگی انتخاب یک مقدار مناسب برای مقدار جریمه است تا در حل مسائل به ما کمک نماید. در این پژوهش برای تضمین ارضای قیدهای حجم مخزن از تابع جریمه زیر استفاده می شود:

$$\left\{ \text{If } S_t < S_{\min} \text{ or } S_t > S_{\max} \Rightarrow PF = A' \times \left( \frac{S_{\min} - S_t}{S_{\max} - S_{\min}} \right)^2 + B' \right\} \quad (14)$$

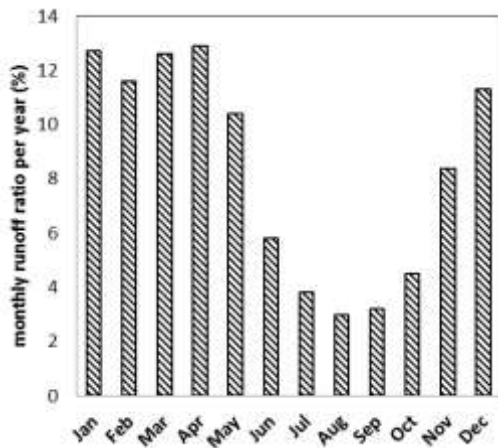
که در آن  $A'$  و  $B'$  مقادیر ثابت و مثبت هستند که در تابع جریمه استفاده شده اند.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

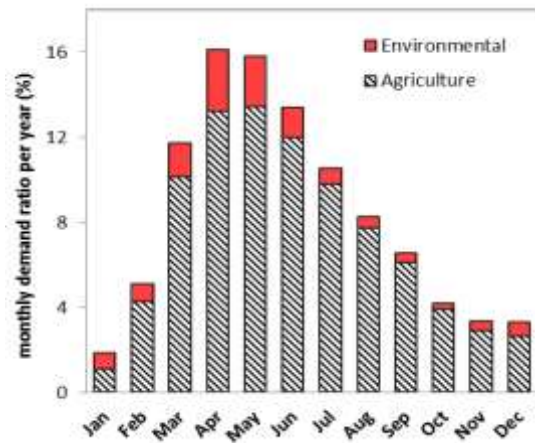
در این تحقیق محدوده ی مطالعاتی شامل سد جژه در پایین دست حوضه رودخانه رود زرد در جنوب غربی ایران واقع شده است. رودخانه زرد یکی از شاخه های مهم رودخانه اله بوده و با شبکه رودخانه ای متراکم در شهر باغملک (جانکی) شهرستان ایذه واقع گردیده است. شاخه ی اصلی و اولیه آن به نام ابوالعباس یا بولوان نامیده می شود و از دامنه های شرقی سفید کوه و کوه منگشت سرچشمه می گیرد و در بستری کوهستانی و از دره های تنگ و باریک ابتدا به شمال غربی امتداد می یابد تا در نزدیکی روستای رودزرد با رودخانه اعلاء تلاقی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سد جره  
Fig. 1. Geographical location of the Jareh dam



شکل ۳. توزیع رواناب ماهانه نسبت به آورد سالانه  
Fig. 3. Distribution of monthly runoff relative to annual runoff



شکل ۲. توزیع نیاز ماهانه نسبت به کل نیاز سالانه  
Fig. 2. Distribution of monthly demand relative to annual requirement

بین وقوع حداکثر نیازها و رواناب ورودی به مخزن، می توان دریافت که مدیریت بهینه مخزن در کاهش آسیب پذیری و توسعه پایدار بسیار حائز اهمیت خواهد بود. میزان متوسط تبخیر سالانه با استفاده از آمار بلند مدت ایستگاه تبخیر سنجی در محل سد حدود ۲۷۰۰ میلیمتر بدست آمده است که توزیع آن در ماه های سال در جدول (۱) آمده است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش

داده های ۹ ایستگاه هواشناسی موجود در حوضه ی آبریز رود زرد به نام های باغمלק، گنداب، چشمه شیرین، قلعه تل، مال آقا،

می کند. شکل (۲) نیز نسبت توزیع نیاز ماهانه در یک سال را به تفکیک هر ماه ارائه می کند. بیشترین نیازها مربوط به فصل بهار و اوایل فصل تابستان (Mar-Jul) با حدود ۶۷ درصد از نیاز سالانه است. نیاز کشاورزی حدود ۸۷ درصد از کل نیاز سالانه بوده که بیانگر پتانسیل بالای منطقه در توسعه کشاورزی و اشتغال زایی است. براساس آمار بلند مدت ثبت شده در ایستگاه ماشین میانگین ۲۰ ساله رواناب ماهانه ورودی به مخزن سد جره در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۳) نیز توزیع رواناب ورودی به مخزن را در هر ماه نسبت به آورد سالانه نشان می دهد. بیشترین رواناب ورودی مربوط به اواخر پاییز تا اوایل بهار (Nov-Apr) با حدود ۶۹ درصد از کل رواناب سالانه است. با توجه به شکل های (۲) و (۳) و اختلاف زمانی



جدول ۳. متوسط تغییرات دما و بارش سالانه درحوضه رود زرد

Table 3. Changes average of annual temperature and rainfall in Zard river basin

درصد تغییرات بارش سالانه (%)		تغییرات دمای سالانه (درجه)		سناریو انتشار
۲۰۷۰-۲۰۹۴	۲۰۲۰-۲۰۴۴	۲۰۷۰-۲۰۹۴	۲۰۲۰-۲۰۴۴	
-۱۳/۱۹	-۱۵/۵۱	+ ۰/۷۸	+ ۰/۷۹	Rcp <sub>۲,۶</sub>
-۱۹/۹۴	-۱۷/۱۲	+ ۱/۸۵	+ ۱/۴۶	Rcp <sub>۴,۵</sub>
-۱۹/۱۸	-۱۴/۷	+ ۲	+ ۰/۸۹	Rcp <sub>۸,۵</sub>

جدول ۴. درصد تغییر بارش سالانه تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

Table 4. Percentage change in annual rainfall under different climate change scenarios

مدل					Rcp	دوره
bcc	GFDL	MPI-LR	MPI-MR	mri		
-۱۵/۲۷	-۲۰/۷	-۱۲	-۱۳/۸	-۱۵/۸	۲,۶	۲۰۴۴-۲۰۲۰
-۱۵/۲۲	-۲۳/۷	-۲۲/۸	-۱۸/۳	-۵/۶	۴,۵	
-۲۲/۳۶	-۲۵/۴	-۱۵/۱	-۵/۷	-۴/۹	۸,۵	
-۱۳/۷۶	-۲۱/۶	-۱۸	-۴/۲	-۸/۴	۲,۶	۲۰۹۴-۲۰۷۰
-۲۸/۵۲	-۲۷/۹	-۲۰/۷	-۱۲	-۱۰/۶	۴,۵	
-۲۴/۱۸	-۲۶/۸	-۲۴/۸	-۱۵/۴	-۴/۷	۸,۵	

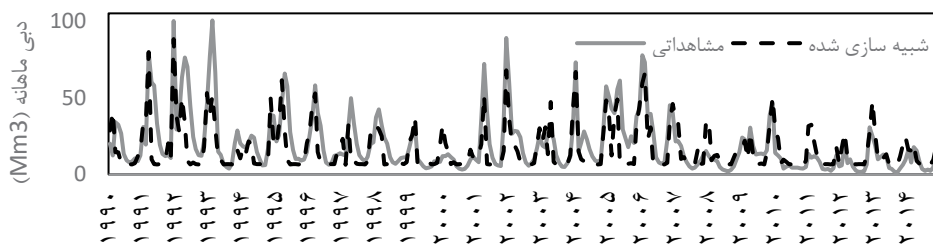
بارش سالانه در دوره های آتی کاهش پیدا خواهد کرد، اگرچه رفتار سناریوها با هم تفاوت دارد. با این وجود با افزایش انتشار گازهای گلخانه ای سرعت کاهش ها در اغلب سناریوها بیشتر خواهد شد. ازطرفی بیشترین کاهش مربوط به ماه های پربارش بوده و میزان بارش در تابستان ها تغییر چندانی ندارد. بیشترین درصد تغییرات در دوره ی (۲۰۲۰-۲۰۴۴) مربوط به سناریوی Rcp<sub>۸,۵</sub> مدل GFDL با کاهشی معادل ۲۵/۴ درصد و در دوره ی (۲۰۹۴-۲۰۷۰) مربوط به سناریوی Rcp<sub>۴,۵</sub> مدل ۱-bcc-csm۱ با کاهشی معادل ۳۱/۵ درصد است. بطورکلی میزان بارش سالانه حوضه آبریز برای هر دو دوره آتی به ترتیب به میزان ۱۵/۸ و ۱۷/۴ درصد کاهش خواهد یافت.

#### ۲-۴- سناریوهای رواناب ورودی به مخزن

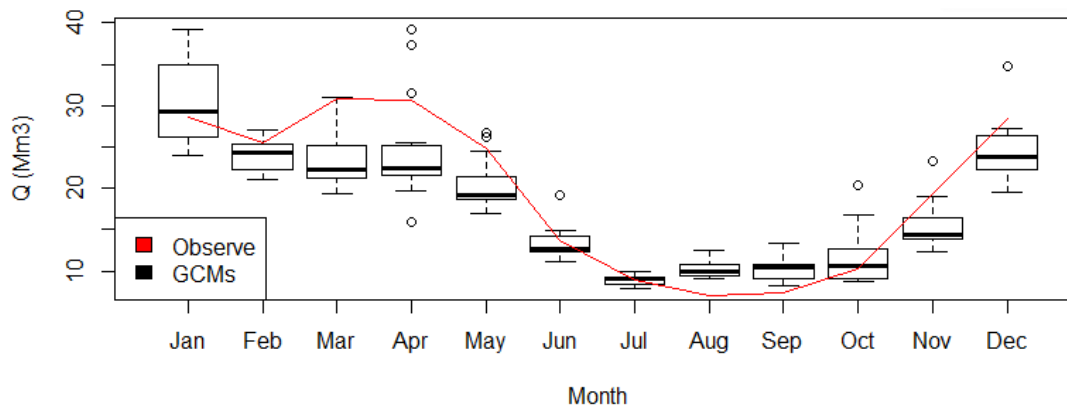
ابتدا مدل شبکه عصبی برای دوره پایه آموزش و اعتبارسنجی شد. ورودی شبکه عصبی داده های بارش ثبت شده در ۹ ایستگاه بارانسنجی است که براساس داده های دبی ثبت شده در ایستگاه آب سنجی ماشین مدل شبکه عصبی ساخته شده است. شکل (۴) مقادیر شبیه سازی شده توسط شبکه عصبی در دوره پایه نشان می دهد. پس از صحت سنجی شبکه عصبی آموزش دیده مقادیر

دره شور، دلی بختیار، ده سادات و بلاغ آب (شکل ۱) با طول دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) به عنوان داده های مشاهداتی در مدل ریزمقیاس نمایی و شبیه سازی رواناب مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجائیکه ۵ مدل CMIP۵ و سه سناریو انتشار در این مطالعه مد نظر است، بنابراین ۱۵ سناریو اقلیمی با استفاده از مدل ریزمقیاس تولید می شود. نتایج داده های ریزمقیاس شده برای دو دوره آتی نشان می دهد که متوسط دمای حوضه آبریز بین ۰/۷۸ تا ۲ درجه افزایش پیدا می کند (جدول ۳). این دامنه افزایشی با مقایسه مطالعات ذکر شده در مرجع [۷] قابل انتظار خواهد بود. میزان تغییرات دما با توجه به سناریوها اغلب افزایش دما را پیش بینی می کنند اما در برخی موارد نیز روند مشخصی را نشان نمی دهد که این مقادیر با توجه به نوع مدل و سناریوی انتشار گازهای گلخانه ای متفاوت است. البته با افزایش انتشار گازهای گلخانه ای میزان افزایش دما شدت بیشتری دارد که این موضوع در دوره آتی ۲۰۷۰-۲۰۹۴ مشهود است (جدول ۳). میانگین افزایش دما در هر دو دوره آتی در سطح حوضه آبریز نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱ و ۱/۵ درجه خواهد بود.

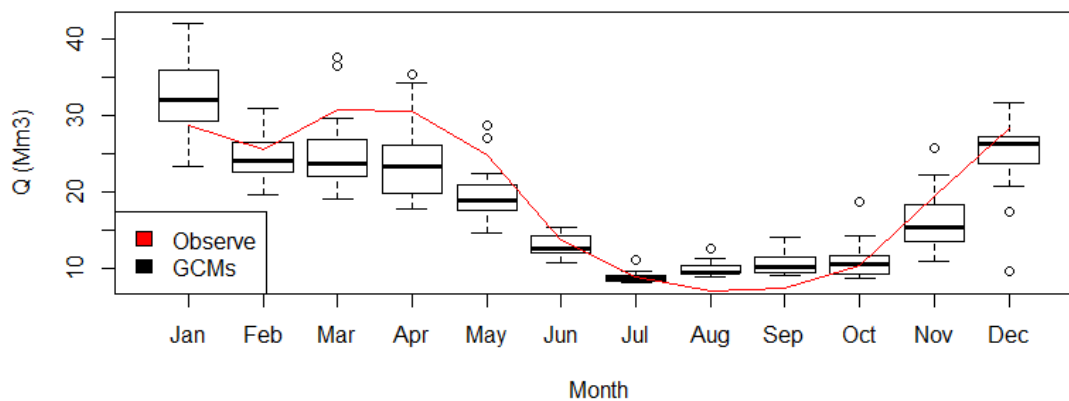
جدول (۴) تغییرات بارش سالانه را در سطح حوضه آبریز تحت ۱۵ سناریوی تغییر اقلیم نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که میزان



شکل ۴. مقادیر شبیه سازی شده دبی توسط شبکه عصبی و مقادیر مشاهداتی  
Fig. 4. Simulated runoff values by ANN and observed values



شکل ۵. رواناب شبیه سازی شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌ی (۲۰۲۰-۲۰۴۴)  
Fig. 5. Simulated runoff under climate change scenarios in 2020-2044 period



شکل ۶. رواناب شبیه سازی شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌ی (۲۰۷۰-۲۰۹۴)  
Fig. 6. Simulated runoff under climate change scenarios in 2070-2094 period

سناریوی تغییر اقلیم در اکثر ماه‌ها نسبت به دوره‌ی پایه کاهش را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش مربوط به ماه‌های مارس و آوریل است که مربوط به بارش‌ها بهاری و جریان حاصل از ذوب برف است. این موضوع نشان می‌دهد که در دوره آبی به طور حتم بارش‌های برف کاهش چشمگیری در این منطقه خواهد داشت. این درحالیست که بارش‌های تابستانه مانند دوره مشاهداتی بوده و در دوره آبی تابستان‌ها خشک هستند (شکل ۵).

دبی تحت ۱۵ سناریو تغییر اقلیم بارش برای دو دوره‌ی آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۴) و (۲۰۷۰-۲۰۹۴) شبیه سازی شدند.

شکل‌های (۵) و (۶) میزان دبی ماهانه ورودی به مخزن را برای دو دوره آبی نشان می‌دهد. رفتار سناریوها در یک دوره زمانی با توجه به سناریوهای RCP متفاوت است، اما در اغلب موارد نتایج به این نکته اذعان دارند که رواناب ورودی به مخزن سد در هر دو دوره کاهش می‌یابد. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۴ میزان رواناب حاصل از ۱۵

جدول ۵. درصد تغییرات میانگین سالانه رواناب شبیه سازی شده ورودی به مخزن نسبت به دوره پایه

Table 5. Percentage change in annual inflow relative to baseline period

مدل	Rcp						دوره
	میانگین	bcc	GFDL	MPI-LR	MPI-MR	mri	
	-۱۰/۹۲	-۶/۳۹	-۱۴/۴	-۱۱/۰۴	-۵/۶۲	-۱۷/۱۵	۲،۶
	-۱۱/۱۶	-۶/۶۸	-۱۴/۹۲	-۱۸/۸	-۸/۲	-۷/۲۳	۴،۵
	-۱۰/۲۲	-۱۳/۳۱	-۱۲/۸۱	-۱۲/۴۵	+۰/۵۲	-۱۳/۰۶	۸،۵
	-۵/۹۲	-۱/۵۸	-۱۰/۱۸	-۱۲/۷۸	-۰/۵	-۵/۹۲	۲،۶
	-۷/۵۲	-۹/۲۷	-۸/۸۲	-۱۷/۳۵	-۵/۶۶	-۷/۵۲	۴،۵
	-۸/۹	-۱۱/۷۳	-۱۲/۷۵	-۱۱/۸۳	-۹/۴۱	-۸/۹	۸،۵

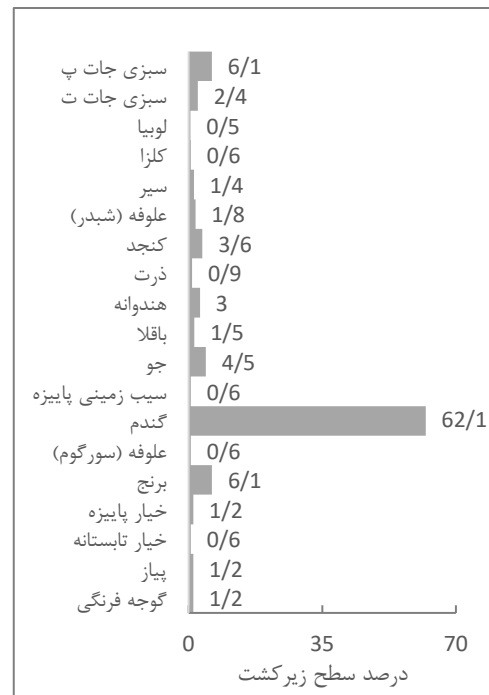
تا ۹ درصد کاهش ورودی به مخزن نسبت به دوره پایه اتفاق خواهد افتاد.

### ۳-۴- نیاز آبی پایین دست

الگوی کشت پایین دست سد براساس مطالعات میدانی تعیین شد که حدود ۶۲ درصد از زمین های تحت کشت مربوط به محصول گندم است (شکل ۷). ضریب گیاهی محصولات تحت کشت براساس مطالعات منطقه ای در طول دوره کشت تعیین [۲۴] و جهت محاسبه نیاز آبی در دوره پایه و آبی وارد نرم افزار Cropwat شد. براساس سناریوهای دما و بارش در دوره پایه و آبی برای ایستگاه رامهرمز به عنوان ایستگاه معرف منطقه پائین دست سد، میزان نیاز آبی خالص توسط رابطه FAO-PM شبیه سازی شد. سپس با فرض راندمان مصرف در دوره پایه و نیاز زیست محیطی ثابت، میزان نیاز آبی پایین دست محاسبه شد. با توجه به نیاز آبی سالانه ۳۳۸ میلیون مترمکعب در دوره پایه، میزان افزایش نیاز آبی تحت ۱۵ سناریو تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه در جدول (۶) ارائه شده است. بیشترین افزایش نیاز آبی نسبت به شرایط پایه مربوط به سناریوی RCP۸،۵ مدل (GFDL-CGCM) به میزان ۲۹ درصد است. بطور میانگین نیاز پایین دست برای هر دو در دوره آبی به ترتیب ۱۸/۸ و ۲۰/۸ درصد افزایش پیدا می کند.

### ۴-۴- بهره برداری مخزن در شرایط تغییر اقلیم

مدل بهینه ساز توسعه داده شده برای چهار سناریو بهره وری آب (S1 تا S4) تحت ۱۵ سناریو تغییر اقلیم و یک سناریوی دوره پایه شامل سری زمانی دبی ورودی به مخزن و نیاز پایین دست اجرا



شکل ۷. الگوی کشت منطقه پائین دست سد جره (درصد)

Fig. 7. Cropping pattern in downstream of Jareh Dam (%)

در دوره آبی ۲۰۷۰-۲۰۹۴ متوسط رواناب شبیه سازی شده ماهانه در اکثر سناریوها به جز ماه ژانویه کاهش خواهد یافت که بیشترین کاهش نیز مربوط به فصل بهار است (شکل ۶). برای نشان دادن میزان تغییرات در هر سناریو در دو دوره آبی درصد تغییرات رواناب در جدول (۵) ارائه شده است. دامنه تغییرات رواناب سالانه پیش بینی شده تحت سناریوهای مختلف به طور متوسط بین ۱۸/۸۰- تا ۳/۴۹+ درصد است. با این وجود متوسط تغییرات در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ بین ۱۰ تا ۱۱ درصد و در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۴ بین ۶

جدول ۶. درصد افزایش نیاز آبی سالانه پایین دست سد نسبت به دوره پایه

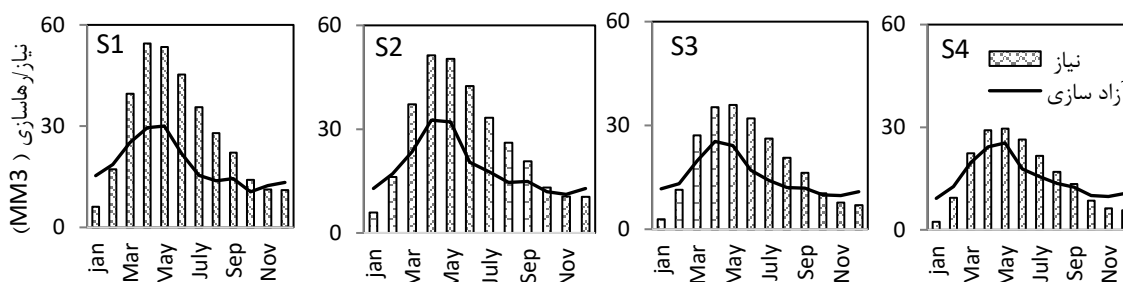
Table 6. Increase percentage of downstream requirements relative to baseline period

دوره	Rcp	مدل				
		mri	MPI-MR	MPI-LR	GFDL	bcc
۲۰۴۴-۲۰۲۰	۲,۶	۱۷	۲۴/۲	۲۱/۹	۲۳/۱	۱۸
	۴,۵	۱۵/۹	۲۰/۴	۱۹/۲	۱۷/۵	۱۸
	۸,۵	۱۸/۶	۱۳/۸	۱۳/۱	۲۳/۱	۲۰
۲۰۹۴-۲۰۷۰	۲,۶	۱۴/۴	۲۴/۸	۱۷/۷	۱۶/۴	۱۹
	۴,۵	۱۵/۸	۲۰	۲۴/۴	۲۱/۱	۲۲/۹
	۸,۵	۲۱/۷	۱۴/۳	۲۳/۴	۲۹	۲۶/۳

جدول ۷. دامنه تغییرات مقادیر تابع هدف تحت ضرایب بهره وری مختلف

Table 7. Changes range of objective function values under different water efficiency coefficient

دوره	ضریب بهره‌وری		
	۰	۰/۱	۰/۳
پایه	۶۰/۶۶	۵۳/۵۵	۴۸/۸
۲۰۴۴-۲۰۲۰	۶۹/۶۵-۸۱/۱۱	۶۶/۶۰-۰۴/۰۱	۵۷/۴۹-۴۸/۵۴
۲۰۹۴-۲۰۷۰	۷۰/۶۲-۶۷/۶	۶۵/۵۳-۵۷/۰۹	۵۳/۴۳-۴۵/۱



شکل ۸. آزاد سازی و نیاز پایین دست تحت سناریوهای بهره وری مختلف در دوره پایه

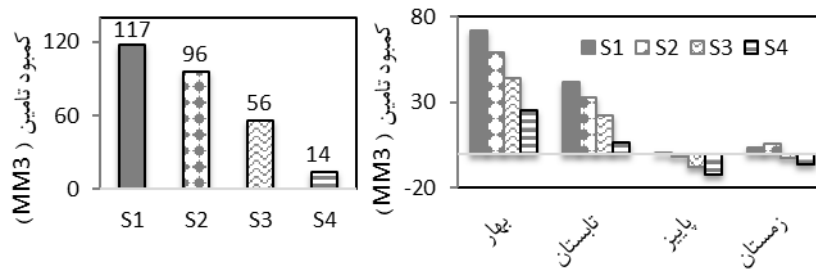
Fig. 8. Release and downstream requirements under different efficiency scenarios in baseline period

ازای سناریوها S1 تا S4 در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش ضریب بهره وری آب از میزان عدم تامین آب کاسته می‌شود، که این موضوع در ماه‌های با میزان نیاز بالا مشهودتر است.

شکل (۹) میزان تغییرات کمبود تامین آب را به ازای سناریوهای مختلف بهره وری بصورت سالانه و فصلی نشان می‌دهد. میزان کمبود تامین آب از میزان ۱۱۷ میلیون مترمکعب در سال در سناریو S1 به ۱۴ میلیون مترمکعب در سناریو S4 کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش راندمان مصرف از ۳۰/۴ به ۴۷/۱۵ حدود ۱۰۳ میلیون مترمکعب از کمبود تامین آب جبران خواهد شد. این موضوع نشان

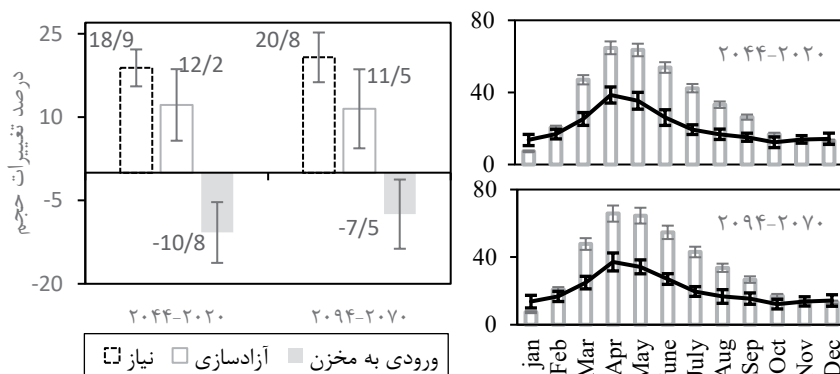
شد. جدول (۷) مقادیر تابع هدف را برای دوره پایه به ازای ضرایب بهره وری مختلف ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب بهره وری مقدار تابع هدف کاهش پیدا می‌کند. این موضوع حاکی از این است که مدل ارائه شده با توجه به تابع هدف حداقل سازی در جهت بهینه سازی عمل خواهد کرد.

برای بررسی میزان تأثیر سناریوهای افزایش ضریب بهره وری، مقدار آب تخصیص یافته به پایین دست در دوره پایه توسط مدل بهینه ساز به ازای سناریو میانگین دبی ورودی به مخزن بهینه گردید. شکل (۸) میزان آب آزادسازی شده از مخزن و نیاز پایین دست را به



شکل ۹. میزان کمبود تامین آب سالانه و فصلی تحت سناریوهای بهره‌وری مختلف در دوره پایه

Fig. 9. Annual and seasonal water deficit values under different efficiency scenarios in baseline period



شکل ۱۰. درصد تغییر ورودی به مخزن، آزادسازی و نیاز در دوره های آتی نسبت به دوره پایه

Fig. 10. Percentage change in inflow, release and demand in the future periods relative to baseline period

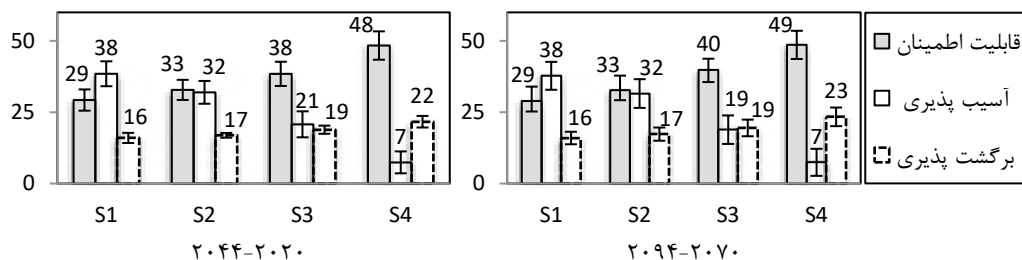
ارائه یک راهکار سازگاری با اثرات تغییر اقلیم که همان کاهش ۷/۵ تا ۱۰/۸ درصدی رواناب های ورودی به مخزن است، اجتناب ناپذیر خواهد بود. میزان نیاز پایین دست و آب تخصیص یافته در هر ماه نیز در شکل (۱۰) برای هر دو دوره آتی ارائه شده است. آنچه مشهود است رفتار مدل در بهینه سازی تخصیص ماهانه در هر دو دوره آتی مشابه هم بوده و تنها میزان تخصیص ها با توجه به تفاوت نیازها در هر دوره متفاوت است.

به منظور بررسی اثر افزایش بهره وری آب در سازگاری با اثرات تغییر اقلیم و حفظ پایداری سیستم مخزن در تامین آب مورد نیاز در دوره های آتی، معیارهای عملکردی سیستم مخزن شامل اطمینان پذیری [۲۵]، برگشت پذیری یا انعطاف پذیری [۲۶] و آسیب پذیری [۲۷] به ازای سناریوهای مختلف بهره وری در هر دو دوره آتی محاسبه شد (شکل ۱۱).

قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری سیستم در هر دو دوره آتی با افزایش ضریب بهره وری به ترتیب حدود ۲۰ و ۷ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. از طرفی آسیب پذیری سیستم در هر دو دوره آتی حدود

می دهد که در صورت کاهش دبی ورودی به مخزن در دوره آتی به میزان ۱۰۳ میلیون مترمکعب در سال، تنها با افزایش ۱۶/۷۵ درصدی راندمان مصرف پایین دست می توان از اثرات سوء این کاهش رواناب به دلیل اثرات تغییر اقلیم احتمالی جلوگیری کرد. همچنین بیشترین کاهش کمبودها مربوط به فصول بهار و تابستان به دلیل کشت محصولات کشاورزی است.

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم در دوره های آتی، نتایج مدل بهینه ساز برای سناریوی S1 در دوره های آتی با نتایج همین سناریو در دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۱۰) درصد تغییرات حجم آزادسازی، نیاز پایین دست و ورودی به مخزن در دوره های آتی را نسبت به دوره پایه نشان می دهد. با توجه به کاهش دبی ورودی و افزایش نیاز در دوره های آتی، میزان آزاد سازی در هر دو دوره به منظور جبران کمبودها افزایش پیدا می کند. این نشان می دهد که مدل بهینه ساز در رسیدن به جواب بهینه به خوبی عمل کرده است. از طرفی این افزایش آزادسازی نشان دهنده کاهش اطمینان پذیری سیستم مخزن به دلیل افزایش نیازها است. بنابراین



شکل ۱۱. شاخص های عملکردی مخزن به ازای سناریوهای بهره وری مختلف در دوره های آتی

Fig. 11. Reservoir performance indices considering different efficiency scenarios in the future periods

اما این کاهش رواناب ورودی در منطقه مورد مطالعه درحالیست که نیاز پایین دست در دو دوره آتی به ترتیب افزایشی به میزان ۱۸/۹ و ۲۰/۸ درصد را تجربه خواهد کرد. بنابراین برای حفظ پایداری سیستم مخزن در تخصیص آب و کمک به توسعه پایدار، شبکه آبیاری پایین دست بایستی خود را سازگار با شرایط آینده کند. یکی از روش های سازگاری مدیریت صحیح آب در شبکه است، که مدل توسعه داده شده در این تحقیق میزان اثر بخشی افزایش بهره وری آب در پایین دست را بر نحوه تخصیص آب از مخزن را فراهم می آورد. در صورت افزایش راندمان از ۳۰ به ۴۷ درصد در شبکه آبیاری پایین دست میزان اعتمادپذیری به سیستم مخزن از ۲۹ درصد به ۴۹ درصد در شرایط تغییر اقلیم (کاهش رواناب و افزایش نیاز) افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش اعتمادپذیری منجر به حداقل شدن اثرات سوء اجتماعی-اقتصادی تغییر اقلیم در منطقه و جلوگیری از بروز تنش های آبی خواهد شد. حال بایستی بررسی کرد که این افزایش اعتماد پذیری تا چه حد به توسعه پایدار منابع آب و شرایط اقتصادی-اجتماعی منطقه کمک خواهد کرد و آیا هزینه افزایش راندمان مصرف در پایین دست را توجیه خواهد کرد. اما باید توجه داشت که اتخاذ این روش سازگاری یکی از راه حل های اجتناب ناپذیر برای مناطق خشک و نیمه خشک خواهد بود.

#### منابع

- [1] P.S. Ashofteh, O. Bozorg Haddad, H. Akbari-Alashti, M.A. Marino, Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming, J. Irrig. Drain. Eng., 141(4) (2015) 04014059.
- [2] IPCC, Climate Change 2014 Synthesis Report. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I, II and

۳۱ درصد کاهش می یابد. شاخص پایداری سیستم [۲۸] نیز از ۳۰ درصد به ۴۷ درصد افزایش پیدا می کند. از طرفی مقایسه شاخص پایداری سیستم در دوره پایه با دوره آتی تحت سناریو S1 نشان می دهد که معیار پایداری یکسان و برابر ۳۰ درصد است. لذا راهکار سازگاری افزایش بهره وری آب علاوه بر تعدیل اثر تغییر اقلیم ناشی از کاهش رواناب ها، منجر به افزایش پایداری سیستم نیز شده است.

#### ۵- نتیجه گیری

در آینده نزدیک تنش آبی بدلیل افزایش مصرف، بهره وری پایین آب و اثرات تغییر اقلیم در بیشتر کشورها به امری عادی تبدیل خواهد شد. با اینکه امروزه بیشتر بحث ها درباره شناسایی راه های کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به عنوان عامل اصلی گرمایش زمین صورت می گیرد، اما بخش آب به طور قابل ملاحظه ای از تغییر رخ داده در اقلیم در حال و آینده، متأثر می شود. آنچه قابل تأمل و پر اهمیت است، شناسایی اقدامات سازگاری مناسب برای توانمندسازی این بخش به منظور مقابله کارا و اثربخش با این تغییرات است. از این رو، در این تحقیق با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی بهره برداری از مخزن سد جره، یک مدل بهینه ساز بر اساس ضریب بهره وری آب در پایین دست به عنوان یک روش سازگار با تغییر اقلیم توسعه داده شد که نتایج حاصله، از اثر بخشی بالا و کمک به توسعه پایدار منطقه دلالت دارند. ۱۵ سناریو تغییر اقلیم مشتق شده از مدل های CMIP5 در آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۴) میزان رواناب ورودی به مخزن حدود ۱۰/۸ درصد و در آینده دور (۲۰۷۰-۲۰۹۴) حدود ۷/۵ درصد کاهش می یابد. کاهش رواناب ورودی در دوره آتی بویژه افق ۲۱۰۰ در حوضه دیگر ایران مانند سد دز [۹]، سد علویان [۹] و حوضه رودخانه خرم آباد [۱۲] بین ۱۳ تا ۲۹/۵ درصد پیش بینی شده است.



- Basin, Iran. *journal of hydrologic engineering*, 24(7) (2019) 5584.
- [12] N.K. Nektarios, D. Zoi, P.K. George, Statistical analysis and ANN modeling for predicting hydrological extremes under climate change scenarios: The example of a small Mediterranean agro-watershed. *Journal of Environmental Management*. 154 (2015) 86-101.
- [13] J. Farajzadeh, A.F. Fard, Lotfi, S., Modeling of monthly rainfall and runoff of Urmia lake basin using “feed-forward neural network” and “time series analysis” model, *Water Resources and Industry*, 7(8) (2014) 38–48.
- [14] A. Sarkar, R. Kumar, Artificial Neural Networks for event based rainfall-runoff modeling. *Journal of Water Resource and Protection*, 4 (2012) 891-897.
- [15] U. Surendran, C.M. Sushanth, G. Mammen, E.J. Joseph, Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustainable water resource management: A case study in Palakkad district of humid tropical Kerala, India. *Water Management (Agriculture) Division, Centre for Water Resources Development and Management, Kunnamangalam*, 2015.
- [16] T. Rezaiei, L.S. Pereira, Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran, *Agricultural Water Management*, 121 (2013) 1– 18.
- [17] G. Stancalie, A. Marica, L. Toullos, Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration, *Physics and Chemistry of the Earth*, 35 (2012) 25–30.
- [18] X. Wang, Q. Cui, S. Li, An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, northern China, *Resources, Conservation and Recycling* 69 (2012) 57– 65.
- [19] M. Ehtram, H. Karami, S.F. Mousavi, A. ElShafie, Z. Amini, Optimizing dam and reservoirs operation based model utilizing shark algorithm approach. *Knowledge-Based Systems*, S0950-7051(17) (2017) 30039-4.
- [20] T. Lafon, S. Dadson, G. Buys, C. Prudhomme, Bias III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In: R. Pachauri and L. Meyer (eds). Geneva, Switzerland, 2014.
- [3] P.S. Ashofteh, O. Bozorg Haddad, M.A. Mariño, Climate change impact on reservoir performance indices in agricultural water supply, *J. Irrig. Drain*. 2013 139(2) (2013) 19434774.
- [4] S. Khanjari Sadati, S. Speelman, M. Sabouhi, M. Gitizadeh, B. Ghahraman, Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions, *Water*, 6 (10) (2014) 3068-3084.
- [5] M. Chiyuan, D. Qingyun, S. Qiaohong, H. Yong, K. Dongxian, Y. Tiantian, Y. Aizhong, D. Zhenhua, G. Wei, Assessment of CMIP5 climate models and coupled with singular spectrum analysis, *Journal of Hydrology*, 399 (2014) 394–409.
- [6] A. Aghakhani, H. Hasanzadeh, Y. Besalatpour, M. Pourreza-Bilondi, Climate change forecasting in a mountainous data scarce watershed using CMIP5 models under representative concentration pathways, *Theoretical and applied climatology*, 129 (1-2) (2017) 683-699.
- [7] J. Rahimi, A. Malekian, A. Khalili, Climate change impacts in Iran: assessing our current knowledge, *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1-2) (2019) 545–564.
- [8] H. Akbari-Alashti, A. Soncini, Y. Dinpashoh, A. Fakheri-Fard, S. Talatahari, D. Bocchiola, Operation of two major reservoirs of Iran under IPCC scenarios during the XXI Century, 32(12) (2018) 3254-3271.
- [9] A. Sarhadi, D.H. Burn, F. Johnson, R. Mehrotra, A. Sharma, Water resources climate change projections using supervised nonlinear and multivariate soft computing techniques. *Journal of Hydrology*, 536 (2016) 119–132.
- [10] G.M. Bombelli, A. Soncini, A. Bianchi, D. Bocchiola, 2019. Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps. *Hydrological Processes*, 10 (1-2) (2019) 13473.
- [11] S.H. Moghadam, P.S. Ashofteh, H.A. Loáiciga, Application of climate projections and monte Carlo approach for assessment of future river flow: Khorramabad River

- province, Iran Meteorological Organization-Ministry of Agriculture-Jehad, Iran, 7 (2003) (In Persian).
- [25] T.A. McMahon, J. Adebayo, Z. Sen-Lin, Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324 (2006) 359–382.
- [26] P.S. Ashofteh, Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with multiobjective genetic programming, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141 (11) (2015) 04015030.
- [27] D.P. Loucks, E. van Beek, *Water resources systems planning and management*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France, 2005.
- [28] S. Sandoval-Solis, D.C. McKinney, D.P. Loucks, Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5) (2011) 381-390.
- correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods, *International journal of climatology*, 33 (2013) 1367-1381.
- [21] F. Helfer, C. Lemckert, H. Zhang, Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*, 475 (2012) 365–378.
- [22] A. Hosseinizadeh, H. Zarei, A.M. Akhondali, H. Seyed kaboli, B. Farjad. Potential impacts of climate change on groundwater resources: A multi-regional modelling assessment. *Journal of Earth System Science*. 128(5) (2019) 355-365.
- [23] E.T. Linacre, A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone, *Agricultural Meteorology*, 18 (1977) 409-424.
- [24] A. Alizadeh, Optimization of the document of national water in agriculture water consumption, Khozestan

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.M. Mosavi, H. Seyed Kaboli, *Optimal operation of reservoirs with increasing water use efficiency: Climate change adaptation approach (case study: Jareh Dam)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3043-3058.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16494.6252](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16494.6252)

