

بررسی شاخص انعطاف پذیری سامانه مخزن در شرایط تغییر اقلیم در تأمین بهینه آب

پریسازادات آشفته

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم، قم

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۶/۲۵)

چکیده

شاخص انعطاف پذیری بیانگر چگونگی وضعیت تأمین آب است، به گونه‌ای که با افزایش این شاخص وضعیت سامانه تأمین آب بهتر خواهد بود و دوره‌های بحرانی با کم‌ترین خطر سپری خواهند شد. هدف از این تحقیق، ارزیابی شاخص انعطاف‌پذیری سامانه مخزن قرنقو (آذربایجان شرقی) در شرایط تغییر اقلیم (۲۰۴۰-۲۰۶۹) برای سه وضعیت ۱۰۰، ۸۵ و ۷۰ درصد تأمین تقاضای آب، به منظور شناسایی و مدیریت دوره‌های بحرانی می‌باشد. پیش‌پردازش‌های اقلیمی تحقیق حاضر توسط Hadcm3 (سناریوی انتشار A2) انجام می‌گیرد که به‌عنوان ورودی به مدل‌های شبیه‌سازی آبدهی به مخزن (IHACRES) و مدل تقاضای آب (Cropwat) هستند. نتایج نشان می‌دهد که متوسط حجم آورد سالانه درازمدت رودخانه در دوره آتی ۳۰ ساله، ۲۵ درصد نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) کاهش می‌یابد. در حالی که به‌طور متوسط حجم تقاضای سالانه آب پایین‌دست سد ۲۰ درصد نسبت به دوره پایه، افزایش می‌یابد. در ادامه، به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن با هدف تأمین آب، تابع هدفی به‌صورت کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای ماهانه تعیین می‌شود. بدین منظور، برای حل مسئله به‌وسیله روش NLP از نرم‌افزار LINGO 11.0 استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که در شرایط تغییر اقلیم برای وضعیت اول (با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز) نسبت به پایه، شاخص انعطاف‌پذیری کاهش (۲۰ درصد) خواهد یافت. این کاهش برای وضعیت‌های دوم و سوم، به‌ترتیب ۱۶ و ۲ درصد هستند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم؛ نرم‌افزار LINGO 11.0؛ بهره‌برداری از مخزن؛ شاخص انعطاف‌پذیری.

مقدمه

بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر در میانگین متغیرهای اقلیمی و همچنین مقادیر حدی آن نسبت به مقادیر متناظر گذشته در حال افزایش است (IPCC, 2007). این پدیده که به آن تغییر اقلیم اطلاق می‌شود، می‌تواند بر بخش‌های مختلف از جمله منابع و مصارف آب تأثیر بگذارد.

در ارزیابی اثرات منطقه‌ای تغییر اقلیم، تولید سری زمانی سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی ضروری است. برای این منظور از خروجی مدل‌های جفت شده گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس (Atmospheric-Ocean General Circulation Model, AOGCM) استفاده می‌شود (Wilby and Harris, 2006). همچنین بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در بحث ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و سازگاری با اثرات منفی آن، تأکید بر در نظر گرفتن همه گروه‌های ذینفع در قالب مدیریت جامع منابع آب می‌باشد (OECD, 1993). تحقیقات اندکی با این رویکرد صورت گرفته است (Boyer et al و Quinn et al (2004)).

(2010)). در ادامه پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه ارائه

شده است.

Yu et al. (2002) اثرات تغییر اقلیم بر فرآیند تبخیر و تعرق در شالیزارهای کشور تایوان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تا سال ۲۰۵۰، سه تا پنج درصد بر مقدار تبخیر و تعرق افزوده خواهد شد. Salemi and Heidari (2006) عدم مدیریت جامع و مناسب آب در حوضه آبریز زاینده‌رود و مصرف آب از طریق احداث شبکه‌های آبیاری جدید را علت افزایش تقاضای آب نسبت به تأمین در این حوضه آبریز بیان کردند. نتایج نشان داد افزایش مصرف باعث قرار گرفتن حوضه تحت تنش مداوم و کاهش حجم آب ورودی به باتلاق گاوخونی می‌گردد. بررسی سناریوهای مختلف بیان نشان داد که در صورت ادامه روند فعلی، منابع آب موجود در این حوضه قادر به تأمین تقاضا و مصرف آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب تا قبل از سال ۱۴۰۰ نخواهد بود. در سال‌هایی که متوسط بارش حوضه نرمال باشد تقاضا در این سه بخش می‌تواند رشد اندکی داشته باشد اما در صورت بروز خشک‌سالی سهم بخش آب کشاورزی باید کاهش چشم‌گیری یابد. Ashofteh and Bozorg Haddad (2014) منحنی‌های فرمان مخزن آیدوغموش را تحت

شرایط تغییر اقلیم توسط برنامه‌ریزی ژنتیک استخراج نمودند. تابع هدف به کاررفته، کمینه نمودن مجموع مجذور کمبودهای نسبی ماهانه در تخصیص تقاضای آب در شرایط تغییر اقلیم بود. بررسی‌ها نشان داد که سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در شرایط تغییر اقلیم باید تغییر کنند. Krol *et al.* (2011) با انجام تحقیقی در شمال غرب برزیل نشان دادند تأثیر تغییر اقلیم بر میزان دسترسی به آب بسیار شدید است. همچنین تغییر اقلیم بر توزیع آب در دسترس از مخازن کوچک ممکن است تأثیرات شدیدتری بر جمع‌آوری آب از مخازن بزرگ داشته باشد. آنها - همچنین نشان دادند تأثیر مخازن کوچک در دسترسی به آب نسبت به مخازن بزرگ به احتمال زیاد مهم‌تر است و به‌طور نسبی و مطلق تحت اثر تغییر اقلیم کاهش می‌یابد. Santamarta *et al.* (2014) چالش‌های جدید در جزایر را در ارتباط با تغییر اقلیم و آب بررسی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که تغییر اقلیم منجر به تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت فراوانی وقایع مرتبط با آب مانند سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها خواهد شد که تأثیر مستقیمی بر کمیت و کیفیت منابع آب به‌خصوص در جزایر خواهد داشت. Yan *et al.* (2015) اثر تغییر اقلیم بر دبی فصلی و جریان حدی را بررسی نمودند. ایشان مدل ظرفیت نفوذ متغیر (Variable Infiltration Capacity, VIC) و پنج مدل اقلیمی را تحت سناریوهای IPCC (یعنی RCP4.5 و RCP8.5) برای ارزیابی استفاده نمودند. مطالعات قبلی بر روی دبی سالانه و وقایع حدی سیلاب در حوضه آبریز، تمرکز داشت. البته ارزیابی تغییرات در جریان‌های کم هم مهم بود، زیرا حوضه از کمبود آب و وجود نمک در فصل خشک آسیب دیده بود. نتایج، کاهش را در متوسط جریان کم تحت پنج مدل اقلیمی نشان دادند که این مقدار کاهش در سطح حوضه برای RCP4.5 از شش تا ۴۸ درصد متغیر بود. در فصول بارندگی، دبی رودخانه در بازه میانی و پایینی رودخانه افزایش و در بازه بالایی رودخانه کاهش یافت. بررسی‌ها نشان داد که تغییر دبی رودخانه، تنش آبی را تشدید نمود. Chen *et al.* (2016) یک نسخه بهبودیافته از NSGA-II، بنام c-NSGA-II را با استفاده از عملگرهای متعدد در نظر گرفتند. سپس برای بهره‌برداری از مخزنی در جنوب غربی چین بکار رفت. برای ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی سه شاخص (همگرایی، تنوع و شاخص بیشینه حجم) استفاده شد. نتایج نشان داد که استراتژی موازی پیشنهادشده به‌طور قابل‌توجهی کیفیت راه‌حل را در هر دو جهت همگرایی و تنوع بهبود بخشید. Zamani *et al.* (2017) رویکرد بهبودیافته‌ای را برای بررسی برگشت‌پذیری مخازن آسیب‌پذیر با استفاده از روش احتمالاتی برای مدیریت منابع آب تحت شرایط تغییر اقلیم

پیشنهاد دادند. آنها مدل بهره‌برداری مخزن را براساس کمینه‌سازی کل آب تخصیصی با استفاده از الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی توسعه دادند. نتایج، کاهش اطمینان‌پذیری و افزایش آسیب‌پذیری را برای دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه نشان دادند.

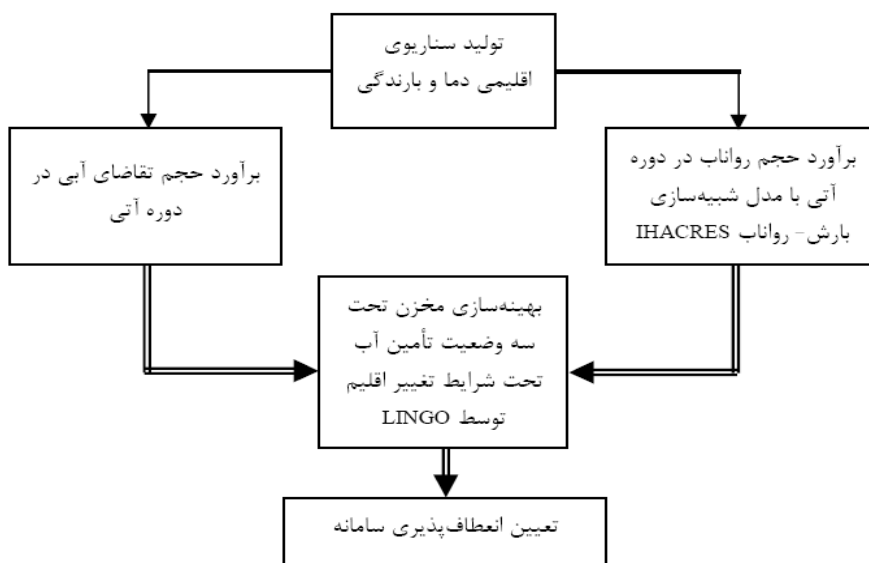
با توجه به اهمیت تولیدات کشاورزی در بحث امنیت غذایی، محاسبه میزان تقاضای آب در دسترس و نیز توزیع آن در طول سال آبی در شرایط تغییر اقلیم ضروری است. از سویی دیگر، با توجه به این که طراحی سد و نیز مدیریت مخزن با در نظر گرفتن سری‌های آماری گذشته انجام می‌گیرد، پاسخگوی شرایط تغییر اقلیم نخواهند بود. بنابراین لازم است ضمن برآورد میزان تقاضای آب و آب در دسترس در شرایط آبی، انعطاف‌پذیری سامانه مخزن مورد بررسی قرار گیرد تا در مدیریت مخزن استفاده شود.

در این تحقیق سعی شده است یک رویکرد برای مطالعه رفتار یک سامانه یکپارچه سد و شبکه در شرایط تغییر اقلیم با تأکید بر اثرگذاری بر انعطاف‌پذیری سامانه مخزن ارائه شود. بدین منظور داده‌های اقلیمی دما و بارندگی برای دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) و دوره آبی (۲۰۶۹-۲۰۴۰) با استفاده از خروجی مدل HadCM3 و تحت سناریوی انتشار A2 (به دلیل تولید بیش‌ترین گاز گلخانه‌ای و بنابراین بحرانی‌ترین سناریوی انتشار) استخراج خواهد شد. سپس تأثیر تغییر اقلیم بر آورد ورودی رودخانه به سد قرنقو (آذربایجان شرقی) واقع شده است، با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب IHACRES در دوره آبی بررسی می‌شود. همچنین بررسی تأثیر این پدیده بر نیاز آبی شبکه و به‌تبع آن تقاضای حجم آبی پایاب سد صورت خواهد گرفت. همچنین در این تحقیق اثر این پدیده بر منابع آب و تقاضای آب را تحت سه وضعیت تأمین آب ناشی از تغییر اقلیم (وضعیت اول، تأمین ۱۰۰ درصدی تقاضای آب، وضعیت دوم، تأمین ۸۵ درصدی تقاضای آب و وضعیت سوم، تأمین ۷۰ درصدی تقاضای آب) بررسی می‌شود. در ادامه، مقادیر بهینه خروجی از مخزن سد در شرایط تغییر اقلیم با رویکرد کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای ماهانه در تخصیص به تقاضا تعیین می‌گردد و انعطاف‌پذیری سامانه در شرایط بهینه‌سازی مخزن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه می‌شود. با توجه به توضیحات فوق، هدف از این تحقیق، ارزیابی شاخص انعطاف‌پذیری سامانه مخزن قرنقو در شرایط تغییر اقلیم برای سه وضعیت (۱۰۰، ۸۵ و ۷۰ درصد تأمین تقاضای آب) به‌منظور شناسایی و مدیریت دوره‌های بحرانی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این بخش روش‌های مورد نیاز برای این تحقیق که شامل معرفی منطقه طرح، تعریف وضعیت‌های مورد بررسی، پردازش داده‌های اقلیمی در دوره آبی با استفاده از مدل HadCM3 [به دلیل عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی نسبت به سایر مدل‌ها (Ashofteh and Massah Bavani,

2012)، شبیه‌سازی بارش- رواناب، برآورد حجم تقاضای آبی، بهینه‌سازی مخزن تحت سه وضعیت تأمین آب ناشی از تغییر اقلیم توسط LINGO و تعیین انعطاف‌پذیری سامانه می‌باشد، ارائه می‌شوند. مراحل انجام این تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- روندنمای انجام تحقیق

منطقه طرح

قلمرو مکانی مورد مطالعه در این مقاله حوضه آبریز قرنقو در شمال غرب ایران، در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. این حوضه در طول شرقی ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه و در عرض شمالی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه، در دامنه شرقی رشته‌کوه سه‌سهند (۴۸ کیلومتری شهرستان هشت‌رود) با وسعت ۳۵۹۰ کیلومترمربع جای گرفته است (شکل ۲). از نظر تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی ایران، این حوضه در محدوده حوضه آبریز دریای خزر و زیر حوضه‌ای از سفیدرود بزرگ به‌شمار می‌آید. رودخانه قرنقو با طول تقریبی ۱۲۰ کیلومتر با جهتی شرقی-غربی در این حوضه جریان دارد و آبدهی سالانه آن ۱۴۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. مرتفع‌ترین نقطه این حوضه، قله بزداغ با ارتفاع ۳۶۰۵ متر در شمال غرب و پست‌ترین نقطه در خروجی حوضه با ارتفاع ۱۰۴۳ متر قرار دارد. بیشینه شیب آن ۵/۳۶ درصد و کمینه شیب آن ۰/۲ درصد است.

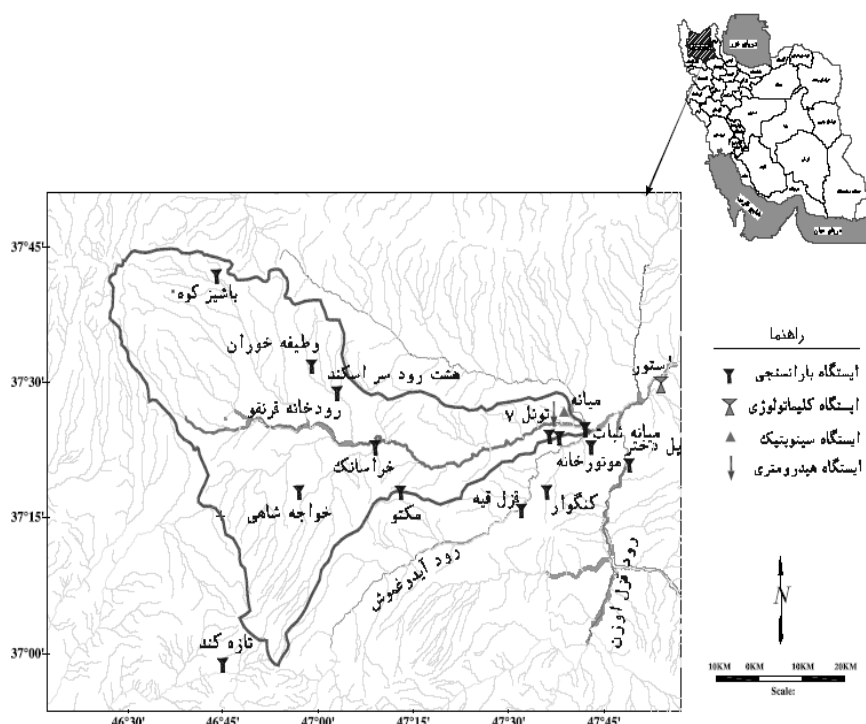
(۲۰۰۰-۱۹۷۱) را تحت پوشش را قرار می‌دهد، به توصیه سازمان ملی هواشناسی (WMO) این بازه زمانی به‌عنوان بازه پایه مدنظر قرار گرفته است. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه-های هواشناسی موجود در منطقه ارائه شده است.

در این حوضه هشت رودخانه جریان دارد که سد قرنقو در محل تلاقی دو رودخانه آلمالو و قرنقو احداث شده است. مخزن سد قرنقو دارای تراز نرمال ۱۶۰۰/۳ متر از سطح دریا است. ظرفیت کل مخزن ۱۶۵ میلیون مترمکعب، حجم مفید آن ۱۴۸ میلیون مترمکعب و حجم مرده آن ۱۷ میلیون مترمکعب است.

وضعیت‌های مورد بررسی

در این تحقیق مدل بهینه‌سازی، برای سه وضعیت ناشی از تغییر اقلیم (وضعیت اول، در نظر گرفتن اثر تغییرات توأمان حجم رواناب و حجم تقاضای آب براساس تأمین ۱۰۰ درصد، وضعیت دوم، در نظر گرفتن اثر تغییرات توأمان حجم رواناب و حجم تقاضای آب براساس تأمین ۸۵ درصد و وضعیت سوم، در نظر گرفتن اثر تغییرات توأمان حجم رواناب و حجم تقاضای آب براساس تأمین ۷۰ درصد) برای دوره آبی (۲۰۴۰-۲۰۶۹) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱)، اجرا شده‌اند.

متوسط بارندگی سالانه در کل حوضه ۴۰۳/۷ میلی‌متر بوده که ماه‌های مارس، آوریل و می پر باران‌ترین ماه‌ها است. از آنجایی که ایستگاه‌های موجود در سطح حوضه، بازه زمانی



شکل ۲- حوضه قرنقو و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع حوضه (متر)	طول جغرافیایی (دقیقه-درجه)	عرض جغرافیایی (دقیقه-درجه)
وطیفه خوران	باران سنجی	۱۷۶۰	۴۶-۵۹	۳۷-۳۲
میانه ثبات	باران سنجی	۱۱۰۰	۴۷-۴۲	۳۷-۲۵
هشت رود سر اسکند	باران سنجی	۱۷۵۰	۴۷-۰۳	۳۷-۲۹
تونل ۷	باران سنجی	۱۱۰۰	۴۷-۳۷	۳۷-۲۴
خواجه شاهی	باران سنجی	۱۶۰۰	۴۶-۵۷	۳۷-۱۸
استور	کلیماتولوژی	۱۲۰۰	۴۷-۵۴	۴۷-۳۰
پل دختر	باران سنجی	۱۲۰۰	۴۷-۴۹	۳۷-۲۱
موتور خانه	باران سنجی	۱۰۶۰	۴۷-۴۳	۳۷-۲۳
تازه کند	باران سنجی	۱۸۵۰	۴۶-۴۵	۳۶-۵۹
کنگوار	باران سنجی	۱۳۲۰	۴۷-۳۶	۳۷-۱۸
قزل قیه	باران سنجی	۱۴۹۹	۴۷-۳۲	۳۷-۱۶
مکتو	باران سنجی	۱۶۹۰	۴۷-۱۳	۳۷-۱۸
میانه	سینوپتیک	۱۲۰۰	۴۷-۳۸	۳۷-۲۴

تولید سناریوهای اقلیمی در دوره آتی

به منظور تولید سناریوهای اقلیمی، از مدل HadCM3 (تحت سناریوی انتشار A2) استفاده می‌شود. با استفاده از برنامه بازخوانی داده (GCM-RDP) و با وارد کردن مختصات مکانی ایستگاه‌های مورد نظر هواشناسی در حوضه برای بازه زمانی مورد نظر و برای سناریوی انتشار مدنظر (به عنوان ورودی‌های مدل)، سری زمانی متغیر اقلیمی دما و بارندگی مربوط به سلول

محاسباتی HadCM3 (به عنوان خروجی‌های مدل) که حوضه مورد نظر را در بر می‌گیرد، حاصل می‌شود (IPCC-DDC, 1988). پس از استخراج دما و بارندگی ماهانه در بازه پایه و تغییر اقلیم از مدل HadCM3، به منظور کوچک مقیاس نمودن داده‌های اقلیمی برای حوضه مورد نظر، سناریوی اقلیمی مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند. در نهایت با اضافه کردن سناریوی اقلیمی دما به دمای مشاهداتی حوضه و ضرب کردن

$$ET_{Ct} = K_{Ct} \times ET_{0t} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، ET_{Ct} = تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر در ماه t ام، ET_{0t} = تبخیر و تعرق گیاه مرجع یا تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه t ام و K_{Ct} = ضریب گیاهی در ماه t ام می‌باشند.

برای محاسبه ET_{0t} از روش پنمن مانتیس فائو استفاده می‌شود. همچنین میزان بارندگی مؤثر به روش USDA توسط نرم‌افزار Cropwat و به صورت روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود. در ادامه، نیاز خالص آبیاری طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. نهایتاً، تقاضای آب در ماه‌های مختلف در دوره آبی به صورت رابطه (۹) تعیین می‌شود.

$$RA_{eff_t} = RA_t / 125 \times (125 - 0.2RA_t) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RA_t \leq 250mm$$

$$RA_{eff_t} = 125 + 0.1 \times RA_t \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RA_t > 250mm$$

$$IR_t = ET_{Ct} - RA_{eff_t} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$V_t = \frac{IR_t \times 10 \times A}{1000000} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آنها، RA_{eff_t} = متوسط بارندگی مؤثر در ماه t ام، RA_t = متوسط بارندگی در ماه t ام، IR_t = نیاز خالص آبیاری در ماه t ام، و ET_{Ct} = تبخیر و تعرق گیاهی، V_t = حجم تقاضای آب در ماه t ام و A = سطح زیر کشت هستند.

همان‌طور که مشخص است، داده‌های ورودی به نرم‌افزار Cropwat شامل کمینه و بیشینه دما، متوسط رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد، متوسط ساعت آفتابی در روز، بارندگی، متوسط انرژی بازتاب‌شده از سطح زمین، ضریب گیاهی، هستند.

مدل‌های بهینه‌سازی

در مسائل تصمیم‌گیری به‌منظور رسیدن به اهداف مورد نظر می‌توان مسئله را به صورت یک مدل ریاضی تبدیل نمود و از روش‌های بهینه‌سازی موجود بهره جست. گزینه‌های ممکن در تصمیم‌گیری به صورت متغیرهای تصمیم در مدل ریاضی در نظر گرفته می‌شوند. تابع هدف در مسائل تخصیص آب به بخش مصرف می‌تواند به صورت کمینه کردن مجموع مجذور کمبودها در تخصیص به این بخش‌ها در هر ماه باشد. لذا، تابع هدف و قیود مربوطه می‌توانند مطابق روابط (۱۰) تا (۱۴) در نظر گرفته شوند:

(رابطه ۱۰)

$$\text{Minimize } Def = \sum_{t=1}^n \left(\frac{D_t - R_t}{D_t} \right)^2$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T$$

سناریوی اقلیمی بارندگی به بارندگی مشاهداتی حوضه، سری زمانی متغیرهای اقلیمی مطابق روابط (۳) و (۴) تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است متغیرهای اقلیمی از سلولی از مدل HadCM3 استخراج می‌شود که حوضه در درون آن سلول واقع شده است (Wilby and Harris, 2006).

$$\text{delta } TE_j = \overline{TE}_{Had,f,j} - \overline{TE}_{Had,b,j} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\text{delta } RA_j = \overline{RA}_{Had,f,j} + \overline{RA}_{Had,b,j} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$TE_j = TE_{o,j} + \text{delta } TE_j \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$RA_j = RA_{o,j} + \text{delta } RA_j \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، $\text{delta } TE_j$ و $\text{delta } RA_j$ = به ترتیب بیان‌گر سناریوی اقلیمی مربوط به میانگین بلندمدت دما و بارندگی برای ماه j ام؛ $\overline{TE}_{Had,f,j}$ و $\overline{RA}_{Had,f,j}$ = به ترتیب بیان‌گر میانگین بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 در بازه تغییر اقلیم (بازه آبی) برای ماه j ام؛ $\overline{TE}_{Had,b,j}$ و $\overline{RA}_{Had,b,j}$ = به ترتیب بیان‌گر میانگین بلند مدت و بارندگی شبیه‌سازی شده در بازه پایه برای ماه j ام؛ $TE_{o,j}$ و $RA_{o,j}$ = به ترتیب بیان‌گر سری زمانی دما و بارندگی مشاهداتی برای ماه j ام؛ TE_j و RA_j = به ترتیب بیان‌گر سری زمانی دما و بارندگی حاصل از پدیده تغییر اقلیم در بازه آبی برای ماه j ام می‌باشند.

شبیه‌سازی بارش-رواناب

به‌منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای اقلیمی بر رواناب، استفاده از مدل‌های بارش-رواناب ضروری است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی بارش-رواناب ماهانه از مدل IHACRES استفاده می‌شود (Jakeman and Hornberger, 1993). علت انتخاب این مدل این است که به داده‌های ورودی کمی از جمله دما، بارندگی، مساحت حوضه نیازمند است و دارای الگوریتم ساده برای تبدیل متغیرهای اقلیمی به رواناب است. این مدل از دو زیربرنامه غیرخطی کاهشی و زیربرنامه خطی آبنمود واحد تشکیل می‌شود. در زیربرنامه اول، بارندگی به بارندگی مؤثر و در زیربرنامه دوم، بارندگی مؤثر به رواناب تبدیل خواهد شد. در ابتدا می‌بایست مدل IHACRES برای حوضه، با استفاده از داده‌های تاریخی واسنجی و سپس صحت‌سنجی می‌شود پس از واسنجی مدل، رواناب آبی شبیه‌سازی می‌شود.

برآورد حجم تقاضای آب

به‌منظور برآورد حجم تقاضای آب از مدل Cropwat استفاده می‌شود. مدل برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاهی از روش FAO24 استفاده می‌کند. اساس کلی این روش بر مبنای رابطه (۵) است:

(رابطه ۱۱)

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t - \frac{EV_t \times (aS_t + b)}{1000}$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۱۲)

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۱۳)

$$0 \leq R_t \leq D_t$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$\begin{cases} SP_t = S_t + Q_t - \frac{EV_t \times (aS_t + b)}{1000} - S_{\max} \\ SP_t = 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$S_t + Q_t - \frac{EV_t \times (aS_t + b)}{1000} \geq S_{\max}$$

otherwise

که در آن، Def = تابع هدف، D_t = مجموع میزان نیاز بخش کشاورزی، شرب و صنعت و زیست محیطی در ماه t ام، R_t = میزان رهاسازی در ماه t ام، S_t و S_{t+1} = میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای ماه t ام، Q_t = حجم جریان ورودی به مخزن سد در ماه t ام، EV_t = ارتفاع تبخیر از دریاچه سد در ماه t ام، S_{\max} = ظرفیت کل مخزن، S_{\min} = حجم مرده مخزن، SP_t = میزان حجم سرریز از مخزن در ماه t ام، n = طول بازه زمانی برنامه ریزی و a و b = ثابت‌هایی که از منحنی سطح-حجم مخزن به دست می‌آید، به گونه‌ای که $Ar_t = aS_t + b$ و Ar_t = سطح مخزن در ماه t ام می‌باشد. به منظور دستیابی به تابع هدف مورد نظر، مقادیر بهینه رهاسازی و حجم ذخیره مخزن به وسیله روش برنامه ریزی غیرخطی (NLP) تعیین می‌گردد. برای حل مسئله به وسیله روش NLP از نرم افزار LINGO 11.0 استفاده شده است (LINGO User's Guide, 2008).

شاخص انعطاف پذیری سامانه مخزن

مهم ترین مرحله در استفاده از مدل های بهینه سازی جهت بهره برداری از مخازن، استفاده از شاخص های کارایی می باشد. شاخص های کارایی بسته به نوع مسئله و اهداف برنامه ریزی می توانند متفاوت باشند. در این تحقیق از شاخص انعطاف پذیری

استفاده شده است. از آنجایی که شاخص های معرفی شده توسط Hashimoto *et al.* (1982)، روند هم گرایی در تغییرات خود را ندارند، تحلیل سیاست های بهره برداری از مخزن و ایجاد سناریوهای مدیریتی با مشکل روبه رو خواهد شد (Loucks, 1997). برای حل این مشکل، Loucks (1997) شاخص جدیدی را تعریف نمود که ترکیبی از سه شاخص اطمینان پذیری، آسیب پذیری و برگشت پذیری است و تمامی جنبه های عملکرد یک مخزن در آن دیده می شود. این معیار انعطاف پذیری نامیده می شود و کاراترین معیار برای سیاست گذاری در طراحی و بهره برداری از سامانه تأمین آب است. شاخص انعطاف پذیری به صورت زیر بیان می گردد:

(رابطه ۱۵)

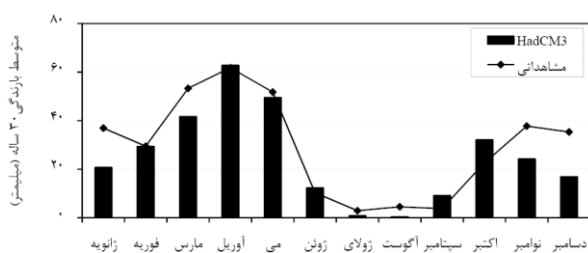
$$\gamma = \alpha\beta(1-\nu) = [Prob(X_t \in S)] \cdot [Prob(X_{t+1} \in S | X_t \in F)] \cdot \left[1 - \frac{\sum_{j \in F} (D_t - R_t)_j}{V_t} \right]$$

که در آن، γ = شاخص انعطاف پذیری؛ α = شاخص اطمینان پذیری؛ β = شاخص برگشت پذیری؛ ν = شاخص آسیب پذیری؛ F = شکست (کمبود تأمین آب)؛ S = پیروزی (تأمین آب)؛ X_t = وضعیت سامانه در ماه t ام؛ X_{t+1} = وضعیت سامانه در ماه $t+1$ ام؛ $Prob$ = احتمال قرارگیری سامانه در وضعیت شکست یا پیروزی؛ D_t = مجموع نیازها در ماه t ام؛ R_t = رهاسازی در ماه t ام؛ V_t = حجم کل تقاضاها در کل دوره بهره برداری، هستند.

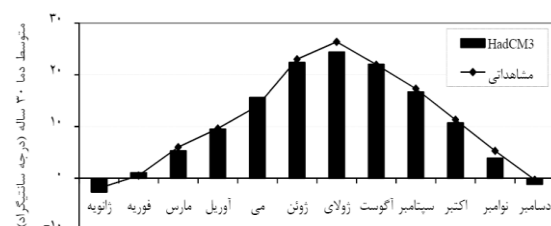
نتایج

بررسی عملکرد مدل اقلیمی

برای بررسی عملکرد مدل، میانگین ۳۰ ساله ماهانه متغیرهای اقلیمی در بازه پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) محاسبه و با مقادیر متناظر مشاهداتی مقایسه شدند. نتایج مربوط به این مقایسه در شکل (۳) ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳. نتایج عملکرد مدل اقلیمی برای (الف) دما و (ب) بارندگی

۰/۹۹ درجه سانتی‌گراد، ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۹۹ درصد بوده و برای بارندگی برابر با ۹/۴۳ میلی‌متر، ۷/۱۶ میلی‌متر و ۸۲ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان به خروجی نتایج این مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حوضه در بازه تغییر اقلیم اطمینان کرد.

محاسبه سناریوی اقلیمی در دوره آتی

ابتدا سری زمانی دما و بارندگی ماهانه مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 برای دوره آتی تهیه و برای منطقه طرح، کوچک مقیاس شد. سپس متوسط درازمدت دما و بارندگی ماهانه در دوره آتی و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل محاسبه شد. نهایتاً با استفاده از روابط (۱) و (۲)، سناریوی اقلیمی دما و بارندگی منطقه در دوره آتی نسبت به دوره پایه محاسبه شده که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. سناریوی اقلیمی دما و بارندگی حاصل از مدل HadCM3

سناریوی اقلیمی	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ΔRA_j (درصد)	۱/۳	-۱۳/۳	-۰/۳	-۱۵/۰	-۲۴/۱	-۵۲/۲	-۶۰/۱	-۳۹/۴	-۳۶/۰	-۱۳/۶	۳/۸	-۱۶/۲
ΔTE_j (درجه سانتی‌گراد)	۲/۴	۱/۸	۱/۹	۲/۵	۲/۳	۳/۰	۳/۶	۳/۹	۳/۱	۲/۹	۱/۷	۱/۹

ΔRA_j همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، دمای حوضه در بازه تغییر اقلیم بین ۱/۷ تا ۳/۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارندگی در بازه تغییر اقلیم بین -۶۰ تا ۳/۸ درصد نسبت به پایه خواهد بود. در ادامه، پس از محاسبه ΔTE_j و

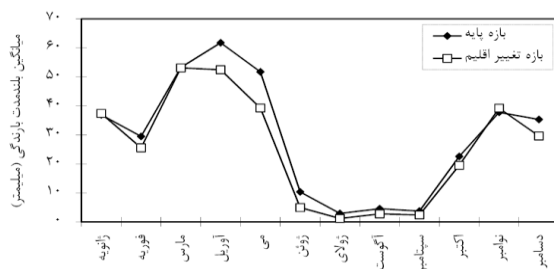
همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، عملکرد کلی مدل شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در بازه پایه موفقیت‌آمیز بوده است که این امر در مورد دما مشهودتر از بارندگی است. جدول (۲) مقایسه داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده را با ارزیابی‌های آماری نشان می‌دهد.

جدول ۲. بررسی عملکرد مدل HadCM3

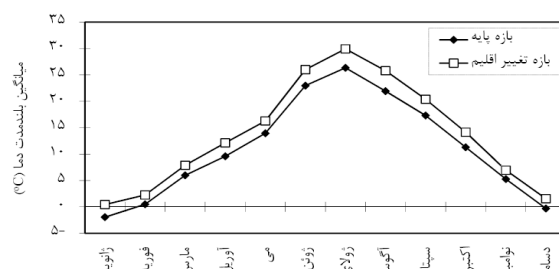
مدل	دما			بارندگی		
	R^2 (%)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R^2 (%)	MAE (mm)	RMSE (mm)
HadCM3	۹۹	۰/۸۲	۰/۹۹	۸۲	۷/۱۶	۹/۴۳

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب برای دما برابر با

همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، دمای حوضه در بازه تغییر اقلیم بین ۱/۷ تا ۳/۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارندگی در بازه تغییر اقلیم بین -۶۰ تا ۳/۸ درصد نسبت به پایه خواهد بود. در ادامه، پس از محاسبه ΔTE_j و



(ب)



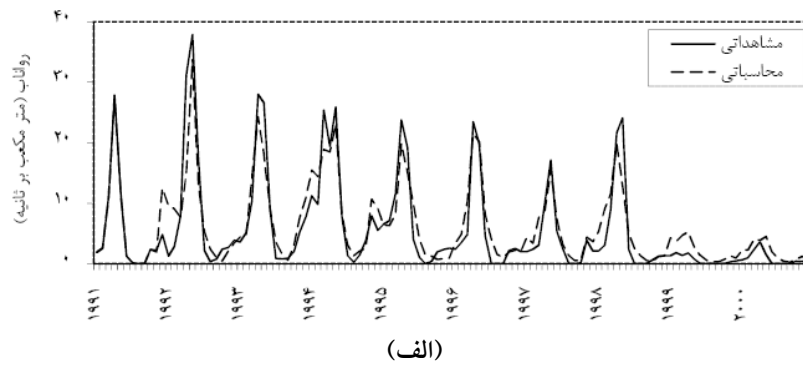
(الف)

شکل ۴. مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه (الف) دما و (ب) بارندگی در بازه تغییر اقلیم و پایه

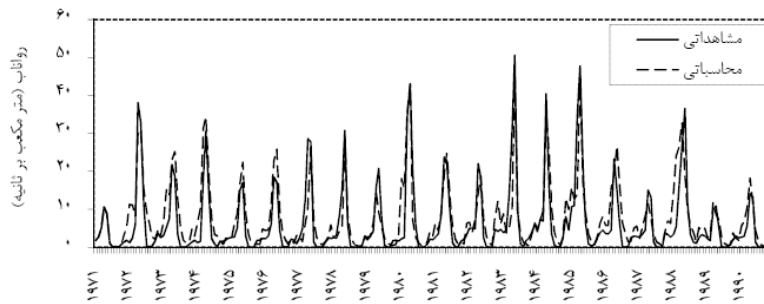
نتایج شبیه‌سازی بارش- رواناب

قبل از شبیه‌سازی آبدهی به مخزن در بازه تغییر اقلیم لازم بود که مدل هیدرولوژیکی واسنجی و صحت‌سنجی شود. نتایج واسنجی برای بازه ۱۹۹۱-۲۰۰۰ و صحت‌سنجی برای بازه ۱۹۹۰-۱۹۷۱ در شکل (۵) آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه دما در بازه تغییر اقلیم حدود ۲۳ درصد نسبت به پایه افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه بارندگی در بازه تغییر اقلیم حدود ۱۲ درصد نسبت به پایه کاهش می‌یابد.



(الف)

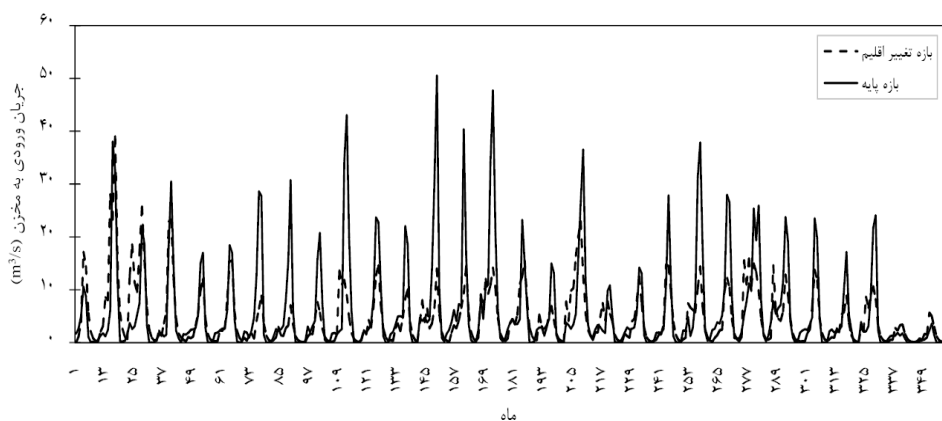


(ب)

شکل ۵. نتایج (الف) واسنجی و (ب) صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی

صحت‌سنجی نشان دادند که معیارهای ذکر شده فوق به ترتیب برابر با $4/96$ مترمکعب بر ثانیه، $3/2$ مترمکعب بر ثانیه و 74 درصد بوده است. بنابراین بررسی‌ها نشان دادند که مدل می‌تواند قابلیت شبیه‌سازی آبدهی مخزن در بازه تغییر اقلیم را داشته باشد که نتایج در شکل (۶) ارائه شده است.

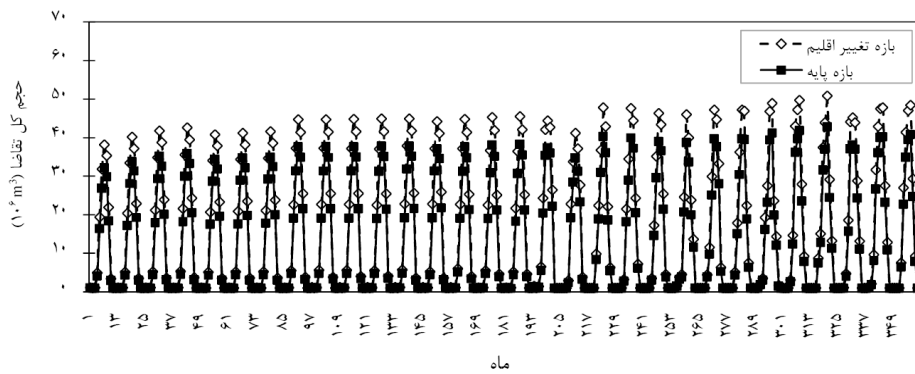
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج واسنجی مدل هیدرولوژیکی نشان می‌دهند که معیارهای $RMSE$ ، MAE و R^2 به ترتیب برابر با $3/2$ مترمکعب بر ثانیه، $2/0$ مترمکعب بر ثانیه، 86 درصد بوده است و بیان‌گر آن است که عملکرد مدل هیدرولوژیکی موفقیت‌آمیز بوده است. پس از واسنجی، مدل در بازه $1971-1990$ صحت‌سنجی شد. نتایج



شکل ۶. آبدهی ماهانه ورودی به مخزن در بازه تغییر اقلیم و پایه

شبیه‌سازی مدل Cropwat و برآورد حجم کل تقاضا نتایج شبیه‌سازی مدل Cropwat در بازه تغییر اقلیم و پایه در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که حجم تقاضای آب در بازه تغییر اقلیم حدود 20 درصد نسبت به پایه افزایش یابد

نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که سری زمانی جریان ورودی به مخزن در بازه تغییر اقلیم نسبت به پایه کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه جریان ورودی به مخزن در بازه تغییر اقلیم حدود 25 درصد نسبت به پایه کاهش می‌یابد.



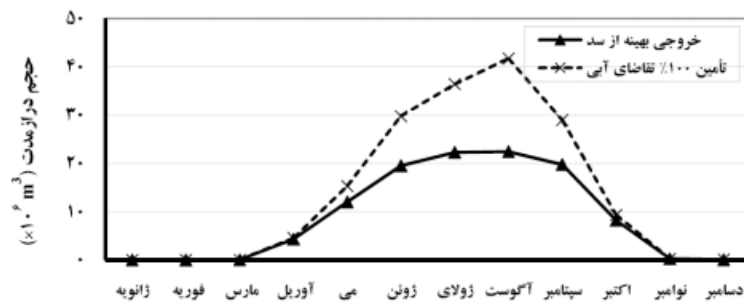
شکل ۷. مقایسه حجم تقاضای آبی در بازه تغییر اقلیم نسبت به بازه پایه

به دست آید. به منظور دستیابی به تابع هدف مورد نظر، پارامترهای حجم جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب تحت شرایط تغییر اقلیم (سه وضعیت تأمین آب)، تعریف شده و مقادیر بهینه رهاسازی و حجم ذخیره مخزن به وسیله نرم افزار LINGO به دست می آید که نتایج حاصله در شکل (۸) ارائه شده است.

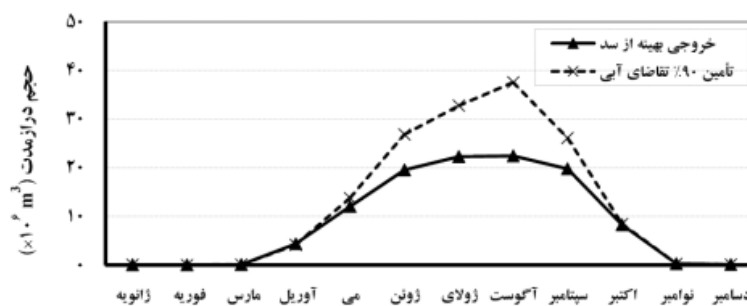
بهینه سازی مخزن تحت سه وضعیت تأمین آب در شرایط تغییر

اقلیم توسط LINGO

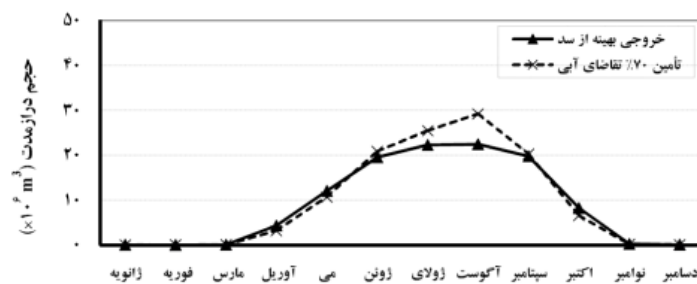
در این قسمت، به منظور بهره برداری بهینه از مخزن سد قرنقو با هدف تأمین تقاضای آب تابع هدفی به صورت کمینه کردن مجموع مجذور کمبودها در تخصیص به مصارف در نظر گرفته می شود تا مقادیر بهینه خروجی از مخزن در شرایط تغییر اقلیم



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸. حجم خروجی بهینه از مخزن سد و حجم تقاضای آبی در دوره آبی برای (الف) وضعیت اول، (ب) وضعیت دوم و (پ) وضعیت سوم با بهینه سازی LINGO

ترتیب می‌توان گفت، در شرایط تغییر اقلیم در صورت ثابت ماندن سطح زیر کشت و الگوی کشت بایستی رویکرد کم آبیاری تا میزان ۷۰ درصد نیاز آبی برای این شبکه در دوره آبی مد نظر قرار گیرد. شایان ذکر است سایر راهکارهای تطبیقی نظیر تغییر در سطوح کشت، تغییر در الگوی کشت و استفاده بیش‌تر از محصولات با نیاز آبی کم‌تر و افزایش راندمان آبیاری و غیره بایستی مد نظر قرار گیرد.

در ادامه، در بررسی هر یک از وضعیت‌ها از شاخص کارایی انعطاف‌پذیری استفاده شده است که نتایج در هر دو دوره پایه و آبی در جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به این که تقاضای آبی در دوره آبی تا ۲۰ درصد افزایش یافته و حجم جریان ورودی ۲۵ درصد کاهش داشته است، میزان تخصیص آب به بخش تقاضا در شرایط مدیریت بهینه کمتر از تقاضا بوده است. هر چند سعی شده است که با مدیریت بهینه، اثرات این کمبود به حداقل برسد. همین بررسی برای شرایط ۸۵ و ۷۰ درصد تأمین تقاضای آبی انجام و مدیریت بهینه مخزن سد برای این شرایط نیز محاسبه شده است و نتایج در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در ۸۵ درصد تأمین، میزان این کمبودها کاهش یافته و در ۷۰ درصد نسبت به ۱۰۰ درصد تأمین به حداقل می‌رسد. بدین

جدول ۴. مقایسه انعطاف‌پذیری در سه وضعیت تأمین آب و برای دو دوره آبی و دوره پایه در شرایط بهینه‌سازی

شاخص	وضعیت	دوره پایه	دوره آبی	درصد تغییرات و وضعیت انعطاف‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه ×
انعطاف‌پذیری (درصد)	اول	۶/۶	۵/۳	-۱۹/۷
	دوم	۱۲/۹	۱۰/۹	-۱۵/۵۰
	سوم	۱۸/۱	۱۷/۸	-۱/۷

* عدد مربوطه بیانگر درصد تغییرات انعطاف‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه و علامت (-) و (+)، به ترتیب نشان‌دهنده بدتر و بهتر شدن انعطاف‌پذیری تحت این شرایط می‌باشد.

آب در دوره (۲۰۶۹-۲۰۴۰) به شرح زیر خواهند بود. بررسی سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی از داده‌های مدل HadCM3 نشان می‌دهد که متوسط بلندمدت ماهانه دما در بازه تغییر اقلیم حدود ۲۳ درصد نسبت به بازه پایه افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه بارندگی در بازه تغییر اقلیم حدود ۱۲ درصد نسبت به بازه پایه کاهش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی نشان داد که سری زمانی جریان ورودی به مخزن در بازه تغییر اقلیم نسبت به بازه پایه کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که مقایسه متوسط بلندمدت ماهانه جریان ورودی به مخزن در بازه تغییر اقلیم حدود ۲۵ درصد نسبت به بازه پایه کاهش می‌یابد. از سویی دیگر، نتایج شبیه‌سازی مدل Cropwat نشان داد که حجم تقاضای آب در بازه تغییر اقلیم حدود ۲۰ درصد نسبت به بازه پایه افزایش خواهد یافت.

استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن توسط مدل بهینه‌سازی نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم (با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز) نسبت به دوره پایه، انعطاف‌پذیری سامانه به

همان‌طور که نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد، در شرایط بهینه‌سازی شاخص انعطاف‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم، برای تأمین ۱۰۰ تقاضا (وضعیت اول)، ۵/۳ درصد بوده که کم‌تر از دوره پایه بوده است. در وضعیت دوم، انعطاف‌پذیری سامانه برای تأمین ۸۵ تقاضا، ۱۰/۹ می‌باشد که همچنان کم‌تر از دوره پایه است. همچنین در وضعیت سوم، انعطاف‌پذیری سامانه در شرایط تغییر اقلیم به ۱۷/۸ درصد می‌رسد که به میزان حدود ۲ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. مقایسه انعطاف‌پذیری سامانه در وضعیت‌های اول، دوم و سوم در دوره تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه به ترتیب کاهش حدود ۲۰، ۱۶ و ۲ درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین همان‌طور که مشخص است برای وضعیت سوم (تأمین بر اساس ۷۰ درصد) نسبت به وضعیت اول (تأمین بر اساس ۱۰۰ درصد) تغییرات انعطاف‌پذیری بین دو دوره تغییر اقلیم و پایه کم‌تر است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی تأثیرات انعطاف‌پذیری سامانه مخزن قرنقو (آذربایجان شرقی) در شرایط تغییر اقلیم بر تأمین بهینه

و کارآمد را برای چگونگی تأمین تقاضا در دوره‌های کم‌آبی اتخاذ نمود به‌خصوص در بازه تغییر اقلیم که تنش‌های آبی به شدت تشدید می‌گردند می‌توان قواعد بهره‌برداری از مخازن را با توجه به تغییرات شاخص‌های کارایی و دوره بحرانی برای مدیریت بهینه مخازن بکار گرفت. مقایسه تحقیق حاضر با سایر تحقیقات از جمله زمانی و همکاران (۲۰۱۷) بیان‌گر این واقعیت هستند که این‌گونه شاخص‌ها می‌توانند نشان‌دهنده وضعیت تأمین تقاضای آب به‌خصوص در شرایط تغییر اقلیم باشد.

REFERENCES

- Ashofteh, P.-S. and Bozorg-Haddad, O. (2014). "Extraction of operating rules from reservoir under climate change effect", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45 (2), 113-121.
- Ashofteh, P.-S. and Massah Bavani, A. R. (2012). "Investigation of AOGCM model uncertainty and emission scenarios of greenhouse gases impact on the basin runoff under climate change, case study Gharanghu basin, East Azerbaijan", *Iran-Water Resources Research*, 8 (2), 36-47.
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I. and Roy, A.G., (2010). "Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries", *Journal of Hydrology*, 384 (1-2), 65- 83.
- Chen, D., Chen, Q., Leon, A. S. Ruonan, L., (2016). "A genetic algorithm parallel strategy for optimizing the operation of reservoir with multiple eco-environmental objectives", *Water Resources Management*, 30 (7), 2127-2142, DOI: 10.1007/s11269-016-1274-1.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation", *Water Resources Research*, 18 (1), 14-20, DOI: 10.1029/WR018i001p00014.
- IPCC, (2007). Summary for Policymakers, in: Climate Change 2007. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 1-18P.
- IPCC-DDC. (1988). "Data distribution centre." <<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>>.
- Loucks, D. P. (1997). "Quantifying trends in system sustainability", *Hydrological Sciences Journal*, 42 (4), 513-530.
- Jakeman, A.J. and Hornberger, G.M., (1993). "How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?" *Water Resources Research*, 29(8): 2637-2649.
- Krol, M. S., de Vries, M. J., van Oel, P. R., and de Araújo, J. C. (2011). "Sustainability of small reservoirs and large scale water availability under current conditions and climate change", *Water Resources Management*, 25 (12), 3017-3026.
- Lingo User's Guide., (2008). Lindo System Inc.
- OECD, (1993). "OECD core set of indicators for environmental performance reviews", OECD Environment Monographs, No. 83. OECD, Paris.
- Quinn, N.W.T., Brekke, L.D., Miller, N.L., Heinzer, T., Hidalgo, H. and Dracup, J.A., (2004). "Model integration for assessing future hydroclimate impacts on water resources, agricultural production and environmental quality in the San Joaquin Basin, California", *Journal of Environmental Modeling and Software*, 19(3), 305- 316.
- Salemi, H. R. and Heydari, N. (2006). "Assessment of water supply and use in the Zayandeh-Rud river basin, Iran", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2 (1), 72-76.
- Santamarta, J. C., Neris, J., Rodriguez-Martin, J., Arraiza, M. P., and Lopez, J. V. (2014). "Climate change and water planning: New challenges on islands environments", *International Conference on Environment Systems Science and Engineering*, 9, 59-63.
- Wilby, R.L. and Harris, I., (2006). "A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK", *Water Resources Research*, 42 (2), 1-10.
- Yan, D., Warners, S. E., and Ludwig, F., and Huang, H. Q. (2015). "Hydrological response to climate change: The Pearl River, China under different RCP scenarios", *Journal of Hydrology*, 4, 228-245.
- Yu, P.-S., Yang, T.-C., and Wu, C.-K. (2002). "Impact of climate change on water resources in southern Taiwan", *Journal of Hydrology*, 260 (1-4), 161-175.
- Zamani, R., Akhond-Ali, A. M., Ahmadianfar, I., and Elagib, N. A. (2017). "Optimal reservoir operation under climate change based on a probabilistic approach", *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (10).