

## ارزیابی عدم قطعیت شاخص‌های عملکرد سامانه مخزن تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: سد نمرود)

آوین حکمی کرمانی<sup>۱</sup>، حسین بابازاده<sup>۲\*</sup>، جهانگیر پرهمت<sup>۳</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۳، تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۲۵)

### چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب است. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت سیستم ارائه دهد. در پژوهش حاضر ارزیابی عدم قطعیت شاخص‌های عملکرد مخزن سد نمرود واقع در حوضه حبله‌رود تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) انجام شده است. به این منظور، با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی EC-EARTH تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و به‌کارگیری مدل LARS-WG6 ریزمقیاس‌نمایی آماری برای دوره آتی انجام شد. رواناب حوضه در دوره آتی با مدل هیدرولوژیکی IHACRES برآورد شد. در ادامه، با در نظر گرفتن ورودی‌های آینده متغیرهای اقلیمی، تغییرات نیازها محاسبه شد. مدل‌سازی سامانه منابع آب با استفاده از مدل WEAP انجام شد. در نهایت و بر اساس تغییرات جریان رودخانه و با به‌کارگیری روش مونت‌کارلو، عدم قطعیت عملکرد مخزن سد نمرود تحت شرایط حاضر و تغییر اقلیم ارزیابی شده و راهکارهای انطباقی کاهش تقاضا (تأمین ۸۵ و ۷۰ درصدی تقاضای کشاورزی) بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین مقادیر شاخص پایداری مربوط به سناریوی کاهش ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی تحت سناریوی انتشار RCP4.5 است. دامنه تغییرات نیز تحت سناریوی یادشده برای کشاورزی فیروزکوه و گرمسار ۲۰/۶۴ و ۳۴/۲ درصد کاهش می‌یابد، هرچند کاهش تقاضا به‌تنهایی برای بهبود عملکرد سیستم کافی نیست. دامنه تغییرات شاخص پایداری نسبت به سایر شاخص‌ها کمتر بود و بر همین اساس، قابلیت اطمینان بیشتری برای ارزیابی وضعیت سیستم را دارد. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها اگرچه ارزیابی تأثیرگذاری سناریوهای سازگاری با تغییر اقلیم را پیچیده‌تر می‌سازد، اما به افزایش اطمینان‌پذیری راهکارها کمک می‌کند.

**کلیدواژگان:** تغییر اقلیم، سد نمرود، شاخص عملکرد، عدم قطعیت، WEAP.

## مقدمه

تغییر اقلیم سبب تغییر در مقادیر و الگوی زمانی متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش و تبخیر و تعرق می‌شود که بر منابع و مصارف حوضه تأثیرگذار است و منجر به تغییراتی در شاخص‌های عملکرد سامانه‌های آبی خواهد شد. ارزیابی این آثار برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی متناسب با شرایط تغییر اقلیم امری ضروری است. در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سامانه‌های منابع آب و ارائه راهکارهایی برای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم تحقیقات متعددی انجام شده است. Mehta و همکاران (۲۰۱۳) در منطقه گریک کالیفرنیا، سناریوهای الگوهای کشت اقتصادی، تغییر در الگوی کشت با توجه به راندمان کاربرد آب، ترکیب بهبود سیستم آبیاری و تغییر در الگوی کشت تحت شرایط تغییر اقلیم را بررسی کردند [۱]. Joyce و همکاران (۲۰۱۱) تأثیرات تغییرات اقلیمی و استراتژی‌های انطباق بالقوه با استفاده از نرم‌افزار ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP) در حوضه رودخانه ساکرامنتو را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تغییرات اقلیمی سبب افزایش تقاضای کشاورزی و کاهش اعتمادپذیری سامانه می‌شود [۲]. Teng و همکاران (۲۰۱۲) از خروجی ۱۵ مدل گردش عمومی و ۵ مدل مفهومی بارش-رواناب برای مقایسه تأثیر میزان عدم قطعیت استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها عدم قطعیت ناشی از مدل‌های گردش عمومی جو را به مراتب بزرگ‌تر از عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب نشان داد [۳]. Peel و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی تأثیر عدم قطعیت مدل‌های GCM مختلف، با به کار بردن فقط یک مدل هیدرولوژیکی، به ارزیابی عدم قطعیت و تغییرات رواناب ورودی به مخزن پرداختند [۴].

در بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبی نیز Solis و Vieira (۲۰۱۸) در حوضه Rio Verde Grande برزیل، شاخص پایداری منابع آب را با در نظر گرفتن معیارهای قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و حداکثر کمبود محاسبه کرده و بر اساس سناریوهایی واردات آب، ساخت کانال‌ها و مخازن را مقایسه کردند. [۵]. در پژوهشی که توسط Li و همکاران (۲۰۱۹) در چین و روی رودخانه Luanhe انجام شد، تأثیرات خشک‌سالی بر تأمین آب مخزن Panjiakon مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش یادشده نشان داد روند خشک‌سالی در آینده سبب کاهش اعتمادپذیری

(مبتنی بر زمان و حجم) و شاخص انعطاف‌پذیری خواهد شد که در نتیجه، آسیب‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد [۶]. Hernandez و همکاران (۲۰۱۷) شاخص پایداری بر اساس ۵ شاخص پیشنهادی، با رویکردهای مختلف در شرایط تغییر اقلیم را برآورد کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تغییرات اقلیمی بر تراز آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. نیاز شرب و کشاورزی در دوره‌های آبی افزایش می‌یابد و رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی و شاخص انعطاف‌پذیری سیستم نیز در دوره‌های آبی کاهش خواهد یافت [۷]. Roch و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی در جنوب پرتغال نشان دادند در شرایط تغییر اقلیم، جریان ورودی به مخازن و نیاز آبیاری افزایش می‌یابد و راهکارهای تطبیقی مانند افزایش راندمان آبیاری و تغییر الگوی کشت می‌تواند به کاهش آثار منفی تغییر اقلیم کمک کند [۸]. در این زمینه تحقیقات متعدد داخلی نیز انجام شده است. احمدی و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر تغییر اقلیم بر حجم جریان ورودی به مخزن سد کارون ۴ را بررسی کرده و بر پایه الگوی مختلف اقلیمی دما و بارش آینده، مقدار رواناب دوره‌های آبی را برآورد کردند و نتیجه گرفتند با کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مخزن اعتمادپذیری افزایش یافته و آسیب‌پذیری سیستم در تولید برق در آینده کاهش می‌یابد [۹]. احترام و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی نتیجه گرفتند در دوره‌های آبی رواناب مخزن سد دز در شرایط تغییر اقلیم، کاهش یافته و تقاضای آبیاری برای پایین‌دست، افزایش می‌یابد. در پژوهش یادشده برای کاهش کمبودها از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد الگوریتم خفاش با شاخص قابلیت اطمینان بیشتر و شاخص آسیب‌پذیری کمتر عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و PSO دارد [۱۰]. آشفته و همکاران (۲۰۱۷) طی پژوهشی اثرات تغییر اقلیم بر منابع و مصارف شبکه آبیاری قران‌قو را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد شاخص‌های عملکرد در شرایط تغییر اقلیم و عدم اعمال استراتژی‌های سازگاری برآورد شدند. شاخص انعطاف‌پذیری، کاهش ۱۹ درصدی و شاخص آسیب‌پذیری، کاهش ۱/۷ درصدی دارد. با اعمال سناریوی مدیریت تقاضا و کاهش ۵ درصدی مصارف، شاخص انعطاف‌پذیری، افزایشی ۳۸ درصدی و شاخص آسیب‌پذیری، کاهش ۲۸

حوضه حبله رود می‌تواند تعادل در عرضه و تقاضای آب در سطح حوضه را فراهم سازد [۱۶].

همان گونه که پیش‌تر اشاره شد، غالب مطالعات مرتبط با ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر سامانه‌های منابع آب، معطوف به بررسی آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی، منابع و مصارف و تأثیرات منابع عدم قطعیت مانند خروجی مدل‌های اقلیمی و نوع ریزمقیاس‌نمایی بوده است. در این مطالعه علاوه بر بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی، مصارف و رواناب ورودی به مخزن سد نمود، تأثیرپذیری شاخص‌های عملکرد از عدم قطعیت جریان ورودی مخزن تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نیز مورد توجه قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### مشخصات منطقه مطالعه شده

با توجه به اهداف مد نظر در این پژوهش، سد مخزنی نمود واقع در استان تهران، شهرستان فیروزکوه و دشت گرمسار به‌عنوان منطقه مورد بررسی انتخاب شد. فیروزکوه در شمال غربی محدوده مطالعه شده قرار دارد. این محدوده با وسعت کلی ۱۶۶۱ کیلومترمربع است و با محدوده مطالعاتی گرمسار در جنوب، سرخه در شرق و هومند آبرسد در غرب، همسایه است که ۱۱۲۱ کیلومترمربع دشت و باقی معادل ۱۵۴ کیلومترمربع مربوط به ارتفاعات است. حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع حوضه به ترتیب برابر با ۷۳۳، ۳۸۷۸ و ۲۳۰۱ متر است. داده‌های آبدهی، بارش و دمای متوسط، حداکثر و حداقل و نیز تابش خورشیدی به‌صورت ماهانه و در مقیاس میلادی طی دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶ میلادی به‌عنوان داده‌های روزانه پایه جمع‌آوری شده است. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک، هیدرومتری، تبخیرسنجی و نقشه منطقه مطالعه شده در جدول‌های ۱ و ۲ و شکل ۱ نشان داده شده است.

درصدی خواهد داشت [۱۱]. کیمیاگر کتک لاهیجانی و همکاران (۲۰۱۹) عدم قطعیت‌های ناشی از سناریوهای انتشار RCP، مدل‌های اقلیمی و مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی بر جریان ورودی به مخزن سد کرج را بررسی کردند و نتیجه گرفتند هر سه عامل تأثیر بسزایی بر عدم قطعیت رواناب ورودی به مخزن دارند که باید در پیش‌بینی جریان تحت سناریوهای اقلیمی مورد توجه قرار گیرند [۱۲].

در منطقه مطالعه شده نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. غلام‌پور و همکاران (۲۰۱۸) نقش ریزمقیاس‌نمایی و روش محاسبه تبخیر-تعرق مرجع و تأثیرات آن بر برآورد منابع آب حوضه حبله رود را بررسی کردند و نتیجه گرفتند نوع مدل ریزمقیاس استفاده شده، بیشترین تأثیر را بر شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم در سطح حوضه داشته است [۱۳].

صالح‌پور و همکاران (۲۰۱۸) نیز در بررسی تأثیرات تغییر اقلیم در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰، بر آبدهی حوضه حبله رود تحت سناریوهای انتشار A2، B1 و A1B نتیجه گرفتند آبدهی سالانه در سطح حوضه به ترتیب افزایش ۱۰/۶۶، ۱۷/۷۲ و ۱۷/۵۲ درصدی نسبت به دوره پایه خواهد داشت [۱۴].

رزاچی و همکاران (۲۰۱۴) نیز نتیجه گرفتند اعمال سیاست جیره‌بندی رهاسازی از مخزن تأثیر قابل قبولی در تعدیل تنش‌ها و همگن کردن شکست‌ها دارد. با اعمال سیاست جیره‌بندی شاخص‌های اعتمادپذیری و پایداری سیستم به ترتیب ۱۰ و ۷ درصد افزایش و شاخص‌های آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری به ترتیب ۱۸ و ۹ درصد نسبت به شرایط عدم اعمال جیره‌بندی کاهش می‌یابد [۱۵].

صالح‌پور لاقانی و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی نتیجه گرفتند راهکارهایی ترکیبی مانند افزایش راندمان آبیاری، کاهش سرانه مصرف و تغییر الگوی کشت در سطح

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در حوضه سد نمود

نام ایستگاه	کاربرد	دوره آماری	ارتفاع (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین حداکثر دمای سالانه (°C)	میانگین حداقل دمای سالانه (°C)	میانگین بارش سالانه (mm)	تبخیر (mm)
آبعلی	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۱۶	۲۴۶۵/۲	۵۱.°۵۳'	۳۵.°۴۵'	-۴/۲	۱۳/۲	۵۴۸/۹	۱۱۷۸
گرمسار	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۱۶	۱۰۵۰	۵۲.°۲۴'	۳۵.°۱۹'	۱۲	۲۵/۹	۱۱۵/۲	۱۷۱۷
نمود	تبخیرسنجی	۱۹۸۶-۲۰۱۶	۱۸۲۰	۵۲.°۶۶'	۳۵.°۷۲'	۲/۴	۱۵/۸	۳۱۹/۵	۱۲۸۵

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوضه سد نمروند

نام ایستگاه	کاربرد	ارتفاع (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین درازمدت آبدهی ( $\frac{m^3}{s}$ )	میانگین درازمدت آبدهی سالانه (MCM)	حداکثر آبدهی سالانه ( $\frac{m^3}{s}$ )	انحراف معیار ( $\frac{m^3}{s}$ )	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
بنکوه	هیدرومتری	۲۳۴۷	۵۲.۳۹'	۳۵.۱۸'	۷/۶۵	۲۴۱/۶	۱۵/۲۴	۲/۷۸	۳۶/۳	۰/۶۹
نمروند	هیدرومتری	۱۸۱۰	۵۲.۳۹'	۳۵.۴۳'	۴/۲۹	۱۳۹/۳۴	۷/۷۳	۱/۲۸	۳۰/۸	۰/۷۳

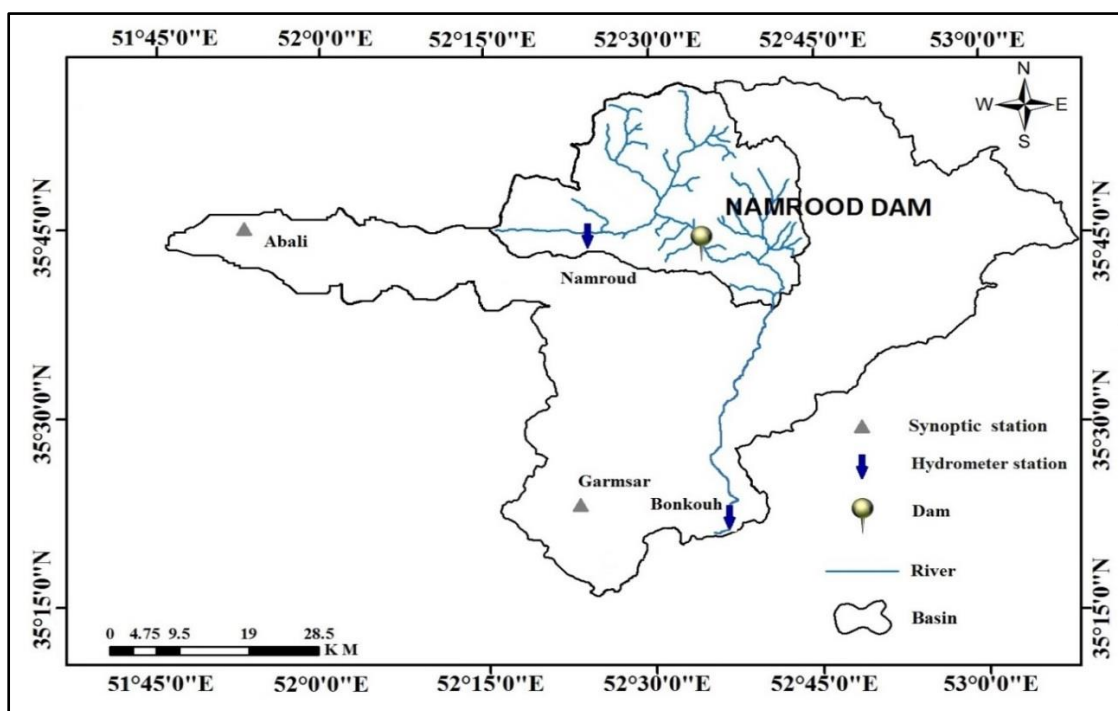
در این مطالعه شرایط موجود، اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بررسی می‌شود. سپس، کاهش تقاضا بر اساس تأمین ۸۵ و ۷۰ درصد به‌عنوان راهکاری برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش اثرات منفی آن ارزیابی می‌شود. اولویت اول تخصیص منابع آب برای مصارف شرب و صنعت مورد توجه قرار گرفته است. دومین و سومین اولویت، برآورده کردن تقاضای زیست‌محیطی و کشاورزی است. پیکربندی سیستم در WEAP در شکل ۲ ارائه شده است.

سناریوهای تغییرات اقلیمی و مدل LARS-WG v.6 سناریوهای RCP سناریوی کاهش سخت‌گیرانه

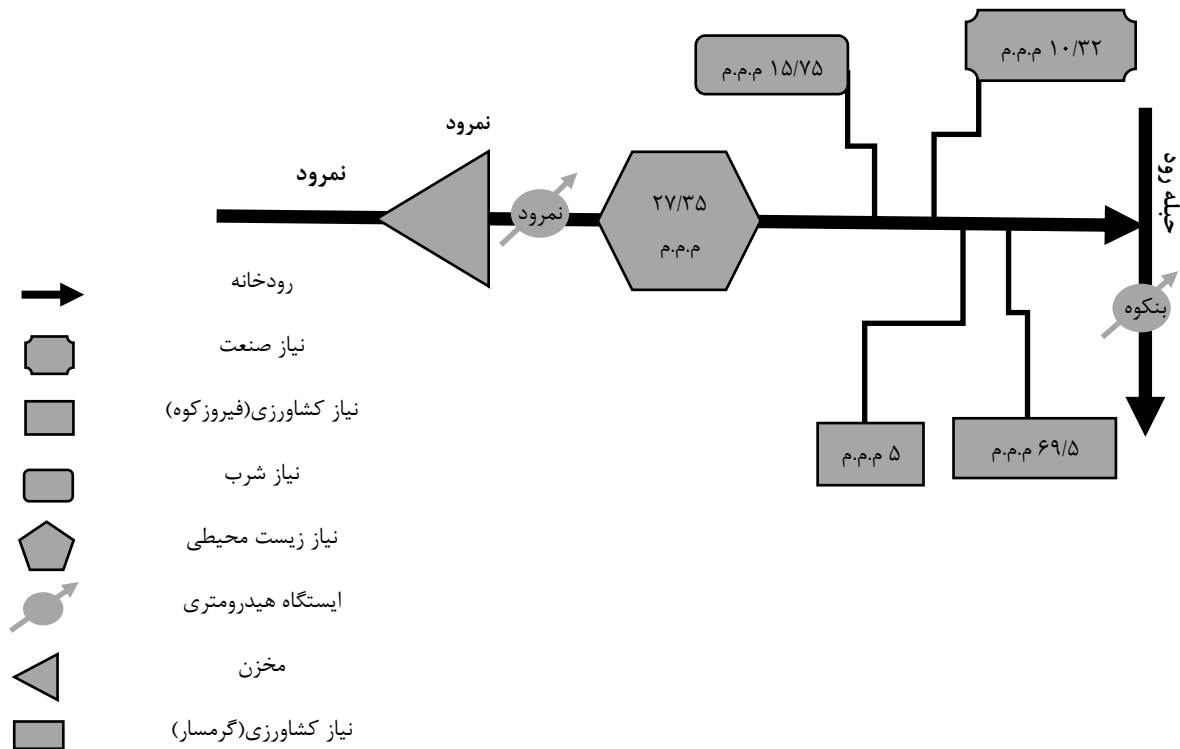
در این مطالعه شرایط موجود، اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بررسی می‌شود. سپس، کاهش تقاضا بر اساس تأمین ۸۵ و ۷۰ درصد به‌عنوان راهکاری برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش اثرات منفی آن ارزیابی می‌شود. اولویت اول تخصیص منابع آب برای مصارف شرب و صنعت مورد توجه قرار گرفته است. دومین و سومین اولویت، برآورده کردن تقاضای زیست‌محیطی و کشاورزی است. پیکربندی سیستم در WEAP در شکل ۲ ارائه شده است.

#### سناریوهای تغییرات اقلیمی و مدل LARS-WG v.6

سناریوهای RCP سناریوی کاهش سخت‌گیرانه



شکل ۱. نقشه منطقه مطالعه شده



شکل ۲. اولویت‌بندی و پیکربندی منابع و مصارف در WEAP

۷.۶ در گام نخست مشخصات هر ایستگاه شامل نام، موقعیت مکانی، ارتفاع از سطح دریا و داده‌های هواشناسی روزانه در دوره مشاهداتی به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. سپس، توسط مدل LARS-WG ۷.۶ آنالیز شد. در ادامه، با توجه به روند موجود در سری زمانی داده‌های مشاهداتی داده‌های ایستگاه را در دوره پایه بازتولید کرد و در نهایت، با بهره‌گیری از آزمون‌های آماری و رسم نمودار، میانگین‌های ماهانه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد تا توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌ها ارزیابی شود.

#### ساختار مدل هیدرولوژیکی IHACRES

در پژوهش حاضر برای تخمین تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب ماهانه از مدل IHACRES استفاده شده است. برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌های بارش-رواناب نیاز کمتر به داده‌های ورودی، الگوریتم ساده و کاربرد آن برای حوضه‌های دارای آمار و نیز فاقد آمار است. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های دما، بارندگی و مساحت حوضه می‌تواند به شبیه‌سازی بارش-رواناب بپردازد. اساس این روش دو مدول غیرخطی تلفات و مدول هیدرو گراف واحد

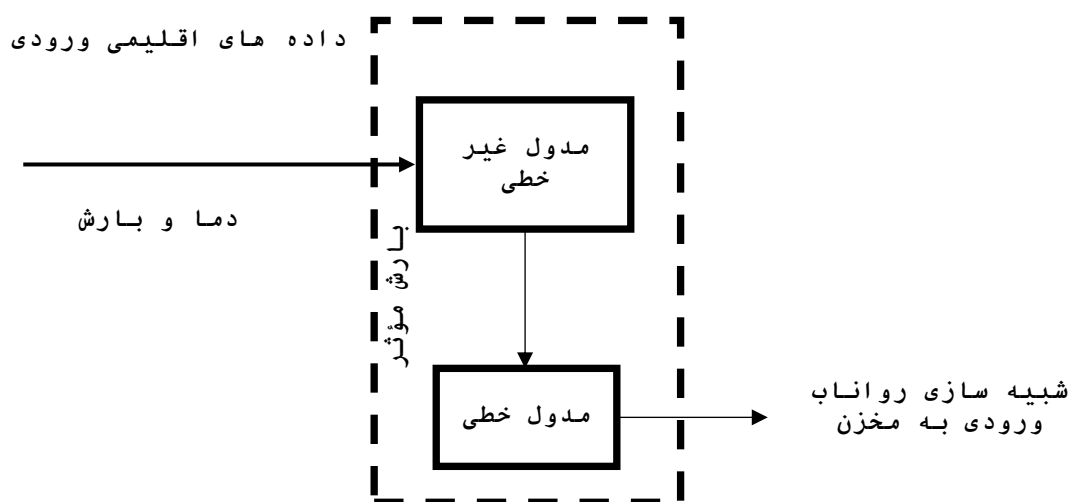
مدل LARS-WG مولد تصادفی آب‌وهوا است که برای شبیه‌سازی آب‌وهوای یک سایت در شرایط حاضر و تحت سناریوهای اقلیمی در دوره آینده استفاده می‌شود. اساس این مدل رگرسیونی چندمتغیره برای تولید داده‌های آب‌وهوا استفاده از تکنیک‌های آماری است [۱۸]. نیاز به داده‌های ورودی کمتر، سرعت عملکرد، سادگی کاربرد، تکرار محاسبات و تعریف سناریوهای انتشار و خروجی مدل‌های اقلیمی در داخل مدل از مزیت‌های LARS-WG است که سبب می‌شود در قیاس با مدل‌های ریزمقیاس دیگر مانند SDSM و روش عامل تغییر (دلتا) کاربرد بیشتری داشته باشد.

در این پژوهش بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر دمای حداقل، حداکثر، بارش و ساعت آفتابی با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی EC-EARTH تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و به‌وسیله مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG ۷.۶ برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۶) دو ایستگاه سینوپتیک گرمسار و آبدلی استفاده شده است. در این پژوهش برای تولید داده توسط مدل LARS-WG

(NSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق روابط ۱-۳ و به منظور ارزیابی مدل استفاده شده است. شکل ۳ ساختار این مدل را نشان می‌دهد؛ که در این روابط  $S_i$  دبی شبیه‌سازی شده،  $O_i$  دبی مشاهداتی،  $O_{mean}$  میانگین داده‌های مشاهداتی و  $N$  تعداد داده‌ها است.

خطی است که مدول غیرخطی در هر گام زمانی  $k$  بارش  $(r_k)$  و دما  $(t_k)$  را به بارش مؤثر  $(u_k)$  و در مرحله بعد توسط مدول هیدرو گراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌کند [۱۹]. از معیارهای ضریب همبستگی ( $r$ )، خطای مطلق (MBE)، ناش-سانکلیف

### ساختار مدل



شکل ۳. شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در مدل IHACRES

تأثیر آن بر پایداری سیستم استفاده شده است. Thomase و Fiering (۱۹۶۲) با استفاده از زنجیره مارکوف فرمولی برای تولید جریان‌های ماهیانه به‌طور مستقیم ارائه کردند. رابطه کاربردی آن به‌صورت روابط ۴ و ۵ است. در این رابطه  $b_j$  مطابق رابطه ۵ ضریب همبستگی بین جریان‌های ماه‌های  $j+1$  و  $j$ ،  $S_j$ ،  $S_{j+1}$  انحراف معیار برای ماه‌های  $j$ ،  $j+1$  و  $e_i$  متغیر تصادفی از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک است [۲۰].

$$Q_{j+1} = \bar{Q}_{j+1} + b_j (Q_j - \bar{Q}_j) + e_j S_{j+1} \sqrt{1 - r_j^2} \quad (4)$$

$$b_j = r_j \left[ \frac{S_{j+1}}{S_j} \right] \quad (5)$$

محاسبه مصارف در شرایط موجود و آتی

نیاز کشاورزی

در این پژوهش برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در دوره پایه و تغییر اقلیم از روش فائو پنمن-مانتیت (FPM) استفاده شده

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (1)$$

$$NSE = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{mean})^2} \right] \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (3)$$

مدل تولید داده‌های استوکاستیک برای شبیه‌سازی مونت کارلو

مدل‌های استوکاستیک برای تولید داده‌های ماهیانه در تحلیل سامانه‌های منابع آب از جمله سیستم مخازن ذخیره و تحلیل خصوصیات خشک‌سالی بسیار بااهمیت است. در این پژوهش از مدل Thomase and Fiering که کاربرد وسیعی در مطالعات استوکاستیک، شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل سامانه‌های منابع آب دارد، برای تحلیل عدم قطعیت رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی و

پیش‌بینی جمعیت و نیاز شرب برای دوره آتی در این پژوهش از روش ریاضی میزان رشد بهره گرفته شده است.

$$P_{t+n} = P_t (1+r)^n \quad (۸)$$

که در این رابطه  $P_t$  جمعیت در سال  $t$ ،  $P_{t+n}$  جمعیت در سرشماری در سال  $t+n$ ،  $n$  تعداد سال‌های بعد از سرشماری سال  $t$  و  $r$  میزان رشد جمعیت است. پس از تخمین جمعیت در سال ۲۰۴۰ با در نظر گرفتن متوسط سرانه مصرف شرب (برابر با وضع موجود)، نیاز شرب در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) برآورد شده است. نیاز صنعت نیز برابر با دوره پایه در نظر گرفته شده است.

**شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مخزن با مدل WEAP**  
نرم‌افزار WEAP توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم (SEI) توسعه یافته است که در مطالعات و برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل قادر به شبیه‌سازی فرایندهای رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق، عملکرد محصول، تعاملات آب سطحی و زیرزمینی و کیفیت آب در گام‌های زمانی مختلف است. مزیت اصلی WEAP رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سامانه‌های آبی است. مدل‌سازی سامانه‌های منابع آب به وسیله مدل WEAP معمولاً شامل چندین گام است. در تعریف مطالعه، چهارچوب زمانی، مرزهای مکانی، اجزای سیستم و تنظیمات مسئله انجام می‌شود. وضع موجود که به عنوان گام واسنجی مدل نیز می‌تواند استفاده شود، تصویر کلی از نیازهای آبی واقعی، بارهای آلودگی، منابع و تأمین سیستم را نشان می‌دهد. مدل WEAP بر اساس قانون بهره‌برداری استاندارد (SOP) مخزن را شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به خروجی مدل LARS-WG6 ابتدا رواناب روزانه شبیه‌سازی شد. سپس، به صورت ماهانه به عنوان ورودی مدل WEAP مورد استفاده قرار گرفت.

#### شاخص‌های عملکرد سیستم

کارایی سامانه‌های مخازن ذخیره اغلب با استفاده از شاخص‌های عملکرد که بر اساس شرایط بهره‌برداری طی دوره‌های شکست بنا نهاده شده‌اند، اندازه‌گیری و ارزیابی می‌شوند. سه معیار برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های منابع آب معرفی کردند: اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری.

است. بر این اساس، از مدل CROPWAT برای محاسبه نیاز آبی در شرایط موجود استفاده شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، خروجی مدل LARS-WG6 فقط داده‌های بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و ساعت‌های آفتابی است و سایر داده‌های مورد نیاز برای برآورد (ET<sub>0</sub>) در شرایط تغییر اقلیم مانند رطوبت نسبی و سرعت باد را شامل نمی‌شود. نشریه ۵۶ FAO روش‌های استاندارد برای تخمین تابش خورشیدی و فشار بخار واقعی ارائه کرده است که با کمک آنها می‌توان پارامترهای تابش خورشیدی و رطوبت نسبی مورد نیاز معادله FPM را در شرایط نبود پارامترهای یادشده محاسبه کرد. برای تخمین تابش خورشیدی ( $R_s$ ) با به‌کارگیری داده‌های دمای حداقل و حداکثر می‌توان از رابطه ۶ استفاده کرد.

در شرایط نبود داده‌های رطوبت نسبی (RH)، با فرض اینکه دمای نقطه شبنم نزدیک به دمای حداقل روزانه  $T_{min}$  است، فشار بخار واقعی ( $e_a$ )، از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. همچنین، در این پژوهش سرعت باد در دوره تغییر اقلیم برابر با دوره پایه فرض شده است. تابش برون‌زمینی ( $R_a$ ) که بیانگر اثر فصلی تابش خورشید است، به‌عنوان ورودی ثابت در نظر گرفته شده است، پارامتر تابش برون‌زمینی ( $R_a$ ) قابل اندازه‌گیری نیست و تابعی از عرض جغرافیایی و روز از سال است [۲۱].

$$R_s = 0.16R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (۶)$$

$$e_a = 0.61 \exp \frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3} \quad (۷)$$

بنابراین، با توجه به روابط تخمینی یادشده از روش FPM<sub>RSR</sub>Hest برای محاسبه ET<sub>0</sub> استفاده شد. در این روابط  $T_{min}$ : دمای حداقل روزانه ( $^{\circ}C$ )،  $T_{max}$ : دمای حداکثر روزانه ( $^{\circ}C$ )،  $R_a$ : تابش برون‌زمینی ( $MJm^{-2}d^{-1}$ )،  $e_a$ : فشار بخار واقعی (kPa) است. محصولات انتخاب‌شده با در نظر گرفتن سطح زیر کشت جزء عمده‌ترین محصولات کشت‌شده در دشت فیروزکوه و گرمسار هستند.

#### نیاز زیست‌محیطی، شرب و صنعت

##### پیش‌بینی نیاز زیست‌محیطی

در این پژوهش از روش تنانت (Tennant) و کلاس قابل قبول آن برای برآورد جریان مورد نیاز زیست‌محیطی استفاده شده است [۲۲].

$$\gamma = \frac{1}{\frac{f}{f_s}} \quad (11)$$

#### شاخص پایداری سیستم

ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیبپذیری و سرعت برگشتپذیری معیار مناسبی برای مقایسه گزینه‌های مختلف سیاست‌های بهره‌برداری سامانه‌های ذخیره در مرحله طراحی و همچنین، برآورد الگوی بهره‌برداری بهینه سامانه‌های در حال بهره‌برداری است. در مقایسه گزینه‌ها، گزینه‌ای که بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد، به‌عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. این شاخص به‌صورت رابطه ۱۲ است که در آن،  $\varphi$  شاخص پایداری،  $\delta$  شاخص اعتمادپذیری  $\gamma$ ، شاخص سرعت برگشتپذیری و  $\eta$  شاخص آسیبپذیری هستند. شکل ۴ روش‌شناسی تحقیق شامل فرایند ارزیابی تغییر اقلیم، مدل بارش رواناب، ارزیابی عدم قطعیت، شبیه‌سازی و ارزیابی شاخص‌های عملکرد مخزن را نشان می‌دهد.

$$\varphi = (\delta\gamma(1-\eta))^{1/3} \quad (12)$$

#### بحث و نتایج

##### ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG v.6

پس از کنترل و تأیید توانایی مدل LARS-WG v.6 در شبیه‌سازی رفتار متغیرهای اقلیمی در دوره پایه، شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی برای دوره‌های آتی و بر اساس داده‌های مدل EC-EARTH و سناریوهای RCP انجام شد. سپس، با استفاده از رفتار متغیرها در دوره پایه و ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو بر اساس هر یک از سناریوهای موجود، پارامترهای اقلیمی آینده در حد مقیاس منطقه مطالعه‌شده شبیه‌سازی شد. کم بودن مقادیر مربوط به شاخص‌های MAE و RMSE متغیرهای هواشناسی بارش، دمای حداقل و حداکثر نشان‌دهنده کارایی زیاد مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی حوضه حبله‌رود در دوره آماری است. نتایج پارامترهای آماری ایستگاه سینوپتیک آبعلی در جدول ۳ ارائه شده است.

#### شاخص اعتمادپذیری

سامانه‌های مخازن ذخیره طی دوره بهره‌برداری ممکن است به مدت چندین ماه یا سال دچار شکست شوند که برای ارزیابی تعداد دوره‌های شکست یک سیستم طی دوره از شاخص قابلیت اعتماد استفاده می‌کنند. این شاخص به احتمال اینکه سیستم طی دوره عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرار گیرد، تعریف می‌شود. رابطه ریاضی این شاخص به‌صورت رابطه ۹ ارائه شده است.

$$\delta = 100 - \frac{f}{T} \quad (9)$$

که در آن  $f$  تعداد کل دوره‌های شکست،  $T$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری،  $\delta$  قابلیت اعتمادپذیری است.

#### شاخص آسیب‌پذیری

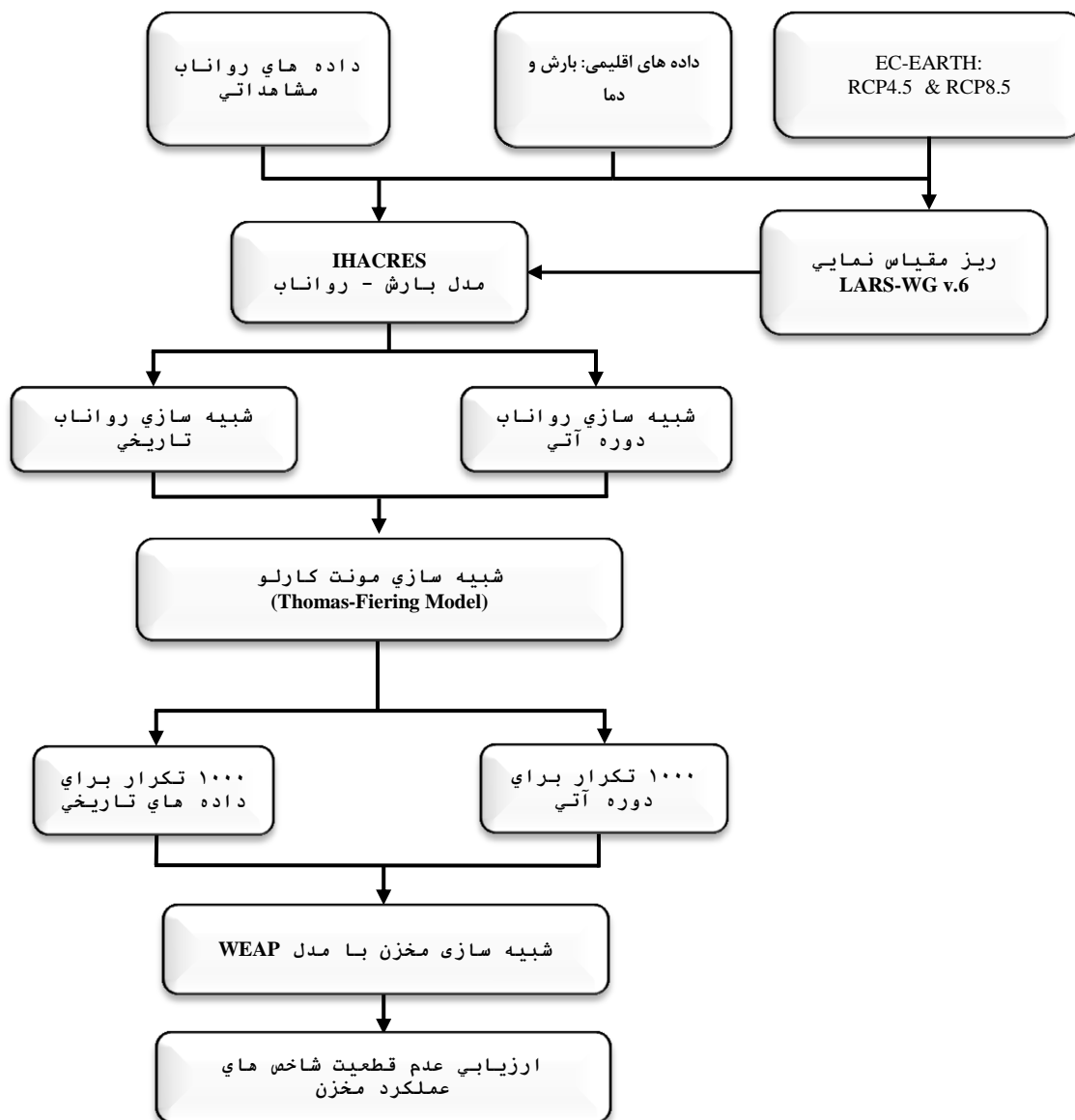
شاخص یادشده بیانگر شدت کمبود طی دوره شکست است. مقدار شاخص آسیب‌پذیری را به‌صورت میانگین کمبودهای ماکزیمی که در هر سری شکست پیوسته اتفاق افتاده است، در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. شاخص آسیب‌پذیری را به‌صورت نسبت تمام آب عرضه‌شده طی دوره‌های شکست به‌کل تقاضا در همان دوره‌های شکست، توصیف کردند. رابطه ریاضی آن به‌صورت رابطه ۱۰ ارائه شده است. در این رابطه  $R_t^*$  تقاضای در نظر گرفته‌شده طرح برای  $t$  امین دوره شکست و  $R_t$  آب خروجی از مخزن طی  $t$  امین دوره شکست و  $\eta$  شاخص آسیب‌پذیری است.

$$\eta = \frac{\sum R_t^* - \sum R_t}{\sum R_t^*} \quad (10)$$

#### شاخص انعطاف‌پذیری

برای ارزیابی یک سیستم ذخیره در برگشت از حالت شکست به حالت بهره‌برداری نرمال، از شاخص انعطاف‌پذیری (سرعت برگشت‌پذیری) استفاده می‌شود. محاسبه این شاخص از رابطه ۱۱ به دست می‌آید که در آن،  $\gamma$  شاخص سرعت برگشت‌پذیری و  $f_s$  تعداد دوره‌های شکست پیوسته است.





شکل ۴. روند نمای انجام تحقیق

جدول ۳. نتایج پارامترهای آماری ایستگاه سینوپتیک آبدلی

بارش				دمای حداکثر				دمای حداقل			
RMSE	MAE	NSE	Bias	RMSE	MAE	NSE	Bias	RMSE	MAE	NSE	Bias
۵/۴۳	۴/۳۲	۰/۹۸	۰/۴۵	۰/۳	۰/۲۲	۱	-۰/۰۱۹	۰/۲	۰/۱۵	۱	۰/۰۹

مشاهداتی است. نتایج تحقیقات پیشین نیز نشان‌دهنده این است که مدل LARS-WG در شبیه‌سازی مقادیر میانگین نسبت به انحراف معیار دقت بیشتری دارد [۲۴].

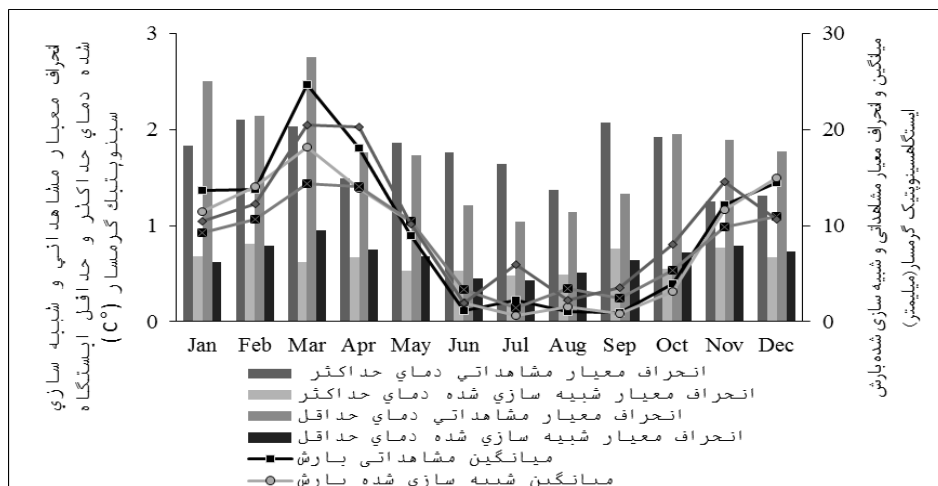
**نتایج تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی**

شکل‌های ۵ و ۶ مقایسه میانگین ماهانه بارش، دمای حداقل و حداکثر را در دوره پایه و دوره آتی بر اساس دو

شکل ۵ ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG v.6 در شبیه‌سازی میانگین دمای حداقل و دمای حداکثر ایستگاه‌های سینوپتیک گرمسار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد مدل LARS-WG v.6 میانگین سه مؤلفه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند و تقریباً منطبق بر میانگین مشاهداتی است، اما انحراف معیار شبیه‌سازی‌شده کمتر از انحراف معیار

بین ۲۵ و ۳۰ درصد برای ماه ژوئن است و حداکثر کاهش ۲۴ درصدی بارش در ماه فوریه برای ایستگاه آبعلی و کاهش ۴/۵ درصدی در ایستگاه گرمسار را نشان می‌دهد.

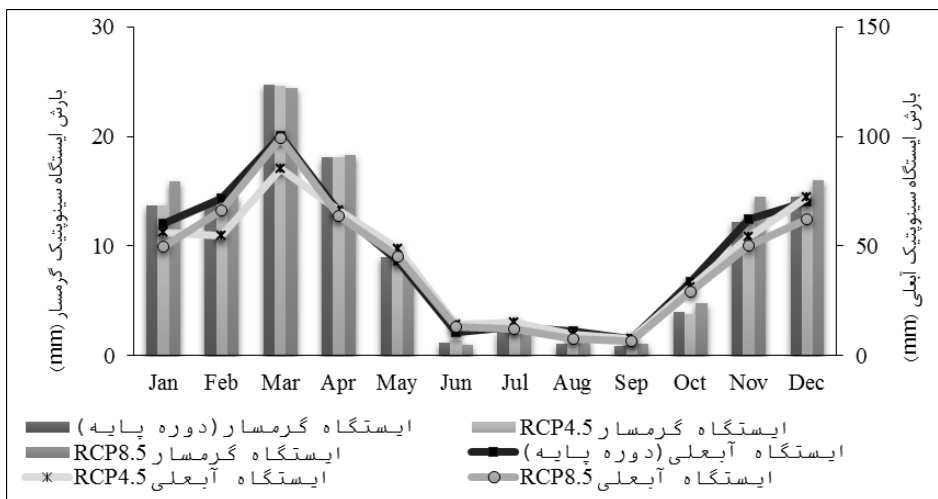
سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهند. بر اساس سناریوی RCP روند افزایشی دما مشهود است. حداکثر تغییرات افزایشی بارش تحت سناریوی RCP4.5 در ایستگاه‌های آبعلی و گرمسار نسبت به دوره پایه به ترتیب



شکل ۵. ارزیابی عملکرد LARS-WG v.6 در شبیه‌سازی میانگین بارش و انحراف معیار دمای حداکثر، حداقل و بارش ایستگاه گرمسار

حداکثر افزایش بارش برای ایستگاه‌های آبعلی و گرمسار تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب بین ۱۹ و ۴۲ درصد برای ماه ژوئن و اوت و کاهش ۳۳ و ۱۸ درصدی بارش‌ها در ماه‌های اوت و ژوئن است. بیشینه افزایش پارامتر دمای حداکثر در ایستگاه آبعلی تحت سناریوی RCP4.5 برابر با ۳۹۲/۵ درصدی در ژانویه و کمترین مقدار افزایش ۴/۴۴ درصدی در ماه اوت است. در سناریوی RCP8.5 افزایش ۳۴۷/۵ درصدی دمای حداکثر برای ماه ژانویه و ۵/۱۸ درصدی برای ماه اوت را نشان می‌دهد.

تغییرات پارامتر دمای حداقل تحت سناریوی RCP4.5 بین افزایش ۲۰۴/۱ و ۷/۵۲ درصد برای ماه‌های نوامبر و اوت متغیر است. در حالی که این مقادیر تحت سناریوی RCP8.5 در بازه ۸/۷۷- ۲۳۹ درصد به ازای ماه‌های اوت و ژانویه متغیر است که با نتایج پژوهش کامیار و همکاران (۲۰۱۷) [۲۵] و هوشیار و همکاران (۲۰۱۸) [۲۶] در مناطق دیگر کشور و حوضه حبله‌رود تطابق دارد. عباسیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز افت بارش و افزایش میانگین دما تحت تغییرات اقلیمی را گزارش دادند [۲۷].

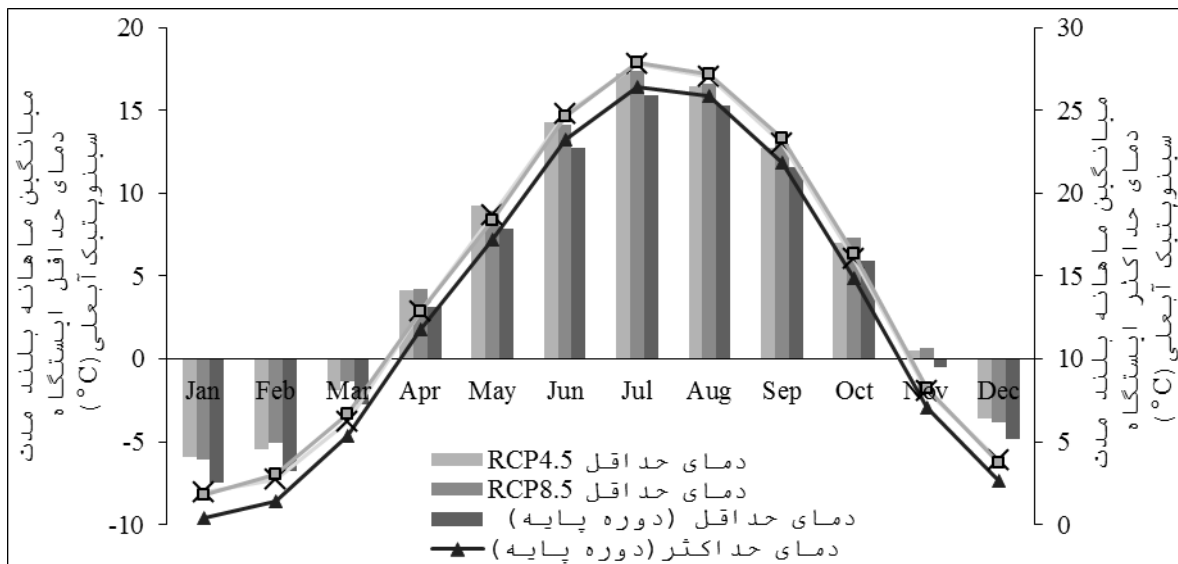


شکل ۶. مقایسه میانگین ماهانه بلندمدت بارش در دوره تغییر اقلیم تحت سناریوی و دوره پایه ایستگاه سینوپتیک آبعلی و گرمسار

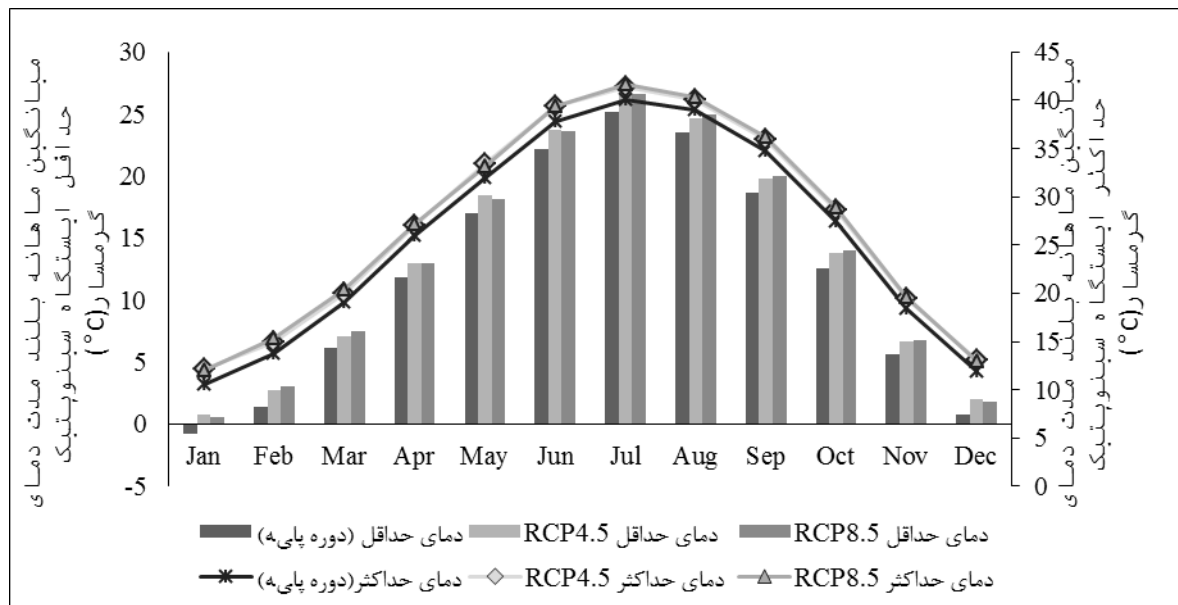
نتایج اجرای مدل هیدرولوژیکی

شکل‌های ۹ و ۱۰ وضعیت عملکرد مدل IHACRES در دوره‌ی واسنجی (۲۰۰۹-۲۰۱۴) و صحت‌سنجی (۲۰۰۹-۲۰۱۴) در ایستگاه نمودار را نشان می‌دهند. بر اساس این نتایج مدل IHACRES با ضریب همبستگی ۰/۸ در دوره‌ی واسنجی و ۰/۷۹ در دوره‌ی صحت‌سنجی توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی بارش - رواناب منطقه داشته است. بر اساس نتایج معیارهای خطا می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل اطمینان‌بخش است، اگرچه با توجه به نمودارها در

شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر دقت لازم را ندارد و تا حدی این مقادیر را کمتر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است؛ اما از آنجا که پیش‌بینی و بررسی وقایع حدی هدف پژوهش حاضر نیست، می‌توان از نتایج مدل در برآورد سری زمانی جریان ورودی به سد مخزن استفاده کرد. پس از واسنجی مدل هیدرولوژیکی، سری زمانی رواناب ماهانه حوضه مطالعه‌شده در دوره‌ی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بر اساس مقادیر دما و بارش تولیدشده توسط مدل LARS-WG6 برای سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی شد.



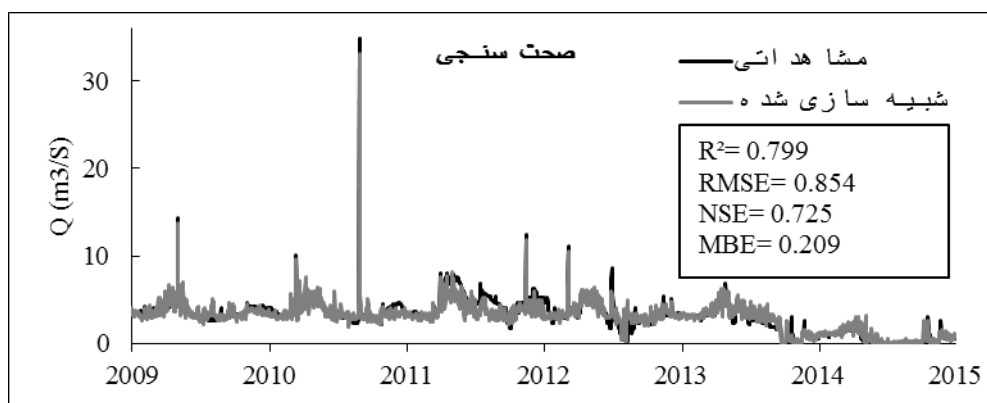
شکل ۷. میانگین ماهانه بلندمدت دمای حداقل و حداکثر در دوره تغییر اقلیم و پایه ایستگاه سینوپتیک آبعلی



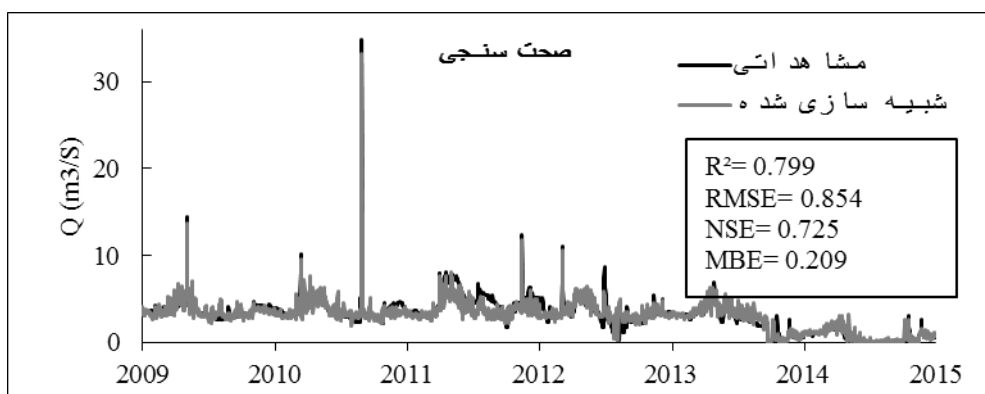
شکل ۸. میانگین ماهانه بلندمدت دمای حداقل و حداکثر در دوره تغییر اقلیم و پایه ایستگاه سینوپتیک گرمسار

شبیه‌سازی شد. میانگین طولانی‌مدت رواناب ماهانه ورودی سد نمرود و رواناب شبیه‌سازی‌شده در دوره آتی در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مدل برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ میزان رواناب ماهانه را کمتر از رواناب دوره مشاهده‌ای پیش‌بینی کرده است.

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHECRAS با استفاده از داده‌های بارش و دمای روزانه تولیدشده مدل گردش عمومی EC-EARTH تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و به‌وسیله ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG6 برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) میزان رواناب روزانه تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5



شکل ۹. سری زمانی روزانه رواناب مشاهده‌ای و مدل‌سازی‌شده مدل IHACRES در دوره واسنجی ایستگاه هیدرومتری نمرود



شکل ۱۰. سری زمانی روزانه رواناب مشاهده‌ای و مدل‌سازی‌شده مدل IHACRES در دوره صحت‌سنجی ایستگاه هیدرومتری نمرود

ماه مه تحت سناریوی RCP8.5 ۵/۲۱ درصد بیشترین افزایش را دارد. متوسط حجم رواناب سالانه ورودی سد نمرود طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه بین ۸/۳۶-۱۲/۶۴ درصد کاهش خواهد داشت.

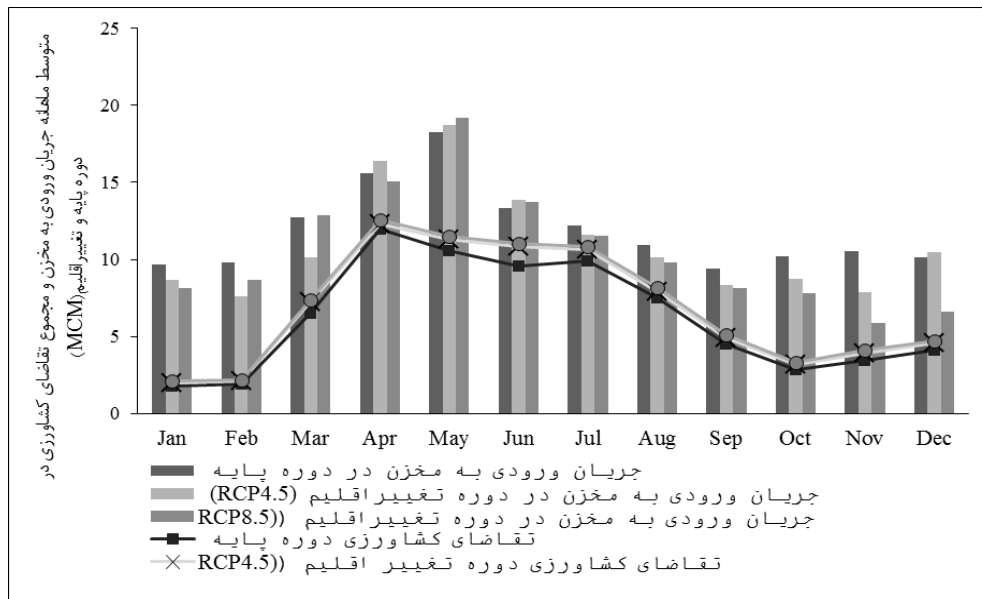
برآورد مقادیر نیاز کشاورزی، شرب، صنعت و محیط زیست تحت سناریوهای تغییر اقلیم

از آنجا که تمامی داده‌های مورد نیاز برای برآورد نیاز آبیاری مانند رطوبت نسبی و سرعت باد تحت پدیده تغییر اقلیم موجود نبود و خروجی مدل LARS-WG6 فقط داده‌های بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و ساعت‌های

متوسط ماهانه رواناب پیش‌بینی‌شده در دوره آتی تحت سناریی RCP4.5 در تمامی ماه‌ها غیر از ماه‌های آوریل، مه، ژوئن و دسامبر روندی کاهشی نسبت به متوسط ماهانه در دوره پایه دارد. شدت کاهش رواناب تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 بیشتر است. مطابق شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت در دوره آتی میزان متوسط رواناب تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 کاهش می‌یابد. ماه نوامبر تحت سناریوی RCP4.5 ۲۵/۴۸ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 ۴۴/۳۹ درصد کاهش نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. ماه آوریل تحت سناریوی RCP4.5 ۵/۳۹ درصد و

است. Boonwichai و همکاران (۲۰۱۸) [۲۸] و کلبعلی و همکاران (۲۰۲۱) [۲۹] نیز افزایش نیاز آبی محصولات به علت کاهش بارش‌ها طی فصل رشد تحت سناریوهای RCP را گزارش کردند.

آفتابی است؛ بنابراین با توجه به معادلات و روابطی که پیش‌تر به آنها اشاره شد، مقادیر ETO برای عمده محصولات منطقه برآورد شد که نتایج آن در مقایسه با مقادیر نیاز کشاورزی در دوره پایه در شکل ۱۱ آورده شده



شکل ۱۱. متوسط ماهانه جریان ورودی به مخزن و مجموع تقاضای کشاورزی در دوره تغییر اقلیم (۲۰۲۱-۲۰۴۰) تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و دوره پایه

تغییر اقلیم با توجه به میزان رشد جمعیت و استفاده از روش رشد هندسی ابتدا جمعیت شهرستان فیروزکوه برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ برآورد شد. پس از محاسبه جمعیت در دوره آتی، با در نظر گرفتن سرانه مصرف شرب، نیاز شرب محاسبه شد. نیاز شرب در سال ۲۰۴۰ نسبت به شرایط موجود رشدی ۶۱/۹ درصدی را نشان می‌دهد (شکل ۱۲). در این پژوهش از روش هیدرولوژیکی تنانت (Tennant) برای محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه نمود در مقیاس ماهانه استفاده شده است. تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 بیشترین میزان کاهش نسبت به دوره پایه متعلق به ماه نوامبر بوده که به ترتیب برابر ۲۵/۴ و ۴۵/۲ درصد است (شکل ۱۳).

#### ارزیابی عدم قطعیت شاخص‌های عملکرد سیستم

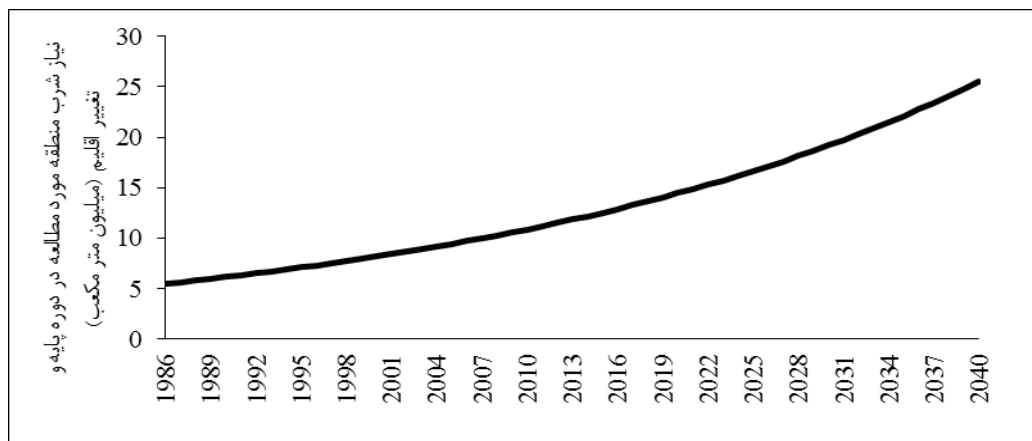
تغییرات نیازهای شرب و صنعت فیروزکوه و گرمسار همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، شاخص‌های اعتمادپذیری، انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری نیازهای شرب و صنعت فیروزکوه در شرایط موجود و تحت

مه‌آذر و همکاران (۲۰۱۸) نیز افزایش نیاز آبی محصولات عمده دشت هشتگرد (گندم، جو، ذرت و یونجه) تحت سناریوهای RCP را گزارش کردند [۲۷]. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، افزایش نیاز آبی محصولات تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 است که می‌توان آن را ناشی از کاهش بارش طی فصل رشد محصولات منطقه و نیز روند افزایشی بیشتر دمای حداقل و حداکثر در سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 تلقی کرد. افزایش تقاضای کشاورزی فیروزکوه تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب افزایش ۵/۰۳ و ۸/۴۶ درصدی را خواهد داشت، میزان افزایش تقاضای کشاورزی گرمسار تحت سناریوهای یادشده ۸/۶۶ و ۱۱/۲۸ درصد است.

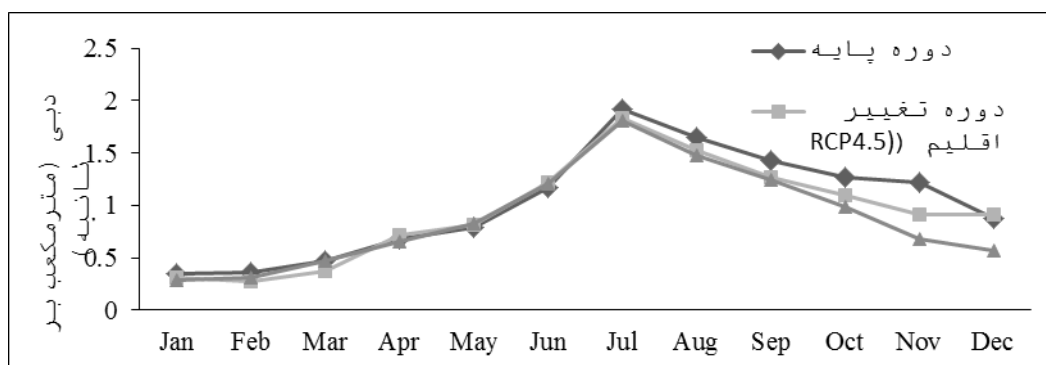
حیدری تاشه کبود و خوش‌خو (۲۰۱۹) [۳۱] و افروزی و زارع ایبانه (۲۰۲۰) [۳۲] نیز نتایج مشابهی در افزایش بیشتر تبخیر و تعرق مرجع تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 در مناطق مختلفی از ایران را گزارش کردند. برای تخمین نیاز شرب در دوره

با تقاضای بخش کشاورزی، اولویت بیشتر تأمین و نیز منبع تأمین آنها مرتبط دانست. کاربرد تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین گره‌های مصرف شرب و صنعت سبب شده است که عدم قطعیت جریان رودخانه تأثیری بر شاخص‌های عملکرد نداشته باشد.

سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 برابر با ۱۰۰ (به ازای شاخص اعتمادپذیری) و ۱ به ازای شاخص‌های انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری است. تأثیر نپذیرفتن شاخص‌های عملکرد نیازهای شرب و صنعت فیروزکوه و گرمسار را می‌توان با حجم کم نیازها در قیاس



شکل ۱۲. نیاز شرب منطقه در دوره پایه و تغییر اقلیم



شکل ۱۳. نیاز زیست‌محیطی رودخانه نمود در دوره پایه و تغییر اقلیم

جدول ۴. شاخص‌های عملکرد نیاز شرب در وضع موجود، اعمال سناریوهای اقلیمی و مدیریتی

تقاضا	S <sub>0</sub>				RCP4.5				RCP8.5			
	Rel <sup>1</sup>	Res <sup>2</sup>	Vul <sup>3</sup>	Sus <sup>4</sup>	Rel	Res	Vul	Sus	Rel	Res	Vul	Sus
نیاز فیروزکوه	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱
شرب گرمسار	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱
نیاز فیروزکوه	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱
صنعت گرمسار	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۱

Notes: <sup>1</sup> Reliability. <sup>2</sup> Resilience. <sup>3</sup> Vulnerability. <sup>4</sup> Sustainability

جریان ورودی به مخزن است. شاخص اعتمادپذیری به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر وضعیت سیستم باشد. تحت هر دو سناریوی تأمین ۸۵ و ۷۰ درصدی مصارف کشاورزی همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، نسبت به سناریوهای

### نتایج عدم قطعیت شاخص‌ها

شاخص اعتمادپذیری تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که به دلیل روند افزایشی دما، کاهش بارش‌ها و در نتیجه، کاهش

سناریوهای کاهش مصارف از اثرات عدم قطعیت کاسته می‌شود. دامنه تغییرات شاخص اعتمادپذیری کشاورزی فیروزکوه و گرمسار تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 افزایش کمتری را نشان می‌دهد. به طوری که کاهش ۸/۳۶ درصدی جریان ورودی سد نمود تحت سناریوی RCP4.5 سبب افزایش ۶۰/۲۸ و ۳۶/۴۴ درصدی دامنه تغییرات شاخص اعتمادپذیری کشاورزی فیروزکوه و نسبت به شرایط موجود می‌شود؛ که به دلیل افزایش بارش در ماه‌های مارس و می و در نتیجه، افزایش رواناب ورودی و نیز کاهش نیاز آبی کشاورزی فیروزکوه در ماه‌های مارس، آوریل و می تحت سناریوی RCP8.5 است (شکل ۱۴). در نمودارهای ۱۴ تا ۱۷ (S0) وضع موجود، (S1) سناریوی اقلیمی RCP4.5، (S2) و (S3) کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی مصارف کشاورزی تحت این سناریوی اقلیمی است.

(S4)، (S5) و (S6) نیز به ترتیب بیانگر تغییرات شاخص‌های عملکرد مخزن تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5، کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی مصارف کشاورزی است. Zhao و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که تحت سناریوی RCP8.5 شاخص اعتمادپذیری سیستم کاهش خواهد یافت و در مقابل، سناریوهایی مانند استفاده تلفیقی از منابع جدید و نیز استفاده مجدد از آب می‌تواند به عنوان راهکارهایی تطبیقی به بهبود شرایط کمک کند [۳۳].

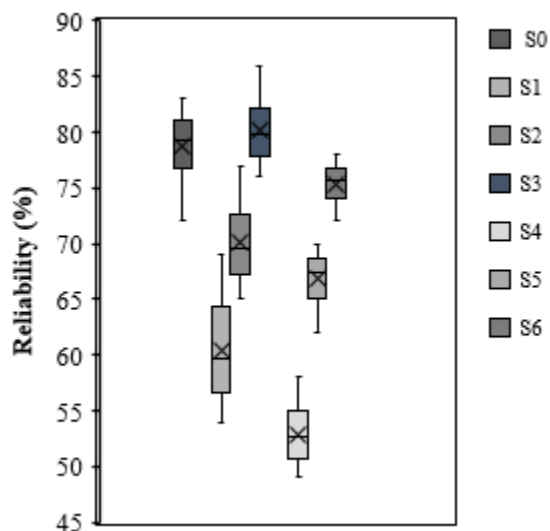
شاخص انعطاف‌پذیری تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به دلیل روند افزایشی دما، کاهش بارش و در نتیجه، کاهش جریان و از سوی دیگر، افزایش نیاز آبی محصولات کشاورزی، کاهش می‌یابند. شدت تغییرات شاخص انعطاف‌پذیری برای حوضه کشاورزی گرمسار تحت سناریوهای مختلف بیشتر از کشاورزی فیروزکوه است، اما دامنه تغییرات تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 بزرگ‌تر است. به طوری که کاهش ۱۲/۶۴ درصدی جریان ورودی سد نمود تحت سناریوی RCP8.5 سبب افزایش ۱/۵۱ برابری دامنه تغییرات شاخص انعطاف‌پذیری کشاورزی فیروزکوه می‌شود؛ که به دلیل کاهش بارش‌ها، روند افزایشی دما و در نتیجه، کاهش رواناب حوضه تحت سناریوی RCP8.5 است که منجر به افزایش تعداد شکست‌های متوالی سیستم و افت شاخص انعطاف‌پذیری می‌شود.

RCP4.5 و RCP8.5 شاخص اعتمادپذیری بهبود می‌یابد و دامنه تغییرات آن کمتر می‌شود که نشان‌دهنده ناپایداری سیستم در شرایط موجود و تحت تغییرات اقلیمی است. شدت تغییرات شاخص اعتمادپذیری در کشاورزی گرمسار شدیدتر از کشاورزی فیروزکوه است که تأثیرپذیری بیشتر کشاورزی گرمسار را نشان می‌دهد؛ اما دامنه تغییرات شاخص اعتمادپذیری در حوضه کشاورزی فیروزکوه کمتر از گرمسار است که به دلیل اولویت بیشتر آن است. در شرایط موجود حداقل مقدار این شاخص برای حوضه‌های کشاورزی گرمسار و فیروزکوه به ترتیب برابر ۷۲ و ۸۴/۵۵ و حداکثر برابر ۸۳ و ۹۰/۷۸ است که شرایط بهتر کشاورزی فیروزکوه نسبت به گرمسار در شرایط موجود را نشان می‌دهد. بیشترین میزان پراکندگی در کشاورزی فیروزکوه تحت سناریوی RCP4.5 اتفاق می‌افتد که برابر ۱۰ است. شدت تغییرات در کشاورزی گرمسار بیشتر از فیروزکوه به علت حجم بیشتر نیاز کشاورزی گرمسار نسبت به فیروزکوه است و آسیب‌پذیری بیشتر کشاورزی گرمسار در شرایط تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. بیشترین میزان کاهش شاخص اعتمادپذیری در کشاورزی گرمسار تحت سناریوی RCP8.5 اتفاق می‌افتد و حداقل برابر با ۴۹ و حداکثر ۵۸ درصد است و دامنه تغییرات کاهش ۱۸/۳۳ درصدی نسبت به شرایط موجود را نشان می‌دهد. با کاهش ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی تحت سناریوی RCP8.5 شاخص اعتمادپذیری حداقل برابر با ۷۲ و حداکثر ۷۸ درصد خواهد شد و میانگین داده‌ها افزایشی ۴۲/۵ درصدی را نسبت به سناریوی تأمین ۱۰۰ درصدی تقاضای کشاورزی نشان می‌دهد.

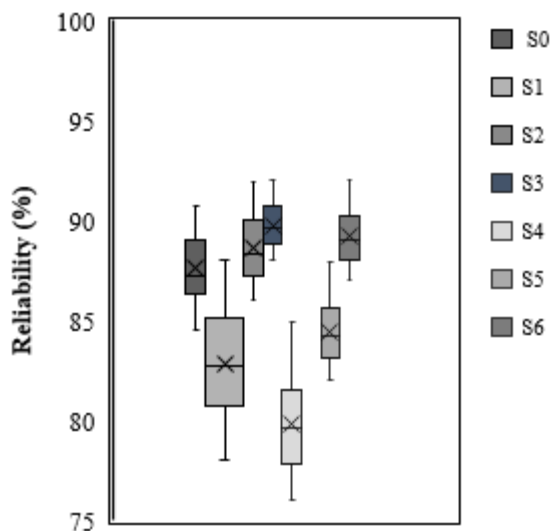
با کاهش تقاضا علاوه بر افزایش اعتمادپذیری سیستم، اثر عدم قطعیت جریان نیز کاهش می‌یابد. بهبود شاخص اعتمادپذیری فیروزکوه در شرایط تغییر اقلیم و تحت سناریوی RCP4.5 و کاهش ۳۰ درصدی مصارف کشاورزی رخ می‌دهد که نسبت به سناریوی تأمین ۱۰۰ درصدی مصرف کشاورزی، میانگین و دامنه تغییرات به میزان ۵۹/۹۷ درصد کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، با کاهش جریان ورودی به سد نمود و افزایش مصارف کشاورزی فیروزکوه و گرمسار تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 دامنه تغییرات شاخص اعتمادپذیری نیز افزایش می‌یابد، اما با اعمال

سناریوی RCP8.5 رخ می‌دهد که برای کشاورزی فیروزکوه و گرمسار مقادیر حداقل به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۲ و حداکثر برابر ۰/۴۴ و ۰/۲۸ است؛ که افزایش تأثیر عدم قطعیت جریان بر شاخص انعطاف‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم را نشان می‌دهد.

در شرایط موجود حداقل مقدار شاخص انعطاف‌پذیری برای حوضه‌های کشاورزی گرمسار و فیروزکوه برابر با ۰/۳۷ و حداکثر برابر با ۰/۴۶ و ۰/۴۳ است. در کشاورزی فیروزکوه بیشترین میزان افزایش دامنه تغییرات شاخص انعطاف‌پذیری برای کشاورزی فیروزکوه و گرمسار تحت

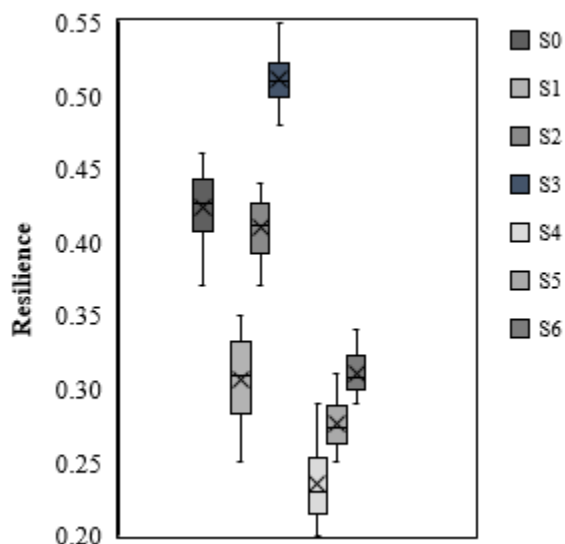


(ب-۱۴)

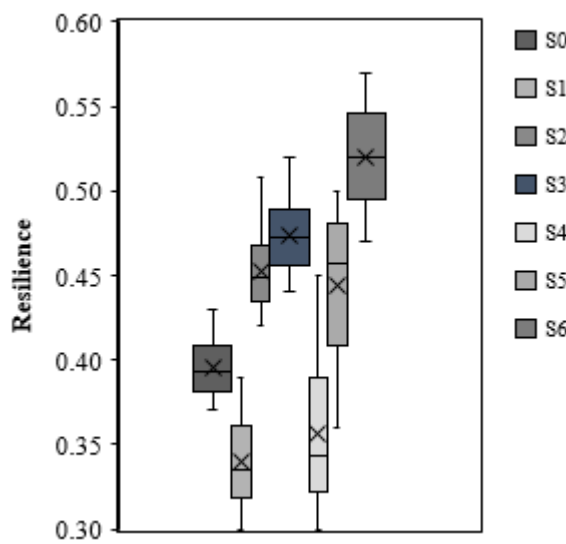


(الف-۱۴)

شکل ۱۴. نمودار شاخص اعتمادپذیری مصارف کشاورزی فیروزکوه (الف) و گرمسار (ب) تحت سناریوهای مختلف



(ب-۱۵)



(الف-۱۵)

شکل ۱۵. نمودار شاخص انعطاف‌پذیری مصارف کشاورزی فیروزکوه (الف) و گرمسار (ب) تحت سناریوهای مختلف

بیشتر مصرف کشاورزی گرمسار تحت سناریوهای اقلیمی نسبت به کشاورزی فیروزکوه دانست. تحت سناریوی

تغییرات شدیدتر شاخص انعطاف‌پذیری کشاورزی گرمسار در مقایسه با فیروزکوه را می‌توان مرتبط با افزایش

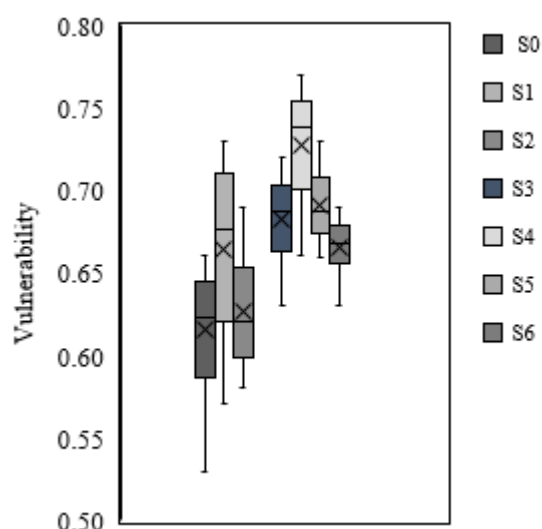


اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 و نیز کاهش جریان میزان آسیب‌پذیری تحت هر دو سناریوی یادشده برای کشاورزی فیروزکوه و گرمسار افزایش می‌یابد. در سناریوی کاهش ۳۰ درصدی مصرف کشاورزی مقادیر شاخص آسیب‌پذیری گرمسار به ترتیب حداقل و حداکثر برابر با ۰/۶۳ و ۰/۶۹ و برای کشاورزی فیروزکوه برابر با ۰/۷۱ و ۰/۷۸ می‌شود. دامنه تغییرات کشاورزی گرمسار و فیروزکوه نیز ۴۵/۶۴ و ۲۹/۵۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد، با توجه به نمودارها و مقایسه شاخص‌های آماری می‌توان چنین نتیجه گرفت که بهبود شاخص آسیب‌پذیری کشاورزی تحت سناریوهای کاهش مصرف نسبت به شاخص‌های اعتمادپذیری و انعطاف‌پذیری کمتر است؛ به بیان دیگر میانگین حجم کمبود در کشاورزی فیروزکوه با کاهش ۳۰ درصدی و تقاضا تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی تأمین ۱۰۰ درصدی به ترتیب ۴/۹۵ درصد کاهش دارد و برای کشاورزی گرمسار با کاهش ۳۰ درصدی مصرف کشاورزی تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۸/۴ درصد کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، با کاهش مصرف کشاورزی تعداد شکست‌ها، شکست‌های متوالی سیستم و نیز دامنه تغییرات کاهش یافته است، اما بر میانگین حجم کمبودها تأثیر قابل توجهی ندارد. بنابراین، برای کاهش شاخص آسیب‌پذیری سیستم راهکار کاهش مصرف کافی نیست و باید راهکارهای مدیریتی دیگر مانند استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز مورد توجه و بررسی قرار گیرد (شکل ۱۶).

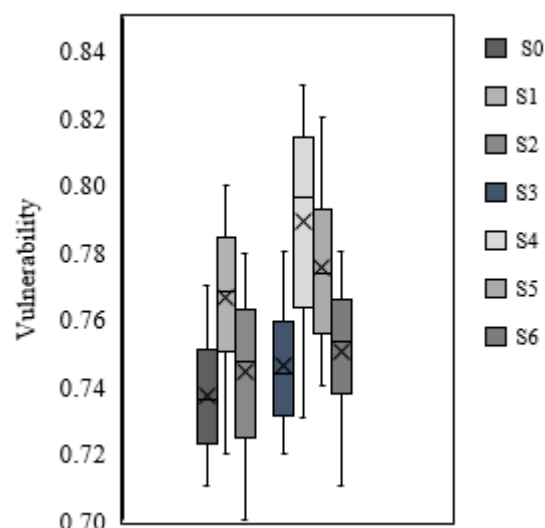
شدت تغییرات شاخص پایداری کشاورزی فیروزکوه و گرمسار تحت سناریوهای مختلف نسبت به شاخص‌های اعتمادپذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری بزرگ‌تر است. شاخص پایداری کشاورزی فیروزکوه در شرایط موجود در بازه ۰/۴۱ و ۰/۴۸ تغییر می‌کند. تحت سناریوی RCP8.5 که به‌طور متوسط منجر به کاهش ۱۲/۶۴ درصدی جریان ورودی به سد می‌شود، بیشترین کاهش شاخص پایداری اتفاق می‌افتد و دامنه تغییرات که بیانگر تأثیر عدم قطعیت جریان بر پراکندگی داده‌ها است، ۹۲/۴۹ درصد افزایش می‌یابد. با کاهش ۳۰ درصدی مصرف کشاورزی تحت سناریوی RCP8.5 شاخص پایداری کشاورزی فیروزکوه به مقادیر حداقل ۰/۴۴ و حداکثر ۰/۵۳ خواهد رسید و دامنه تغییرات نیز ۳۴/۱۹ درصد کاهش می‌یابد.

RCP4.5 با کاهش بارندگی طی فصل زراعی، روند افزایشی دما و در نتیجه آن، کاهش جریان رودخانه و افزایش نیاز آبیاری شاخص انعطاف‌پذیری نیز کاهش چشمگیری می‌یابد و به حداقل ۲۵ و حداکثر ۳۵ درصد می‌رسد. تأثیر عدم قطعیت جریان نیز بر دامنه تغییرات شاخص نمایان‌تر است. با مدیریت و کاهش مصرف در شرایط تغییر اقلیم مقادیر ماکزیمم، مینیمم، میانه و دامنه تغییرات این شاخص در کشاورزی فیروزکوه و گرمسار بهبود می‌یابد. با کاهش ۳۰ درصدی مصرف کشاورزی حوضه سد نمرد تحت سناریوی RCP4.5، مقادیر شاخص انعطاف‌پذیری برای کشاورزی گرمسار بهبود می‌یابد و حداقل مقدار این شاخص به ۴۸ و حداکثر ۵۴/۸ درصد می‌رسد. علاوه بر این، دامنه تغییرات این شاخص در سناریوی تأمین ۷۰ درصدی مصرف کشاورزی گرمسار نسبت به تأمین ۱۰۰ درصدی ۳۱/۰۷ درصد کاهش را نشان می‌دهد. در کشاورزی فیروزکوه تحت سناریوی RCP8.5 و کاهش ۳۰ درصدی مصرف کشاورزی بیشترین بهبود حاصل می‌شود و مقادیر حداقل و حداکثر شاخص انعطاف‌پذیری به ۴۷ و ۵۷ درصد می‌رسد و منجر به کاهش ۳۳/۲۵ درصدی دامنه تغییرات نسبت به سناریوی RCP8.5 می‌شود. کاهش دامنه تغییرات در هر دو حوضه کشاورزی فیروزکوه و گرمسار بیانگر کاهش تأثیرگذاری عدم قطعیت جریان در سناریوهای کاهش مصرف است. شاخص انعطاف‌پذیری در مقایسه با شاخص اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری تغییرات شدیدتری را نسبت به سناریوهای اقلیمی و کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی مصرف نشان می‌دهد و به همین علت به‌تنهایی نمی‌تواند تصویر جامعی از وضعیت سیستم ارائه دهد (شکل ۱۵).

شاخص آسیب‌پذیری نیز تحت تغییرات اقلیمی کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش احسانی و همکاران (۲۰۱۷) [۳۴] و Naz و همکاران (۲۰۱۸) [۳۵] مطابقت دارد. با در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی رواناب برای شرایط موجود به ترتیب حداقل مقدار ۰/۵۳ و ۰/۷۱ و حداکثر ۰/۶۶ و ۰/۷۷ را شامل می‌شود. بیشترین افزایش شاخص آسیب‌پذیری کشاورزی فیروزکوه و گرمسار تحت سناریوی RCP8.5 اتفاق می‌افتد که به ترتیب به ۰/۸۳ و ۰/۷۷ می‌رسد. به دلیل کاهش بارش، افزایش دمای حداکثر و حداقل و در نتیجه، افزایش نیاز آبی تحت سناریوهای

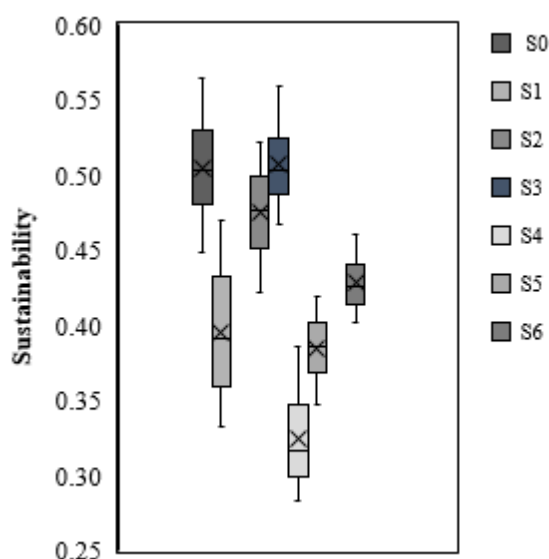


(ب-۱۶)

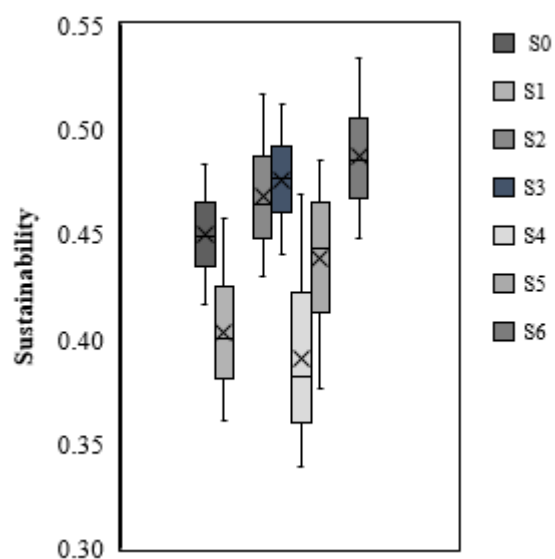


(الف-۱۶)

شکل ۱۶. نمودار شاخص آسیب پذیری مصارف کشاورزی فیروزکوه (الف) و گرمسار (ب) تحت سناریوهای مختلف



(ب-۱۷)



(الف-۱۷)

شکل ۱۷. نمودار شاخص پایداری مصارف کشاورزی فیروزکوه (الف) و گرمسار (ب) تحت سناریوهای مختلف

میزان کاهش را خواهد داشت. در سناریوی کاهش ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی تحت سناریوی RCP8.5 شاخص پایداری کشاورزی گرمسار در بازه ۰/۴ و ۰/۴۶ تغییر می‌کند و دامنه تغییرات نیز ۴۲/۱ درصد کاهش پیدا می‌کند؛ که نشان می‌دهد با کاهش مصرف می‌توان از اثرات عدم قطعیت جریان بر مقادیر شاخص پایداری کاست. تغییرات شاخص پایداری تحت این سناریو به خوبی

شکل ۱۷ نمودار تغییرات شاخص پایداری که از سه شاخص اعتمادپذیری، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری تشکیل شده است را نشان می‌دهد. شاخص پایداری کشاورزی گرمسار که در سناریوی شرایط موجود حداقل و حداکثر ۰/۴۵ و ۰/۶۲ است، به علت روند افزایشی دمای حداقل و حداکثر و کاهش بارش و در نتیجه، کاهش جریان و افزایش نیاز آبیاری تحت سناریوی RCP8.5 بیشترین

تغییرات دامنه شاخص‌های عملکرد سیستم تحت تأثیر عدم قطعیت و کاهش جریان ورودی سد نمرود ناشی از تغییرات اقلیمی می‌شود. روند افزایشی دمای حداقل و حداکثر نیز با نتایج پژوهش غلامپور و همکاران (۲۰۱۸) [۱۳] تطابق دارد.

دامنه تغییرات شاخص‌های عملکرد سیستم تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بر لزوم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی منابع آب و ارزیابی شرایط سیستم تأکید دارد. نتایج این تحقیق نشان داد استراتژی‌هایی با هدف کاهش تقاضای آب برای دستیابی به پایداری کشاورزی در منطقه ضروری است. با اعمال سناریوهای کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی در حوضه‌های گرمسار و فیروزکوه معیارهای عملکرد اعتمادپذیری و انعطاف‌پذیری افزایش یافته و آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش شاخص پایداری کشاورزی مربوط به سناریوی کاهش ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی در حوضه گرمسار و فیروزکوه تحت سناریوی RCP4.5 است. عملکرد سیستم تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و با تأمین ۱۰۰ درصدی نیاز کشاورزی دشت گرمسار به کمترین مقدار خود می‌رسد که نشان‌دهنده شرایط نامطلوب سیستم است. در سناریوهای تأمین ۸۵ و ۷۰ درصدی نیاز کشاورزی دشت گرمسار شاخص‌های عملکرد سیستم به میزان قابل توجهی بهبود پیدا می‌کنند که با نتایج پژوهش صالح‌پور و همکاران (۲۰۱۸) [۱۴]، رزاقی و همکاران (۲۰۱۴) [۱۵] و صالح‌پور و همکاران (۲۰۱۹) [۱۶] همخوانی دارد.

شاخص آسیب‌پذیری در مقایسه با شاخص‌های اعتمادپذیری و انعطاف‌پذیری تحت سناریوهای کاهش تقاضا تغییرات کمتری از خود نشان داد، بنابراین برای کاهش کمبودها، کاهش تقاضا به‌تنهایی نمی‌تواند نتایج چندان مؤثری در پی داشته باشد. تغییرات شاخص‌های عملکرد مخزن تحت سناریوهای اقلیمی و مدیریتی متغیر است که آسیب‌های وارد شده به سیستم ناشی از تغییرات اقلیمی را به‌خوبی نمایان می‌سازد. شاخص انعطاف‌پذیری بیشترین تغییرات را از خود نشان داد. شاخص پایداری قابلیت اطمینان بیشتری برای ارزیابی وضعیت سیستم در شرایط مختلف را دارد که با توجه به عدم قطعیت و تنوع پیامدهای اقلیمی این شاخص که ترکیبی از شاخص‌های

اهمیت شاخص انعطاف‌پذیری و تأثیرگذاری آن بر شاخص پایداری را نشان می‌دهد. بنابراین، همانند شاخص آسیب‌پذیری کاهش تقاضای کشاورزی به‌تنهایی نمی‌تواند راهکار کافی برای کاهش تأثیر عدم قطعیت جریان تحت سناریوهای اقلیمی بر شاخص پایداری کشاورزی گرمسار باشد (شکل ۱۷).

استفاده از این شاخص از پیچیدگی‌هایی که استفاده از چندین معیار به وجود می‌آورد، جلوگیری می‌کند و امکان ارزیابی دقیق‌تر از وضعیت سیستم را فراهم می‌آورد. تغییرات این شاخص همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت به شاخص‌های دیگر بیشتر است که به دلیل تغییرات شاخص‌های تشکیل‌دهنده آن است. دامنه تغییرات شاخص تحت هر سناریو نسبت به سایر شاخص‌ها بسیار کمتر است و در نتیجه، بر اهمیت برآورد و انتخاب این شاخص به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری می‌افزاید. با توجه به دامنه تغییرات شاخص‌های اعتمادپذیری و انعطاف‌پذیری شاخص پایداری به دلیل ضریب تغییرات کمتر و دربرگیرندگی سه شاخص دیگر باید ترجیح داده شود. محققان دیگر Mehta و همکاران (۲۰۱۳) [۱]، احمد آلی و همکاران (۲۰۱۸) [۳۶]، Adeloye و Dau (۲۰۱۹) [۳۷] و Rocha و همکاران (۲۰۲۰) [۸] نیز نتایج مشابهی در زمینه بهبود شاخص‌های عملکرد مخزن با اعمال سناریوهای کاهش تقاضا و بهینه‌سازی مخزن را گزارش کردند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش مخزن سد نمرود بر رودخانه نمرود بررسی شد و شاخص پایداری کشاورزی با استفاده از معیارهای عملکرد سیستم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و سناریوهای کاهش تقاضای آب برای حوضه‌های کشاورزی فیروزکوه و گرمسار ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در شرایط فعلی حوضه نمرود به دلیل عدم توازن منابع و مصارف و وجود تغییرات اقلیمی شرایطی ناپایدار دارد که منجر به تنش آبی در حوضه‌های کشاورزی فیروزکوه و گرمسار شده است.

خروجی مدل EC-EARTH تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان‌دهنده افزایش دمای حداقل، حداکثر و کاهش بارش‌ها و افزایش تبخیر و تعرق در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۶) است که منجر به کاهش جریان رودخانه شده و سبب

- reservoir in Luanhe River basin of China and drought impacts under environmental change. *Theor Appl Climatol*. 2019;137(3-4):2393-408.
- [7].Hernández-Bedolla J, Solera A, Paredes-Arquiola J, Pedro-Monzonís M, Andreu J, Sánchez-Quispe S. The assessment of sustainability indexes and climate change impacts on integrated water resource management. *Water (Basel)*. 2017;9(3):213.
- [8].Rocha J, Carvalho-Santos C, Diogo P, Beça P, Keizer JJ, Nunes JP. Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal). *Sci Total Environ*. 2020;736(139477):139477.
- [9].Ahmadi M, Haddad OB, Loáiciga HA. Adaptive reservoir operation rules under climatic change. *Water Resour Manage*. 2015;29(4):1247-66.
- [10]. Ehteram M, Mousavi SF, Karami H, Farzin S, Singh VP, Chau K-W, et al. Reservoir operation based on evolutionary algorithms and multi-criteria decision-making under climate change and uncertainty. *J hydroinformatics*. 2018;20(2):332-55.
- [11]. Ashofteh P-S, Rajaei T, Golfam P. Assessment of water resources development projects under conditions of climate change using efficiency indexes (EIs). *Water Resour Manage*. 2017;31(12):3723-44.
- [12]. Keteklahijani VK, Alimohammadi S, Fattahi E. Predicting changes in monthly streamflow to Karaj dam reservoir, Iran, in climate change condition and assessing its uncertainty. *Ain Shams Eng J*. 2019;10(4):669-79.
- [13]. Gholampour, A. Ashrafzadeh, A. Pirmoradian, N. Moussavi, S. Investigating the role of downscaling and reference evapotranspiration estimation method in analysis of the impact of climate change on water resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2018; 49(4): 841-852. doi: 10.22059/ijswr.2018.240855.667748. [Persian].
- [14]. Salehpour, J. Ashrafzadeh, A. Moussavi, S. Water Resources Allocation Management in the Hablehroud Basin Using a Combination of the SWAT and WEAP Models. *Iran-Water Resources Research*, 2018; 14(3): 239-253. [Persian]
- [15]. Razaghi, P. Babazadeh, H. Shourian, M. Development of multi-purpose reservoir operation hedging rule in water resources shortage conditions using MODSIM8.1. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 2014; 3(2): 11-23. [Persian]
- دیگر است، وضعیت جامع‌تری از سیستم ارائه خواهد داد و بنابراین، نسبت به شاخص‌های دیگر ارجحیت دارد.
- در این پژوهش راهکارهایی که منجر به کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی تقاضای کشاورزی می‌شود مانند کاهش سطح زیر کشت، تغییر و بهینه‌سازی الگوی کشت، استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش راندمان آبیاری و جیره‌بندی مخزن و پیامدهای احتمالی اقتصادی و اجتماعی آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است که می‌تواند در تحقیقات آتی لحاظ شود. همچنین، در این پژوهش تأثیرات عدم قطعیت جریان خروجی مدل بارش - رواناب IHACRES با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بر شاخص‌های عملکرد سیستم ارزیابی شد. در نظر گرفتن سایر منابع عدم قطعیت مانند مدل‌های اقلیمی، مدل‌های ریزمقیاس ساز، مدل‌های برآورد نیاز آبی و نیز مدل هیدرولوژیکی و تأثیرات آن بر شاخص‌های عملکرد نیز می‌تواند در تحقیقات آتی مطالعه شود، زیرا بر دامنه تغییرات شاخص‌های عملکرد سیستم تأثیرگذار است.

#### منابع

- [1].Mehta VK, Haden VR, Joyce BA, Purkey DR, Jackson LE. Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agric Water Manag*. 2013;117:70-82.
- [2].Joyce BA, Mehta VK, Purkey DR, Dale LL, Hanemann M. Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California's central valley. *Clim Change*. 2011;109(S1):299-316.
- [3].Teng J, Vaze J, Chiew FHS, Wang B, Perraud J-M. Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff. *J Hydrometeorol*. 2012;13(1):122-39.
- [4].Peel MC, Srikanthan R, McMahon TA, Karoly DJ. Uncertainty in runoff based on Global Climate Model precipitation and temperature data - Part 2: Estimation and uncertainty of annual runoff and reservoir yield [Internet]. 2014. Available from: <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-11-4579-2014>
- [5].de O. Vieira E, Sandoval-Solis S. Water resources sustainability index for a water-stressed basin in Brazil. *J Hydrol Reg Stud*. 2018;19:97-109.
- [6].Li J, Gao Z, Guo Y, Zhang T, Ren P, Feng P. Water supply risk analysis of Panjiakou

- [16]. Salehpour, J. Ashrafzadeh, A. Moussavi, S. Technical Note: Investigating the effect of climate change on flow of the Hablehroud Basin. *Watershed Engineering and Management*, 2019; 11(4): 1140-1153. doi: 10.22092/ijwmse.2018.116258.1377. [Persian].
- [17]. Report S. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. Pachauri RK, Meyer LA, editors.
- [18]. Nury A, Alam M. Performance Study of Global Circulation Model HADCM3 Using SDSM for Temperature and Rainfall in North-Eastern Bangladesh. *Journal of Scientific Research*. 2013;6(1):87-96.
- [19]. Croke BFW, Andrews F, Jakeman AJ, Cuddy SM, Luddy A. IHACRES Classic Plus: A redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. *Environ Model Softw*. 2006;21(3):426-7.
- [20]. Thomas J, B Fiering M. 12. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: *Design of Water-Resource Systems*. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press; 1962. p. 459-93.
- [21]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO; 2004.
- [22]. Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*. 1976;1(4):6-10.
- [23]. Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour Res*. 1982;18(1):14-20.
- [24]. Zareabyaneh, H. GHobaeisoogh, M. Mosaedi, A. Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change. *Water and Soil*, 2015; 29(2): 374-392. doi: 10.22067/jsw.v0i0.36472. [Persian].
- [25]. kamyar, A. Movahedi, S. Yazdanpanah, H. Projection of Minimum and Maximum Air Temperatures in Isfahan Province during 2050-2017. *Journal of Climate Research*, 2017; 1396(29): 37-54. [Persian]
- [26]. Houshyar, M. Sobhani, B. Hosseini, S. Future projection of Maximum Temperature in Urmia through Downscaling output of CanESM2 Model. *Geography and Planning*, 2018; 22(63): 305-325. [Persian].
- [27]. Abbasian MS, Najafi MR, Abrishamchi A. Increasing risk of meteorological drought in the Lake Urmia basin under climate change: Introducing the precipitation-temperature deciles index. *J Hydrol (Amst)*. 2021;592(125586):125586.
- [28]. Boonwichai S, Shrestha S, Babel MS, Weesakul S, Datta A. Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *J Clean Prod*. 2018;198:1157-64.
- [29]. Kalbali E, Ziaee S, Najafabadi MM, Zakerinia M. Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *J Clean Prod*. 2021;280(124067):124067.
- [30]. Mehrazar, A. Massah Bavani, A. Mashal, M. Rahimkhoob, H. Assessment of Climate Change Impacts on Agriculture of the Hashtgerd Plain with Emphasis of AR5 Models Uncertainty. *Irrigation Sciences and Engineering*, 2018; 41(3): 45-59. [Persian].
- [31]. Heydari Tasheh Kaboud S, Khoshkhoo Y, University of Kurdistan. Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the West of Iran under RCP emission scenarios. *researches in Geographical Sciences*. 2019;19(53):157-76.
- [32]. Afruzi, A. Zare Abyaneh, H. Investigation of Agricultural Water Demand under the Combination Scenarios of Climate Change, Irrigation Efficiency Enhancement, Cropping Pattern Changes, and the Development of Early-Maturing Cultivars: a Case Study of Hamedan-Bahar Plain. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 2020; 14(1): 61-75
- [33]. Zhao G, Gao H, Kao S-C, Voisin N, Naz BS. A modeling framework for evaluating the drought resilience of a surface water supply system under non-stationarity. *J Hydrol (Amst)*. 2018;563:22-32.
- [34]. Ehsani N, Vörösmarty CJ, Fekete BM, Stakhiv EZ. Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *J Hydrol (Amst)*. 2017;555:435-46.
- [35]. Naz BS, Kao S-C, Ashfaq M, Gao H, Rastogi D, Gangrade S. Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States. *J Hydrol (Amst)*. 2018;556:359-70.
- [36]. Ahmadaali J, Barani G-A, Qaderi K, Hessari B. Analysis of the effects of water management

strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia lake basin, Iran. *Water (Basel)*. 2018;10(2):160.

[37]. Adeloje AJ, Dau QV. Hedging as an

adaptive measure for climate change induced water shortage at the Pong reservoir in the Indus Basin Beas River, India. *Sci Total Environ*. 2019;687:554–66.