



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

صفحه‌های ۵۸-۴۳

### بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بهره‌برداری از مخازن سطحی حوضه گرگانود

امیرحسین شفا<sup>۱</sup>، شهاب عراقی‌نژاد<sup>۲</sup>، علیرضا مساح بوانی<sup>۳\*</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران - ایران.
۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج - ایران.
۳. دانشیار گروه مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت - ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۰۹

#### چکیده

در این تحقیق، اثر پدیده تغییر اقلیم بر مدیریت مخازن سطحی حوضه گرگانود بررسی شده است. بدین منظور اطلاعات مورد نیاز منطقه از مدل گردش عمومی CGCM<sup>۱</sup> شامل مقادیر بارندگی و درجه حرارت، برای دوره (۱۳۹۰-۱۴۱۴)، تحت سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A<sub>2</sub> تأمین و به روش SDSM<sup>۲</sup> ریزمقیاس شد. نتایج در مجموع نشان‌دهنده کاهش حدود چهار درصدی بارش متوسط سالیانه و افزایش ۰/۰۵ درجه‌ای حرارت سالیانه است. برای بررسی تأثیر این تغییرات بر جریان رواناب در شاخه‌های حوضه گرگانود از روش آماری تابع توزیع احتمال توأم<sup>۳</sup> استفاده شد و مقادیر رواناب برای دوره آماری (۱۳۹۰-۱۴۱۴) پیش‌بینی شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش رواناب در حدود چهار درصد، در دوره مربوط بوده است. در ادامه با استفاده از نتایج به‌دست آمده از سناریوی تغییر اقلیم و مدل WEAP<sup>۴</sup>، تغییرات بیلان آبی مخازن و مقادیر تخصیص در دوره (۱۳۹۰-۱۴۱۴) در گره‌های مصرف، بررسی شد. بنابر نتایج به‌دست آمده، میانگین تخصیص از ۹۲ به ۹۰ درصد و میانگین ذخایر مخازن نیز حدود ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهد که از ارزیابی‌های مدیریت منابع آب گذشته نمی‌توان برای آینده استفاده کرد.

**کلیدواژه‌ها:** بهره‌وری از مخازن، تغییر اقلیم، حوضه گرگانود، منابع آب سطحی، SDSM، WEAP.

1. Coupled Global Climate Model 3
2. Statistical Downscaling Model
3. Joint Probability Distribution
4. Water Evaluation And Planning System

## مقدمه

براساس گزارش IPCC، زمین طی قرن بیستم ۰/۶ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر شده و براساس تخمین تجمع گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمایی معادل ۱ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ میلادی پیش‌بینی می‌شود. گرم شدن زمین تا پایان قرن بیست‌ویکم، بیش از آنچه طی ۱۰۰۰۰ سال گذشته رخ داده است، خواهد بود (۴). تأثیرات تغییر اقلیم به‌صورت تغییر مقدار رواناب سطحی و آب‌های زیرزمینی نیز نمود پیدا می‌کند. تخمین‌ها حاکی از این است که متوسط تغییرات رواناب بر اثر پدیده تغییر اقلیم، بیشتر از تغییرات بارش است و این نسبت در مناطق خشک بیشتر از مناطق دارای آب‌وهوای مرطوب است (۱۳). همچنین در مناطق خشک، نسبت رواناب سالانه به بارش سالانه کمتر از مناطق تر خواهد بود. در حوضه رودخانه‌هایی که هیدرولوژی آنها وابسته به مقدار ذوب برف است، تغییرات فصلی مقدار رواناب و پیش‌بینی تغییرات رواناب بر اثر تغییرات تبخیر و بارش پیچیده‌تر خواهد بود. برای مثال، ازدیاد دما علاوه بر اینکه موجب افزایش تبخیر پتانسیل می‌شود، جابه‌جایی هیدروگراف رواناب از فصل بهار به زمستان را در پی خواهد داشت.

پدیده تغییر اقلیم و آثار آن، از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب و انرژی به‌شمار می‌رود. بسیاری از تحقیقات انجام‌گرفته و در حال اجرا در زمینه آب و انرژی از دهه آخر قرن بیستم تاکنون، معطوف به بررسی این پدیده و آثار آن بوده است.

در یک تحقیق دما و بارش به‌دست آمده از ۱۶ مدل گردش عمومی، با دو سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A<sub>2</sub> و B<sub>2</sub> با استفاده از روش‌های آماری برای حوضه آبریز ریولامپا<sup>۱</sup> در آمریکای مرکزی، کوچک‌مقیاس و سپس مدل

VIC<sup>۲</sup> با استفاده از این داده‌ها اجرا شد. هدف تحقیق، بررسی آثار تغییرات اقلیم بر ورودی آب دو مخزن بزرگ تولید برقایی بود. بر اساس این مطالعات تا پایان قرن حاضر، دمای حوضه تحت سناریوی B<sub>1</sub>، ۱/۹ و دمای حوضه تحت سناریوی A<sub>2</sub>، ۳/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت، درحالی‌که متوسط بارندگی در حوضه، ۵ درصد تحت سناریوی B<sub>1</sub> و ۱۰/۴ درصد تحت سناریوی A<sub>2</sub> کاهش خواهد یافت. همچنین تا پایان قرن حاضر، ورودی به مخازن بین ۱۳ درصد تحت سناریوی B<sub>1</sub> و ۲۴ درصد تحت سناریوی A<sub>2</sub> کاهش خواهد یافت. براساس نتایج این تحقیق تا پایان قرن، شاهد کاهش ۳۳ تا ۵۳ درصدی ظرفیت تولید برقایی مخازن این حوضه خواهیم بود (۱۴). در تحقیقی دیگر، تأثیر تغییر اقلیم بر سیستم تأمین آب در حوضه رودخانه وارتا در لهستان ارزیابی شد. در این ارزیابی با استفاده از دو سناریوی تغییر اقلیم، افزایش تقاضای آب (نیاز آبی) - به‌خصوص آبیاری - بررسی شد. این مطالعه نشان داد که بدون در نظر گرفتن آثار تغییر اقلیم، تا سال ۲۰۵۰ میلادی، به‌دلیل افزایش تقاضای آب، مشکلاتی در تأمین آب به‌وجود خواهد آمد. تحت یکی از سناریوها، ورودی‌ها به مخزن ذخیره افزایش خواهد یافت و این افزایش به اندازه‌ای است که برای جلوگیری از مشکلات تأمین آب کفایت خواهد کرد. تحت سناریوی دیگر، احتمال کسری آب اساساً افزایش می‌یابد (برای مثال احتمال کسری سالانه آب به مقدار ۱۰ درصد، از ۴ درصد فعلی به ۲۵ درصد افزایش خواهد یافت). همچنین در این تحقیق امکان اجرای یک گزینه سازگاری برای سازگار شدن با شرایط یعنی انتقال آب از یک مخزن به مخزن دیگر بررسی شد و نتایج نشان داد که چگونه این روش خطر کسری آب را کاهش می‌دهد (۱۲).

2. Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model

1. Rio Lampa

سناریوی ترکیبی برای دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۴۱۴ میلادی تجزیه و تحلیل شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز گرگانرود - قره‌سو در بخش جنوب شرقی دریای خزر قرار دارد و در دسته‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر به‌شمار می‌رود. این حوضه در محدوده طول جغرافیایی ۵۴° ۰۰' تا ۲۹° ۵۶' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶° ۳۶' تا ۳۷° ۴۷' شمالی واقع شده و از شمال و شرق به حوضه رودخانه اترک، از جنوب به حوضه‌های آبریز کویر نمک و از جنوب غربی به حوضه رودخانه نکا محدود است. در حوضه گرگانرود - قره‌سو، هفت سد مخزنی در حال بهره‌برداری هستند که سه سد گلستان، بوستان و وشمگیر بر روی رودخانه گرگانرود و سدهای محمودآباد، رامیان، نرماب و کبودال بر روی رودخانه‌های فرعی این حوضه احداث شده است. در شکل ۱ موقعیت حوضه نسبت به کل کشور نشان داده شده است (۱).

برای اجرای تحقیق حاضر از آمار بارش و دمای پنج ایستگاه هواشناسی در حوضه از سازمان هواشناسی کل کشور در بازه زمانی ۳۰ ساله از سال آبی ۱۳۵۶-۵۷ تا سال آبی ۱۳۸۵-۸۶ تهیه و استفاده شده است. در این مطالعه، حوضه آبریز گرگانرود به پنج بخش تقسیم شده و در هر بخش، یک ایستگاه هواشناسی به‌عنوان ایستگاه شاخص برای کل زیرحوضه مورد نظر انتخاب شده است (شکل ۱). شایان ذکر است که ایستگاه‌های انتخاب‌شده از نظر آماری بهترین وضعیت را داشتند و بهترین همپوشانی را با تاریخ‌های مورد نیاز ما برقرار می‌کردند.

هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC)<sup>۱</sup> نتیجه‌گیری کرده است که بسامد و شدت وقایع حدی مانند خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها با افزایش آثار پدیده تغییر اقلیم، رو به افزایش است، درحالی‌که حتی تغییر کوچکی در متغیرهای هیدرولوژیکی ممکن است به تغییرات محسوسی در عملکرد سیستم‌های منابع آب منجر شود. از این رو بررسی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب از ضروریات برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب کشورها، به‌ویژه کشورهای واقع در نیمکره شمالی (از جمله ایران) است (۱۰). بنابراین، ضرورت تحقق اهداف این تحقیق در قالب بهبود طراحی‌ها و برنامه‌ریزی منابع آب تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، که نیازمند آگاهی از چگونگی تغییرات جریان رودخانه و مصارف است، قابل بیان است. تاکنون در زمینه تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب، ارزیابی‌های فراوانی در بخش‌های آشکارسازی، تأثیر آن بر جریان رودخانه و مدیریت منابع آب، به‌صورت مجزا و گاه همزمان صورت گرفته است، اما تحقیقی که همزمان همه این موارد و بازخورد تغییر اقلیم و تغییرات منابع و مصارف را در یک مدل حقیقی مدیریت منابع آب در نظر بگیرد کمتر صورت گرفته است که این مهم در این تحقیق لحاظ شده است و از این نظر، نوآوری محسوب می‌شود.

هدف تحقیق حاضر، بررسی آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و مقادیر جریان در سرشاخه‌های رودخانه‌های حوضه گرگانرود و اعمال یک تحلیل حساسیت کلی از تغییرات رواناب و مصارف موجود و بررسی آثار این تغییرات بر مقادیر تخصیص در نقاط مصرف و مقدار ذخایر مخازن حوضه آبریز گرگانرود است. در این راستا یک سناریوی اقلیمی، پنج سناریوی کاهش رواناب، چهار سناریوی افزایش مصرف و ده

1. Intergovernmental Panel on Climate Change



دقیق هیدرولوژیکی در دسترس نباشد و روش‌های پیچیده مدلسازی به اندازه کافی دقیق نباشند، مدل‌های رگرسیونی به‌عنوان مدل هیدرولوژیکی مطرحند (۸). با توجه به قدمت زیاد مدل‌های پارامتری، در این تحقیق از یک مدل رگرسیونی پارامتری برگرفته از تابع توزیع احتمال توأم شرطی برای تخمین مقادیر آبدهی استفاده شده است (۱۷). مدل‌های رگرسیونی پارامتری با تخمین پارامترهای مدل با استفاده از روش‌های خاص، نگاهی میان متغیرهای مستقل و وابسته برقرار می‌کنند. در این مطالعه، برای محاسبه رواناب از یک ویژگی منحصر به فرد آماری تابع توزیع احتمال شرطی (معادله‌های ۱ و ۲) استفاده شده و با توجه به اینکه آبدهی سالانه دارای بیشترین همبستگی با متغیر بارش سالانه است، آبدهی سالانه به‌عنوان متغیر وابسته (y) و بارش سالانه به‌عنوان متغیر مستقل (x) در نظر گرفته شده است.

$$\mu_{|P} = \mu_I + \frac{\sigma_I(P - \mu_P)}{\sigma_P} \times \rho \quad (1)$$

$$\sigma_{|P} = \sqrt{(1 - \rho^2)} \sigma_I \quad (2)$$

در این رابطه‌ها،  $\mu_I$  میانگین رواناب،  $\sigma_I$  انحراف معیار رواناب،  $\rho$  ضریب همبستگی بین داده‌های تاریخی بارش و رواناب،  $\mu_P$  میانگین بارش و  $\sigma_P$  انحراف معیار بارش است. برای استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ باید مقادیر آبدهی سالانه (برای تعیین  $\mu_y$ ) با استفاده از مقادیر بارش محاسبه شوند. بدین منظور، در تحقیق حاضر با استفاده از مقادیر مشاهداتی بارش سالانه، آبدهی سالانه و با به‌کارگیری روش رگرسیون خطی، روابط جداگانه‌ای میان بارش سالانه و هر یک از مقادیر آبدهی برقرار شد. سپس با استفاده از روابط به‌دست‌آمده و معادله‌های ۱ و ۲، آبدهی سالانه برای بارش‌های کوچک‌مقیاس شده محاسبه شد.

می‌شود. امروزه دو کلاس متفاوت از دیدگاه ریزمقیاس کردن در جوامع علمی مطرح می‌شود. روش‌های دینامیکی که شامل حل صریح سیستم‌ها بر پایه فرایندهای فیزیکی - دینامیکی آنها است و روش‌های آماری که با هدف توسعه روابط بین متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس و متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای و شناسایی روابط بین سیستم‌ها با استفاده از داده‌های مشاهداتی توسعه داده شده‌اند (۲).

در اجرای این تحقیق از مدل SDSM که یک مدل ریزمقیاس‌کننده آماری است و قابلیت توسعه سریع و کم‌هزینه داده‌های ریزمقیاس‌شده در مقیاس ایستگاهی را به‌صورت روزانه، ماهانه، فصلی یا سالانه دارد، استفاده شده است. این مدل بر اساس داده‌های روزانه اقلیم محلی (بارش و دما) و داده‌های بزرگ‌مقیاس ناحیه‌ای NCEP<sup>۱</sup> تنظیم می‌شود. این مدل برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای کوچک‌مقیاس محلی و متغیرهای بزرگ‌مقیاس جوی از داده‌های مستقل مشاهداتی استفاده می‌کند. مدل SDSM از روش‌های آماری و رگرسیونی و استوکاستیک به‌منظور ریزمقیاس کردن استفاده می‌کند. این مدل ترکیبی از مدل مولدهای آب‌وهوایی و مدل رگرسیونی است. این روش بهترین نتایج را برای مولد هواشناسی استوکاستیکی و روش‌های رگرسیونی ارائه می‌دهد. زیرا در این روش از الگوهای گردش روزانه بزرگ‌مقیاس مانند متغیرهای رطوبت اتمسفر در مقیاس ایستگاهی استفاده می‌شود (۱۵).

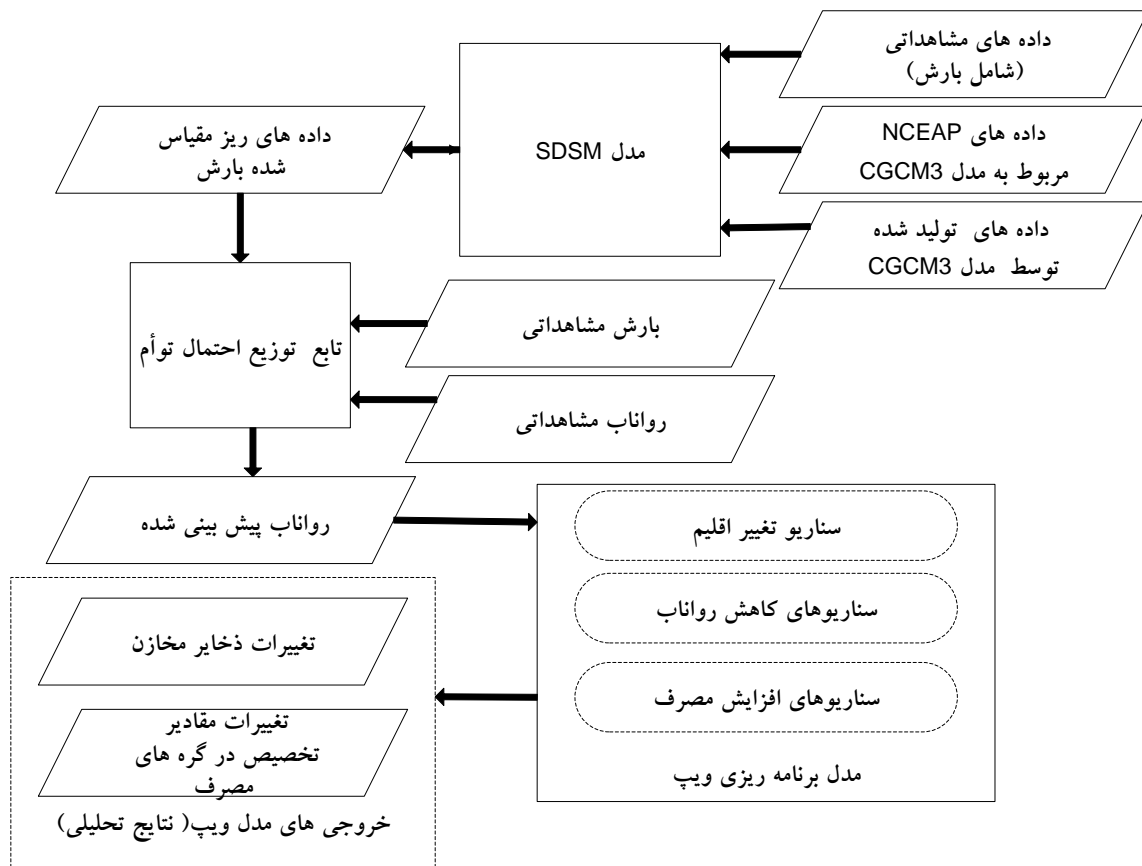
### شبیه‌سازی بارش - رواناب

برای بررسی آثار تغییر اقلیم بر رواناب حوضه، باید داده‌های اقلیمی تولیدشده توسط مدل GCM پس از ریزمقیاس‌سازی به رواناب تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی بارش - رواناب وجود دارد. اگر اطلاعات

## شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه و اعمال سناریوهای مختلف

در این تحقیق برای مدل کردن تقاضا، مصارف و ارتباط آنها با منابع تأمین آب از مدل WEAP استفاده شده است. پایه نرم‌افزار WEAP محاسبه بیلان آب است که در آن، همزمان به مدیریت منابع آب و مدیریت محیط زیست توجه شده است. ساختار مدیریتی در WEAP با استفاده از سناریوهایی که در آن نوشته می‌شود و نشان‌دهنده وضعیت آینده آب در آن منطقه است، تعریف می‌شود. با تغییر این سناریوها می‌توان تأثیر آب‌وهوا، مدیریت کاربری اراضی، تقاضا، تنظیمات و برنامه‌ریزی‌ها را مشخص کرد. سناریوها از سال پایه اخذ می‌شود؛ از این رو اولین گام در استفاده از مدل، شبیه‌سازی منطقه تحقیق در سال پایه است. منظور از شبیه‌سازی منطقه تحقیق در سال پایه، برآورد مناسب

وضعیت منابع و مصارف در وضع موجود در سال ۱۳۸۲ است (۷). در این تحقیق، سناریوی پایه با استفاده از داده‌های تاریخی ایستگاه‌های هیدرومتری (سازمان تحقیقات منابع آب کل کشور)، بیلان مخازن و مصارف حوضه، تنظیم شده است. با استفاده از اطلاعاتی که در گزارش جاماب (۱۳۸۴) بیان شد و در این تحقیق، به‌کار گرفته شد (شکل ۳)، در این حوضه ۲۴ نقطه مصرف وجود دارد. در کل ۹۴/۴ درصد مصارف حوضه از نوع کشاورزی و ۴/۵ درصد، مصرف شهری و روستایی است و ۰/۰۴۸ درصد به صنایع اختصاص دارد. در این حوضه ۶۴/۸ درصد مصارف حوضه از آب‌های زیرزمینی و ۳۵/۲ درصد از آب‌های سطحی تأمین می‌شود (۱).

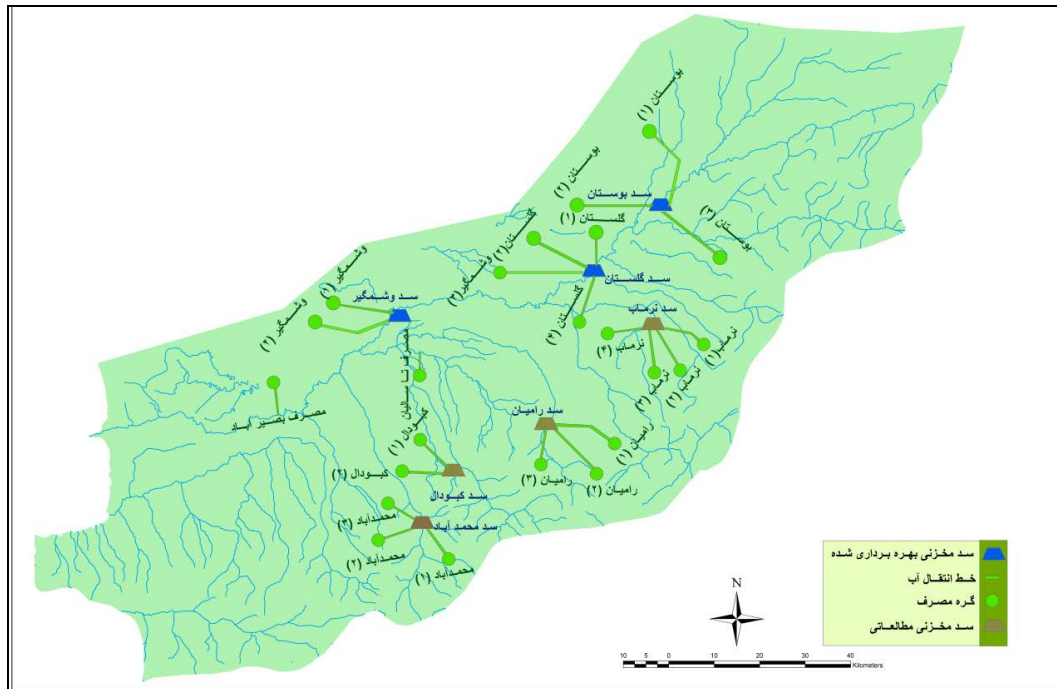


شکل ۲. الگوریتم کلی تحقیق

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲





شکل ۳. پیکربندی منابع و مصارف حوضه گرگانرود

مقدار مصرف آب سالانه به ازای هر واحد مصرف است. شایان ذکر است که پارامتر  $T_{BR}$  برای اراضی کشاورزی، سطح زیرکشت؛ و برای مکان‌های مصرف شهری و روستایی، مقدار تولید در طول سال است. برای محاسبه نیاز از منبع عرضه در مکان مصرف، باید مقدار تلفات در مکان مصرف، مقدار جریان قابل توزیع مجدد در مکان مصرف، یا در صورت وجود، کاربرد الگوهای مدیریتی در هر مکان مصرف را در نظر گرفت. در نهایت پس از وارد کردن اطلاعات لازم به مدل، شبیه‌سازی در سال پایه انجام می‌گیرد. برای شبیه‌سازی منطقه در سال پایه تا حد ممکن سعی شده داده‌ها طوری تعدیل شوند که شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعی منطقه نزدیک باشد (V).

### سناریوهای مدیریتی

بعد از مدل‌سازی منطقه در سال پایه، برای شناسایی آثار تغییر اقلیم و نحوه پاسخ‌دهی سیستم به تنش‌های ناشی از

در شکل ۲ الگوریتم کلی این تحقیق ارائه شده است. بررسی تغییرات آبی عرضه و تقاضا در سطح حوضه آبریز، با کمک سناریوی مرجع صورت می‌گیرد که یک سناریوی پایه است که در آن از داده‌های واقعی استفاده شده است تا بتوان بهترین تخمین از دوره مطالعه را انجام داد. همچنین سناریوی مرجع نشان می‌دهد که اگر روند کنونی در آینده ادامه یابد، چه اتفاقی خواهد افتاد. در این مطالعه، سال پایه، ۱۳۸۲ و سال انتهایی برای مدل‌سازی، ۱۴۱۲ انتخاب شده است.

در مدل WEAP نیاز یک مکان مصرف‌کننده به‌عنوان مجموعه‌ای از نیازها برای تمامی شاخه‌های زیردست مکان مصرف‌کننده محاسبه می‌شود. کل تقاضای سالانه هر مکان مصرف را می‌توان از معادله زیر به‌دست آورد:

$$A_{DS} = (\sum T_{BR} * W_{BR}) \quad (3)$$

در این رابطه،  $A_{DS}$  مقدار تقاضای سالانه برای هر مکان مصرف،  $T_{BR}$  درصد فعالیت برای هر مکان مصرف و  $W_{BR}$

### مدیریت آب و آبیاری

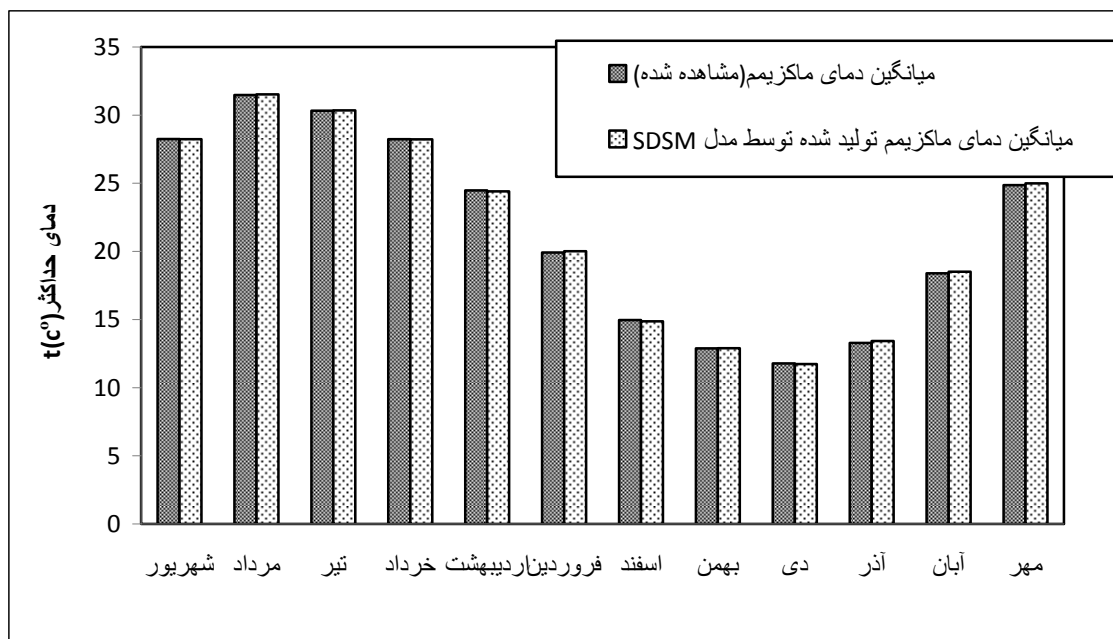
سناریوهای ترکیبی که از ترکیب سناریوهای قبلی ایجاد شده‌اند. برای مثال، سناریوی  $R_1-D_1$  یعنی افزایش تقاضا، ۱۰ درصد و کاهش رواناب، ۵ درصد است. در مجموع در این تحقیق، ۲۰ سناریو تهیه و اجرا شد.

### نتایج و بحث

#### ریزمقیاس کردن داده‌های مدل گردش عمومی CGCM3-A2

همان‌طور که در بخش روش‌شناسی اشاره شد، در این تحقیق از مدل آماری SDSM برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی بارش و دما استفاده شد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در همه ایستگاه‌های بررسی‌شده، تطابق قابل قبولی را بین داده‌های تاریخی و داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط مدل نشان می‌دهد که برای نمونه نتایج حاصل از صحت‌سنجی مربوط به ایستگاه مزرعه نمونه، در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

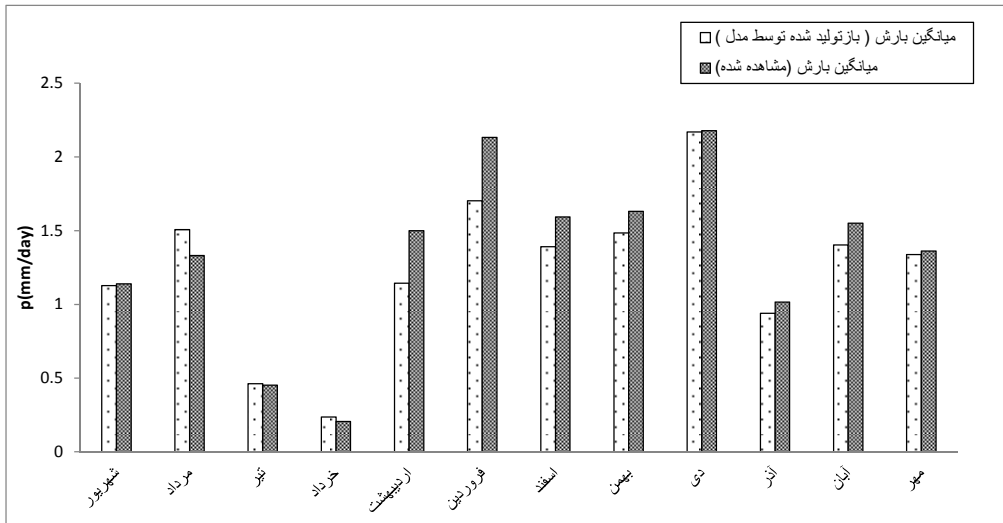
افزایش تقاضا و کاهش رواناب، سناریوهای مختلفی طرح‌ریزی شد تا در نهایت یک تحلیل حساسیت کلی نسبت به این دو تنش وارد بر سیستم، در دسترس مدیران آبی باشد. سناریوهای بررسی‌شده در این مقاله چهار دسته‌اند. دسته اول، سناریوی تغییر اقلیم، که در آن، داده‌های مربوط به دبی ماهانه رودخانه‌ها با داده‌هایی که با توجه به شرایط تغییر اقلیم تغییر کرده‌اند، جایگزین می‌شود. در این سناریو فرض شده که تغییرات اقلیمی مطابق مدل پیش‌بینی آب‌وهوایی CGCM3 صورت گرفته است. دسته دوم، سناریوهای کاهش رواناب که در آنها، رواناب به مقدار ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. این سناریوها به اختصار، به ترتیب  $R_1, R_2, R_3, R_4$  و  $R_5$  نام‌گذاری شده‌اند. دسته سوم، سناریوهای افزایش تقاضا که در آنها فرض شده مقدار تقاضا در نقاط مصرف، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. این سناریوها به اختصار، به ترتیب  $D_1, D_2, D_3, D_4$  نام‌گذاری شده‌اند و در نهایت



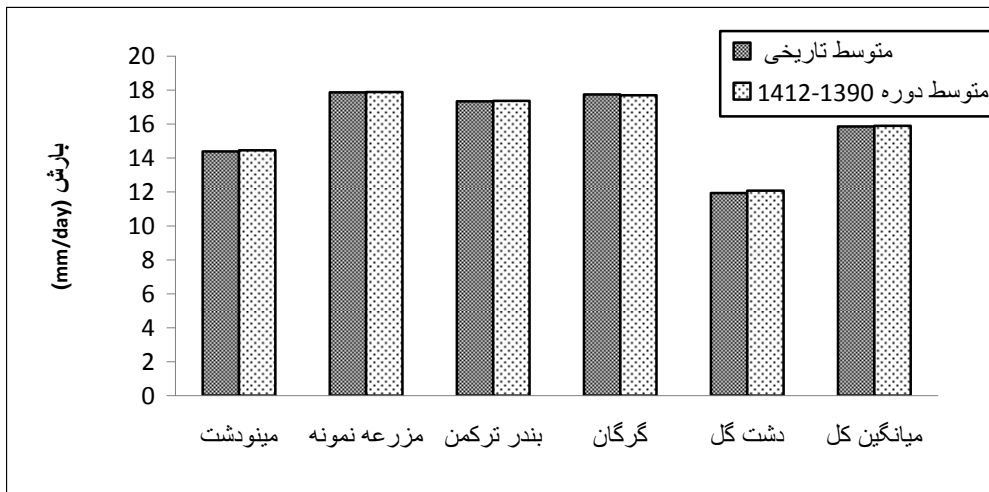
شکل ۴. میانگین درازمدت دمای ماکزیمم ریزمقیاس‌شده و مشاهداتی در دوره ۱۳۵۶-۱۳۸۲ در ایستگاه مزرعه نمونه



بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بهره‌برداری از مخازن سطحی حوضه گرگانرود



شکل ۵. میانگین درازمدت بارش ریزمقیاس شده و مشاهداتی در دوره ۱۳۵۶-۱۳۸۲ در ایستگاه مزرعه نمونه



شکل ۶. تغییرات دمای متوسط ایستگاه‌های شاخص در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲ نسبت به متوسط تاریخی در دوره ۱۳۵۶-۱۳۸۲

تجزیه و تحلیل دمای منطقه تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی

بررسی تغییرات دما برای منطقه طرح و بر اساس ایستگاه‌های شاخص (شکل ۱) برای سناریوی CGCM<sub>3</sub>, نشان از افزایش دما به مقدار ۰/۰۷ درجه سانتی‌گراد در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲ دارد که تغییر محسوسی محسوب نمی‌شود. همچنین توزیع درازمدت دمای متوسط ماهانه، نشانه افزایش آن در اکثر ماه‌ها است (شکل ۶). در کل براساس نتایج، افزایش دما در فصول پاییز و زمستان

ملموس‌تر از بهار و تابستان است. اگرچه در مورد دماهای روزانه در فصل زمستان نیز، کاهش شدید دما توسط مدل پیش‌بینی شده است. اما در کل براساس پیش‌بینی‌های مدل CGCM<sub>3</sub>-A<sub>2</sub> تحت سناریوی A<sub>2</sub>، منطقه شاهد افزایش دمای متوسط هوا در زمستان و پاییز خواهد بود، که این امر بی‌گمان سبب کاهش بارش جوی جامد در طول زمستان خواهد شد. بنابر نتایج، افزایش دما در پایان قرن شدیدتر از آغاز قرن است.

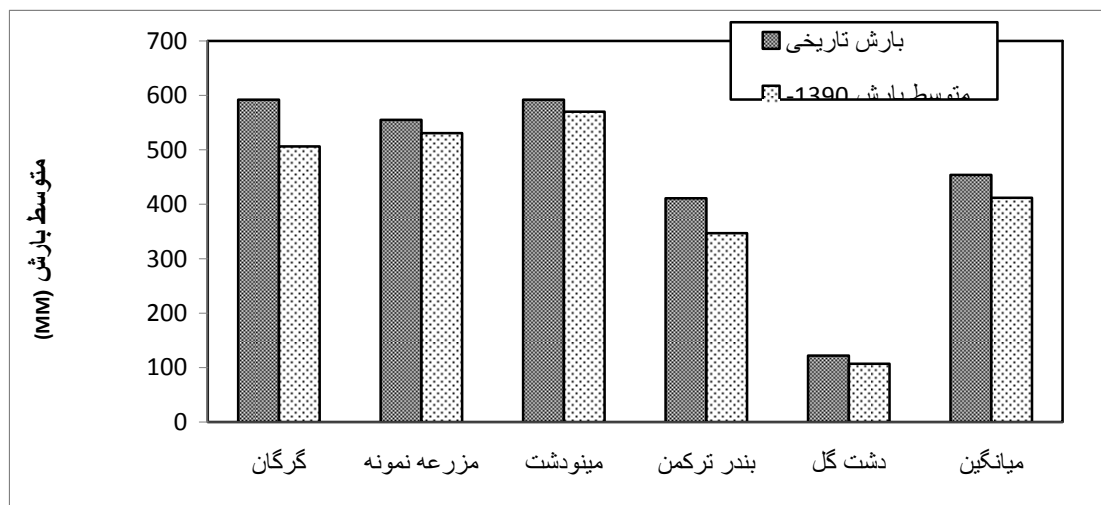
مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

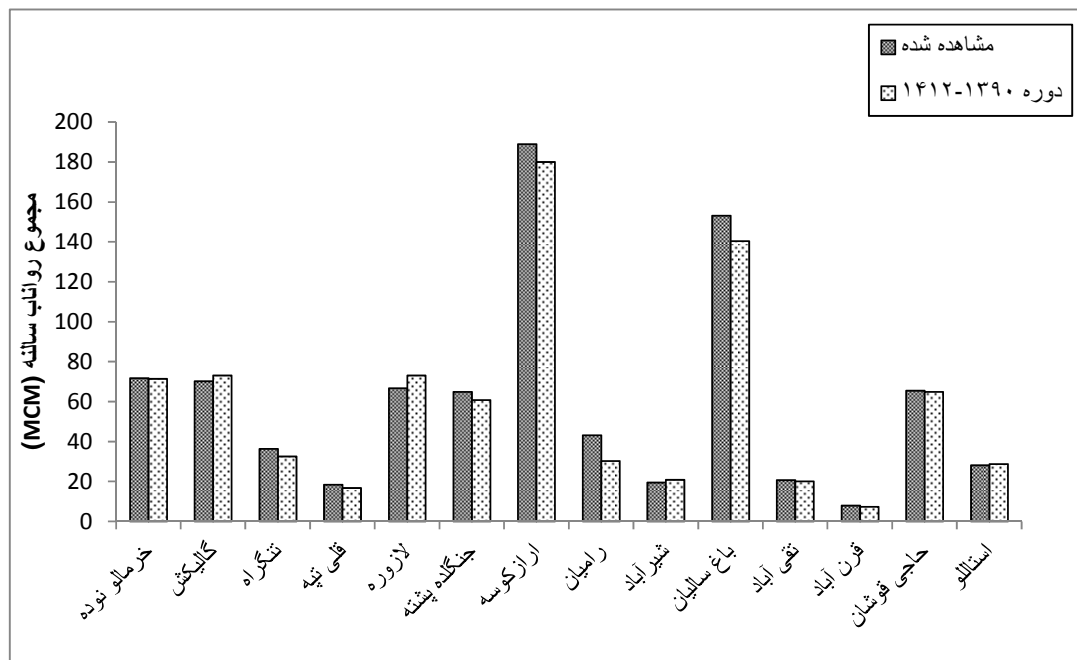
### تجزیه و تحلیل بارش منطقه تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی

با توجه به مطالب یادشده، مقادیر بارندگی برای دوره‌های زمانی آتی به وسیله مدل آماری SDSM ریزمقیاس شده و با دوره آماری درازمدت موجود مقایسه شد. به‌طور میانگین مقدار بارش در دوره آماری (۱۳۹۰-۱۴۱۲) نسبت به دوره

مشاهداتی (۱۳۵۶-۱۳۸۲) تحت سناریوی تغییر اقلیم CGCM3-A2 ۴۲ میلی‌متر کاهش نشان داده است (شکل ۷). در کل باید به این نکته مهم اشاره کرد که علاوه بر تغییر مقدار و مکان بارندگی‌ها، زمان و شکل بارش‌ها نیز تغییر می‌یابد که این تغییرات بر آینده منابع آب حوضه تأثیرگذار خواهد بود.



شکل ۷. تغییرات متوسط بارش سالانه پنج ایستگاه برای دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲ در مقایسه با مقادیر تاریخی



شکل ۸. مقادیر متوسط رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود در دوره مشاهداتی و دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

### برآورد تغییرات جریان رودخانه‌های حوضه با توجه

#### به سناریوی تغییر اقلیم CGCM3

در این مطالعه، تغییرات رواناب در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری حوضه با استفاده از روش احتمال توزیع توأم محاسبه شد (شکل ۱). مقادیر متوسط رواناب در هر یک از این ایستگاه‌ها در دوره تاریخی (۱۳۹۰-۱۴۱۲) با دوره مشاهداتی مقایسه شد. بنابر نتایج به‌دست آمده در بیشتر ایستگاه‌های حوضه، مقدار رواناب کاهش یافته است (شکل ۸). البته شایان ذکر است که این روند کاهش در همه ایستگاه‌های حوضه یکسان نبوده و در برخی ایستگاه‌های حوضه همچون استللو، تقی‌آباد، شیرآباد و لاوره، رواناب اندکی افزایش یافته است.

### بررسی تأثیر سناریوهای مختلف بر مقدار تخصیص

#### در گره‌های مصرف

در مورد سناریوی تغییر اقلیم با توجه به کاهش مقدار

رواناب در بیشتر ایستگاه‌های حوضه، مقدار تخصیص نیز در نتیجه آن در اکثر ایستگاه‌ها کاهش یافته و به‌طور کلی، میانگین تخصیص گره‌های مصرف از ۹۲ به ۹۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش اندک نشان‌دهنده این است که تغییر اقلیم در ۳۰ ساله نخست قرن بیست‌ویکم تأثیر چندانی بر مدیریت منابع آب در این حوضه نخواهد گذاشت. البته پیش‌بینی می‌شود تا پایان قرن و با توجه به تشدید روند کاهش رواناب، مقدار این کاهش تخصیص افزایش یابد و به‌خصوص در گره‌های خطرپذیر (کمترین مقدار تخصیص) به حد بحرانی برسد که توجه بیشتر مدیران آبی به این نواحی بحرانی را طلب می‌کند. در زمینه سناریوهای کاهش رواناب و افزایش مصرف، نتایج نشان می‌دهد تأثیر سناریوی کاهش رواناب بر کاهش مقدار تخصیص به‌طور میانگین، بیش از سناریوهای کاهش مصرف است (جدول ۱).

جدول ۱. درصد کاهش میانگین تخصیص در مقابل درصد کاهش رواناب و درصد افزایش مصرف

درصد کاهش رواناب	درصد افزایش مصرف	درصد کاهش میانگین تخصیص	درصد کاهش رواناب	درصد افزایش مصرف	درصد کاهش میانگین تخصیص
۰	۵	۱/۱	۵	۵/۳	۰
۰	۱۰	۲/۲	۷	۲/۸	۰
۰	۱۵	۳/۳	۷	۴/۰	۰
۰	۲۰	۴/۳	۱۰	۴/۶	۰
۵	۰	۱/۶	۱۰	۵/۸	۵
۷	۰	۱/۶	۱۵	۷/۳	۷
۱۰	۰	۲/۴	۱۵	۸/۵	۱۰
۱۵	۰	۳/۸	۲۰	۹/۰	۱۵
۲۰	۰	۵/۳	۲۰	۱۰/۱	۲۰
۵	۵	۲/۳			۵

محمدآباد (۲)، محمدآباد (۳)، گلستان (۱) و وشمگیر (۱) (شکل ۳)، بیشترین کاهش میانگین تخصیص را تحت تأثیر تغییرات اقلیمی نشان می‌دهند (جدول ۲). در این میان، ایستگاه محمدآباد (۱) با ۲۶ درصد، بیشترین کاهش را تحت سناریوی CGCM<sub>3</sub>-A<sub>2</sub> تجربه خواهد کرد.

### بررسی وضعیت بیلان آبی سدهای موجود در حوضه تحت تأثیر سناریوهای مختلف

سدهای مخزنی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های آبی هستند. نقش انکارناپذیر این سازه‌های ساخت بشر در نگهداری و تأمین آب، کنترل سیلاب، تنظیم جریان رودخانه‌ها و ... اهمیت بررسی وضعیت بیلان آبی آنها را دوچندان می‌کند. در این حوضه، هفت سد مخزنی به نام‌های بوستان، گلستان، وشمگیر، محمدآباد، رامیان، نرمام و کبودال وجود دارد (شکل ۱). در این مطالعه، تأثیر سناریوهای مختلف (کاهش رواناب، افزایش تقاضا و تغییرات اقلیمی مطابق مدل CGCM<sub>3</sub>-A<sub>2</sub>) بر مقدار ذخایر مخازن سدها بررسی شده است.

در این تحقیق، با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره، رابطه‌ای خطی بین درصد کاهش میانگین تخصیص، درصد افزایش مصرف و درصد کاهش رواناب برقرار شده است. رابطه مورد نظر به شرح زیر است:

$$DC = 2.83 \cdot 10^{-1} R + 0.23 D - 2.44 \cdot 10^{-1} \quad (4)$$

در این رابطه، R درصد کاهش رواناب، D درصد افزایش تقاضا و DC درصد کاهش میانگین تخصیص است.

### تشخیص گره‌های خطرپذیر نسبت به تغییرات اقلیمی

از پیامدهای اثبات‌شده تغییر اقلیم، افزایش دما و در نتیجه آن افزایش تقاضای آب است. افزایش تقاضای آب شهری، کاهش سرانه آب به دلیل افزایش جمعیت و افزایش تقاضای بخش کشاورزی به دلیل افزایش نیاز آبی (ناشی از افزایش دما)، همه و همه تنش‌های جدیدی را بر شبکه‌های بهره‌برداری آب وارد خواهند کرد. از این رو شناخت این تغییرات و تشخیص نقاط آسیب‌پذیر از اهمیت خاصی در زمینه مقابله با بحران پیش رو برخوردار است. نتایج این تحقیق نتایج نشان داد که گره‌های مصرف محمدآباد (۱)،

جدول ۲. گره‌های شامل بیشترین ریسک کاهش تخصیص

از نظر میانگین تخصیص		از نظر حداقل تخصیص	
نام گره	مقدار کاهش تخصیص	نام گره	مقدار کاهش تخصیص
محمدآباد (۱)	۴/۲۶	وشمگیر (۱)	۱۴/۳
محمدآباد (۲) و (۳)	۹/۰	گلستان (۱)	۱۳/۹
گلستان (۱)	۵/۹	مصرف تا سالیان	۴/۶
رامیان (۱)	۵/۶	بوستان (۱)	۰/۷
وشمگیر (۱)	۳/۳		

جدول ۳. تغییرات حجم مخزن تحت تأثیر تغییر اقلیم در مقایسه با مقادیر تاریخی آن (میلیون متر مکعب)

نام سد	سد محمدآباد	سد وشمگیر	سد رامیان	سد نرمام	سد کبودال	سد گلستان	سد بوستان	مجموع حجم آب در سدهای حوضه	میانگین
کل حجم مخزن (MCM)	۳۲/۷	۳۱/۴	۱۵/۸	۱۱۵	۱۷/۱	۳۷	۱۸/۸	۲۶۸/۱	۳۸/۳
میانگین حجم مخزن در دوره تاریخی (MCM)	۸/۳	۱۳/۸	۲/۴	۶۸/۱	۷/۶	۱۸/۶	۱۰	۱۲۹	۱۸/۴
میانگین حجم مخزن طبق سناریوی (MCM) CGCM <sub>3</sub> -A <sub>2</sub>	۰/۰۵	۸/۹	۱	۶۳/۴	۷/۶۹	۱۳/۵	۸/۶	۱۰۳/۳	۱۴/۸
مقدار تغییرات حجم آب موجود در مخزن (MCM)	۸/۲۵	۴/۹۱	۱/۳	۴/۶	۰/۰۷	۵/۱	۱/۴	۲۵/۷	۳/۷
میانگین ذخیره مخزن در دوره تاریخی (MCM)	۲۵/۳	۴۴/۱	۱۵/۱	۵۹/۲	۴۴/۵	۵۰/۴	۵۳/۱	۴۸/۱	۴۸/۱
میانگین ذخیره مخزن طبق سناریوی (CGCM <sub>3</sub> -A <sub>2</sub> ) (%)	۰/۱	۲۸/۵	۶/۸	۵۵/۱	۴۴/۹	۳۶/۴	۴۵/۵	۳۸/۵	۳۸/۵
درصد کاهش ذخیره مخزن تحت تأثیر تغییر اقلیم	۲۵/۱	۱۵/۶	۸/۳	۴/۰	-۰/۰۴	۱۴/۰	۷/۵	۹/۶	۹/۶

در این رابطه، R درصد کاهش رواناب، D درصد افزایش تقاضا و VC درصد کاهش حجم ذخایر مخازن است. البته شایان ذکر است که روابط به‌دست‌آمده در این تحقیق (معادله‌های ۴ و ۵)، از نظر فنی کاربرد خاصی ندارند و تنها استفاده آنها، ارائه دیدی کلی از نحوه پاسخ‌دهی سیستم به تنش‌های واردآمده (افزایش تقاضا، کاهش آورد رودخانه) در راستای کمک به سیاست‌گذاران آبی است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، آثار تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه گرگانرود در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲ با استفاده از مدل گردش عمومی CGCM3 تحت سناریوی انتشار A<sub>2</sub> تجزیه و تحلیل شد. نتایج در مجموع نشان از کاهش بارندگی و افزایش دما

نتایج نشان داد میانگین کل حجم آب موجود در مخازن حوضه تحت تأثیر سناریوی تغییرات اقلیمی (CGCM<sub>3</sub>-A<sub>2</sub>)، ۹/۶ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۳). از میان سدهای موجود، سد محمدآباد بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به تغییرات اقلیمی با کاهش ذخیره مخزن به مقدار ۲۵ درصد نشان داد. در سد کبودال برخلاف دیگر سدهای موجود در حوضه، ذخیره مخزن سد در این شرایط، نه تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه ۰/۰۴ درصد نیز افزایش می‌یابد. در این مورد نیز با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده و به‌کار بردن رگرسیون چندمتغیره، رابطه‌ای خطی بین درصد کاهش رواناب، درصد افزایش مصرف و درصد کاهش میانگین حجم ذخایر مخازن حوضه برقرار شده است. رابطه به‌دست‌آمده به شرح رابطه ۵ است.

$$VC = 3.03 \cdot 10^{-2} R + 5.610 \cdot 10^{-2} D - 2.8 \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

### مدیریت آب و آبیاری

طراحی سیستم آبی منطقه در نظر گرفته شده، قابل استناد نیست، زیرا به طور سنتی آن طراحی‌ها بر پایه منابع آبی ثابت و بدون تغییر صورت گرفته است. از این رو لزوم طراحی دوباره و اصلاح آن، با در نظر گرفتن تأثیرات تغییر اقلیم اجتناب‌ناپذیر است و این امر، همکاری و هماهنگی بیشتر هواشناسان، هیدرولوژیست‌ها و سیاستگذاران آبی را طلب می‌کند. به طور کلی، سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم و تنش‌های آبی و سیلابی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول، افزایش بهره‌وری سیستم با توسعه روندهای جدید برنامه‌ریزی بر پایه فرضیه‌های جدید و بخش دوم پاسخ‌دهی در بخش عرضه و تقاضا.

در زمینه بخش اول می‌توان به مواردی همچون استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز و به‌ویژه بهینه‌ساز (همچون LINGO, MODSIM, WEAP) برای شبیه‌سازی مدیریت مخازن و افزایش کارایی مخازن با هدف به حداقل رساندن کمبود در طول دوره و همچنین مدیریت سیلاب، اولویت‌بندی در تخصیص منابع در مدیریت مخازن به منظور بالا بردن سطح اطمینان یا افزایش برگشت‌پذیری در سیستم مخازن، تغییر معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت مخازن برای شرایط کم‌آبی و مدیریت یکپارچه منابع آب برای توسعه روش‌های سازگاری با تغییر اقلیم (توجه به دیدگاه‌های جامعه، تغییر روندهای برنامه‌ریزی)، متناسب کردن منابع آبی و منابع زراعی، تشخیص روابط بین کمیت و کیفیت آب، استفاده همزمان از آب سطحی و زیرزمینی، حفاظت از منابع آبی طبیعی و در نظر گرفتن تغییر اقلیم اشاره کرد. در بخش عرضه، اقداماتی همچون کشف و استخراج منابع زیرزمینی جدید، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی با ساخت مخازن جدید، استفاده از آب دریا با توسعه تجهیزات آب‌شیرین‌کن، توسعه منابع ذخیره‌سازی آب باران، حفاظت و توسعه پوشش گیاهی حریم رودخانه‌ها و انتقال آب؛ و در بخش تقاضا، افزایش

دارد، به طوری که انتظار می‌رود مقدار بارندگی در دوره ۱۳۹۰-۱۴۱۲ نسبت به دوره پایه مطالعاتی (۱۳۵۶-۱۳۸۲) ۹/۲ درصد مواجه شود. تجزیه و تحلیل داده‌های دما نشان از افزایش دما دارد. برای شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب با استفاده از مدل آماری تابع احتمال توزیع توأم، داده‌های بارش و رواناب در ۱۳ ایستگاه وارد مدل شد که بر این اساس در بیشتر ایستگاه‌ها رواناب کاهش یافته و به طور میانگین، کاهش رواناب در حوضه تحت سناریوی A<sub>2</sub> نسبت به دوره پایه ۶/۲ درصد است. بررسی‌هایی که توسط مدل، تحت سناریوی CGCM3-A2 صورت گرفت، نشان از کاهش میانگین تخصیص از ۹۲ به ۹۰ درصد دارد. مقدار کاهش میانگین ذخیره مخازن سد حوضه به طور متوسط ۹/۶ درصد پیش‌بینی شده و تحت این مطالعه گره‌های مصرف محمدآباد (۱)، محمدآباد (۲) و (۳)، گلستان (۱)، رامیان (۱) و وشمگیر (۱) نسبت به این تغییرات آسیب‌پذیرتر نشان داده‌اند. این تحقیق در مقایسه با تحقیقی که در همین ناحیه صورت گرفت و در سال ۱۳۹۰ انتشار یافت، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد، به طوری که در آن، تأثیر تغییر اقلیم بر حجم آبدهی سالانه رودخانه گرگانرود تحت مدل اقلیمی HADCM<sub>2</sub> و دو سناریوی A<sub>2</sub> و B<sub>2</sub> بررسی شد که تحت سناریوی B<sub>2</sub> رواناب رودخانه‌ها تغییر معناداری نخواهد داشت (۱/۳ درصد) و تحت سناریوی A<sub>2</sub>، رواناب طی ۳۰ سال آینده، ۱۴/۴ درصد کاهش خواهد یافت (۶). نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیق پیش رو، با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در تغییر اقلیم، تفاوت معناداری را نشان نمی‌دهد و در کل، این نتایج با توجه به ارزیابی‌های کلی سازمان IPCC که آثار تغییر اقلیم را در مناطق معتدل عرض جغرافیایی که ایران در آن واقع شده کوچک می‌شمارد، پیش‌بینی‌شدنی بود که نشان از صحت مطالعات دارد. این نتایج نشان می‌دهد دیگر فرضیه‌های هیدرولوژیکی که در

۴. کارآموز م. و عراقی‌نژاد ش (۱۳۸۴) هیدرولوژی پیشرفته. چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران. ۴۶۴ ص.
۵. مساح بوانی ع. ر. و مرید س (۱۳۸۴) اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۳۴(۹): ۲۷-۱۷.
۶. مدرسی ف.، عراقی‌نژاد ش.، ابراهیمی، ک. و خلقی م (۱۳۹۰) بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقدار آبدهی سالانه رودخانه‌ها، مطالعه موردی: رودخانه گرگانرود. آب و خاک. ۶(۲۵): ۱۳۶۵-۱۳۷۷.
۷. یزدان‌پناه ط. و خداشناس س. ر. و داوری ک. و قهرمان ب (۱۳۸۶) مدیریت منابع آب حوضه آبریز با استفاده از مدل WEAP، مطالعه موردی ازغند. علوم و صنایع کشاورزی، آب و خاک ۶(۲۲): ۲۲۲-۲۱۳.
8. Araghinejad S (2009) An approach for probabilistic hydrological drought forecasting. *Water Resources Management*. 25(3): 191-200.
9. Environment Canada (2005) Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis. [online] Available at <http://www.cccma.ec.gc.ca>
10. IPCC (2001) The Scientific Basis of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1<sup>th</sup> Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 630 p.
11. IPCC-TGCI (1999) Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, UK.
- بهره‌وری مصرف آب با تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب، کاهش نیاز آبی در بخش کشاورزی با تغییر تقویم زراعی، کاشت همزمان چند محصول در فصول زراعی، بهبود روش آبیاری و بهبود زمین‌های زراعی، توسعه بازارهای فروش آب با هدف افزایش بهره‌وری مصرف آب و تخصیص آب به مصارف مهم‌تر و استفاده از انگیزه‌های اقتصادی همچون اندازه‌گیری و قیمت‌گذاری به‌منظور تشویق به نگهداری و حفاظت بیشتر آب، ثمربخش خواهد بود.
- مهم‌ترین دستاورد این تحقیق را شاید بتوان بررسی همزمان پدیده تغییر اقلیم در حوضه بارش و رواناب و مدلسازی منابع و مصارف در یک مدل حقیقی دانست، به‌گونه‌ای که بازخورد این پدیده در حجم ذخایر مخازن و مقدار تخصیص در گره‌های مصرف در کنار تغییرات کلی منابع و مصارف رصد شده است و این نتایج و روش‌های به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق، می‌تواند در ارزیابی‌های آتی جامع منابع آب در خصوص تغییر اقلیم استفاده شود.

## منابع

۱. جاماب (۱۳۸۴) مطالعات برنامه جامع سازگاری با اقلیم، وضعیت موجود و آینده منابع آب حوضه آبریز رودخانه‌های گرگانرود - قره‌سو. گزارش، ۱۳۰ صفحه.
۲. حسینی ف (۱۳۸۷) بررسی اثرات پدیده تغییرات اقلیم در حوضه آبریز کرخه. دانشگاه صنعتی شریف. تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۳. صمدی س. ز. و مساح بوانی ع. ر (۱۳۸۷) معرفی روش شبکه عصبی مصنوعی و SDSM به‌منظور کوچک‌مقیاس کردن آماری داده‌های دما و بارندگی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ایران.



12. Kaczmarek Z, Napiórkowski J and Strzepek K (1996) Climate Change Impacts on the Water Supply System in the Warta River Catchment. *Water Resources Development*. 12(2): 165-180.
13. Lettenmaier DP, McCabe G and Stakhivn E (1996) Global Climate Change: Effect on the Hydrologic Cycle, Chapter 29. *In: Mays LW (Eds.), Handbook of Water Resources*, McGraw Hill. Pp. 413-419.
14. Maurer E, Adam J and Wood A (2009) Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology Earth System Science*. 13(4): 183-194.
15. Wilby RL and Dawson CW (2007) SDSM 4.2 - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modeling and Software*. 17(2): 147-159.
16. Yates DN and Strzepek KM (1998) Modeling the Nile basin under climate change. *Hydrological Engineering*. 3(2): 98-108.
17. Yue S (2000) Joint probability distribution of annual maximum storm peaks and amounts as represented by daily rainfalls. *Hydrological Science*. 14(2): 2-45.