

Optimal Management of Surface Water Resources by WEAP: Considering Bayesian Approach under Climate Change Conditions

SEYEDE HADIS HAYATOLGHEIB MOGHADAM^{1*}, PARISA-SADAT ASHOFTEH²

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

(Received: May. 26, 2018- Revised: Aug. 6, 2018- Accepted: Oct. 2, 2018)

ABSTRACT

In this research, the effect of climate change phenomenon on optimal management of water resources in Khorramabad basin was investigated. The developed hybrid model based on the Bayesian approach was used for this purpose. So that initially the output of AOGCM models under the A2 emission scenario during the baseline period 1971-2000 and the future period 2040-2069 were downscaled and 100 examples of the downscaled monthly probability distribution function of the temperature and rainfall were produced based on the weighting method, using the Monte Carlo method and SIMLAB Software. The results indicated that the future long-term monthly average temperature would increase between 1.93 to 3.7 °C. The rainfall will increase in some months and decrease in another months. The rainfall variations in the basin under scenario A2 during the period 2040-2069 will be in the range of -17.29 and 1036.04 percent as compared to the baseline. Then, by introducing the future temperature and precipitation of the hybrid model into the calibrated and verified IHACRES, the future runoff will be achieved. The results showed a decrease in future runoff rates relative to baseline values. This reduction would be 4.33 % for the A2 scenario during the period 2040-2069. Finally, different scenarios were investigated by WEAP model and the amounts of water allocation at the baseline and climate change periods were compared. It was found that the seasons (such as summer) in which the water demand and consumption are increased, there would be an unmet demand (failure period) and this situation will be intensified in climate change condition. As the amount of annual unmet demand will be equal to $0.17 \times 10^6 \text{ m}^3$ and for the A2-2040-2069 scenario, it will be increased by 87% and equal to $1.33 \times 10^6 \text{ m}^3$ as compared to the baseline.

Keywords: Climate change scenario, Hybrid model, Bayesian approach, Optimal water resources management, WEAP model

* Corresponding Author's Email: sh.Hayatolgheib@stu.qom.ac.ir.

مدیریت بهینه منابع آب سطحی با WEAP: با لحاظ رویکرد بیزی ناشی از تغییر اقلیم

سیده حدیث حیات‌الغیب مقدم^{۱*}، پریساسادات آشفته^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه قم، قم، ایران
 ۲. استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم، قم، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۵/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۱۰)

چکیده

در این تحقیق اثر پدیده تغییر اقلیم بر مدیریت بهینه منابع آب حوضه خرم‌آباد بررسی شد. از مدل توسعه‌یافته هیبریدی براساس رویکرد بیزی برای این منظور استفاده شد. بدین‌صورت که ابتدا خروجی مدل‌های AOGCM تحت سناریوی انتشار A2 طی دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ کوچک‌مقیاس شدند و بر اساس وزن‌دهی، با استفاده از روش مونت‌کارلو به کمک نرم‌افزار SIMLAB تعداد ۱۰۰ نمونه از تابع توزیع احتمالاتی ماهانه دما و بارندگی کوچک‌مقیاس شده حوضه، تولید شدند. نتایج نشان داد که میزان میانگین دمای ماهانه بلندمدت آینده به میزان ۱/۹۳ تا ۳/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا خواهد کرد. میزان بارندگی در برخی ماه‌ها افزایش و در برخی کاهش پیدا خواهد کرد. محدوده تغییرات بارندگی حوضه تحت سناریوی A2 طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه بین ۱۷/۲۹- تا ۱۰۳۶/۰۴ درصد خواهد بود. سپس با معرفی دما و بارش آینده حاصل از مدل هیبریدی به مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده IHACRES، میزان جریان سطحی آینده بدست آمد. نتایج کاهش میزان جریان سطحی رودخانه را نسبت به مقادیر پایه نشان داد. این کاهش برای سناریوی A2 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به مقادیر پایه به میزان ۴/۳۳ درصد خواهد بود. درنهایت در مدل WEAP سناریوهای مختلف موردبررسی قرار گرفتند و میزان تخصیص آب در دوره پایه و تغییر اقلیم مقایسه شدند. مشخص شد در فصل‌هایی همچون فصل تابستان با توجه به افزایش تقاضا که مقدار آب بیش‌تری مصرف می‌شود، تقاضای تأمین نشده (دوره شکست) وجود خواهد داشت و در شرایط تغییر اقلیم این وضعیت تشدید خواهد شد. به‌طوری‌که مقدار تقاضای تأمین نشده سالانه برابر ۰/۱۷ میلیون مترمکعب و در سناریوی A2-2040 2069 با افزایش ۸۷ درصدی نسبت به پایه برابر ۱/۳۳ میلیون مترمکعب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: سناریوی تغییر اقلیم، مدل هیبریدی، رویکرد بیزی، مدیریت بهینه منابع آب، مدل WEAP

مقدمه

به‌اندازه ۶/۴ درجه سانتی‌گراد طبق سناریوهای اخیر هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم IPCC (2007) افزایش خواهد یافت. پژوهش‌های مختلفی در راستای بررسی اثر این پدیده انجام شده است ازجمله: Wilby and Harris (2006)، اثر تغییر اقلیم را بر جریان رودخانه تیمز در انگلستان بررسی کردند. عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، روش‌های کوچک‌مقیاس کردن، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های مختلف شبیه‌سازی بارش-رواناب و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای آنها با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف و روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی گردید. نتایج بیش‌ترین سهم را در برآورد تابع احتمالاتی رواناب مربوط به عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM و کم‌ترین سهم را مربوط به سناریوهای گازهای گلخانه‌ای دانستند. Davtala et al (2014) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر اطمینان‌پذیری آب در حوضه رودخانه کرخه در ایران پرداختند. به‌دلیل عدم قطعیت در پروژه‌های تغییر اقلیم،

در جهان کنونی تخصیص بهینه منابع آب با توجه به محدودیت آب شیرین و تخصیص این منبع محدود به نیازهای با ماهیت‌های مختلف، به چالشی بزرگ تبدیل شده است. از طرف دیگر در کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در عرض‌های جغرافیایی پایین که باعث تشدید پدیده تغییر اقلیم شده است (Lane et al., 1999)، مدیریت این منابع محدود سخت‌تر شده است. نوسانات شدید بارش و تغییر الگوهای بارش، پراکنش نامناسب زمانی و مکانی نزولات آسمانی، تبخیر و تعرق زیاد، افزایش محسوس وقوع خشکسالی، سیل و فراوانی آنها ازجمله اثرات پدیده تغییر اقلیم می‌باشد IPCC (2013). از طرف دیگر پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرواقليمی نظیر دما و بارندگی تأثیرگذار بوده، به‌طوری‌که دمای جهانی تا سال ۲۱۰۰

*نویسنده مسئول: sh.Hayatolghaib@stu.qom.ac.ir

WEAP ساخته شد. شرایط هیدرولوژیکی مختلف مثل نرمال، مرطوب و خشک برای مقایسه عملکرد سیاست‌های پیشنهادی با سیاست‌های در حال حاضر مدیریت منابع آب، در نظر گرفته شدند. سناریوها و ارزیابی آنها همراه با مقایسه آنها با سیاست‌های در حال حاضر مدیریتی ارائه شدند. Ingol-Blanco and McKinney (2011)، به ارزیابی سناریوهای مدیریت آب برای مقابله و تطبیق با اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه ریوکونچوس (Rio Conchos) پرداختند. ابتدا اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه تحت سناریوهای انتشار A2 و A1B برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ در نظر گرفته شد. سپس شبیه‌سازی و تحلیل برای سناریوهای مدیریت منابع آب که پتانسیل مقابله با اثرات تغییر اقلیم را دارند، انجام شد. نتایج نشان دادند که تحت شرایط تغییر اقلیم، اطمینان‌پذیری و انعطاف‌پذیری سامانه منابع آب کاهش و در نتیجه آسیب‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این سناریوهای پیشنهادی، روش‌های تطبیق که بتوانند سامانه را اطمینان‌پذیرتر کنند و آسیب‌پذیری را کم نمایند، ارائه دادند. (Vicuña *et al.* 2012)، اثر دما و بارندگی را بر هیدرولوژی سطحی و آبیاری در حوضه لیمری (Limarí) در شیلی با استفاده از مدل WEAP مورد ارزیابی قرار دادند. مدل WEAP با الگوهای کشاورزی و اقلیم جاری واسنجی شد و سپس سناریوهای تغییر اقلیم با سری زمانی ۳۰ ساله با هدف مشخص کردن حساسیت متغیرهای تغییر اقلیم و بدست آوردن آبیاری مورد انتظار برای آینده، اعمال شدند. نتایج ذخیره اضافه و استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را به منظور افزایش انعطاف‌پذیری و تطبیق آبیاری کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی نشان دادند. (Ashofteh *et al.* 2017)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر سامانه چنددهفه مخزن قرنقو در آذربایجان شرقی با استفاده از شاخص‌های کارایی پرداختند. جریان ورودی به مخزن و تغییر در میزان تقاضا طی دوره ۳۰ ساله (۲۰۶۹-۲۰۴۰) تحت اثر تغییر اقلیم بررسی شدند. مطابق نتایج، در حالت تغییر اقلیم نسبت به پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) جریان ورودی به مخزن کاهش و میزان تقاضا شامل کشاورزی، شرب و صنعت به میزان ۲۰ درصد افزایش داشت. به‌منظور مشخص کردن کارایی سامانه چنددهفه مخزن تحت سه سناریوی اقلیمی از مدل WEAP استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و انعطاف‌پذیری بر اساس ۱۰۰ درصد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه به ترتیب ۱۸ درصد کاهش، ۱۵۰ درصد افزایش، ۳۳ درصد کاهش و ۴۷ درصد کاهش و بر اساس ۸۵ درصد منابع آب به ترتیب ۱۲ درصد کاهش، ۷۵ درصد افزایش، ۳۰ درصد

سناریوهای مختلف تغییر اقلیم از طریق روش خوشه‌ای انتخاب شدند که باعث تشخیص سناریوها با مشخصات متفاوت شد. شاخص‌های عملکرد سامانه‌های مختلف برای بررسی وضعیت سیستم کرخه تحت شرایط اقلیمی آینده و پروژه‌های تقاضای آب به کار گرفته شدند. درنهایت روش‌های مختلف تطبیق برای کاهش اثرات نامطلوب تغییرات آینده بر سامانه مشخص و آزمایش شدند. Chithra and Thampi (2015)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما و بارندگی با استفاده از خروجی مدل NCEP/NCAR در حوضه رودخانه کالیار (Chaliyar) در هند پرداختند. داده‌های بارندگی GCMها به‌صورت آماری و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، کوچک‌مقیاس شدند. پنج مدل GCM تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 استفاده شدند. نتایج نشان دادند با استفاده از رویکرد منشأیابی استاندارد، روندهای مشاهداتی در بارش در نیمه دوم قرن ۲۰م خارج از محدوده مورد انتظار تغییرپذیری درونی طبیعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای بیش‌ترین GCMها بودند. برای تعیین دلیل این سیگنال تغییر اقلیم، مطالعات ارزیابی براساس تحلیل ضریب همبستگی انجام شدند و رابطه مثبتی بین بارش کوچک‌مقیاس‌شده تحت سناریوی انتشار A2 و بارش مشاهداتی بدست آمد.

در شرایط تغییر اقلیم مدیریت بهره‌برداری با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی موجود که بتواند منابع و مصارف آب را به‌طور هم‌زمان مدیریت کند چالشی بزرگ است. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در زمینه مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم انجام شده است که به چند نمونه از آنها اشاره می‌شود: Teasley and McKinney (2007)، به مدیریت منابع آب حوضه رودخانه ریوگراندا/براوو (RioGrande/Bravo) واقع در شمال آمریکا پرداختند. پروژه ارزیابی همکاری بین متخصصان مکزیک و ایالت متحده با هدف بررسی فرصت‌ها برای پیشرفت مدیریت کمبود منابع آب رودخانه از طریق توسعه سناریوهای مدیریتی بود. برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی، مدل هیدرولوژیکی WEAP به‌کار گرفته شد. اطلاعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای مدل از طریق پایگاه داده شامل جغرافیایی، هیدرولوژیکی و داده‌های مرتبط برای کل حوضه ریوگراندا/براوو بدست آمد. حجم ذخیره مدل شده با حجم ذخیره واقعی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقادیر مدل‌شده نسبت به مقادیر واقعی بیش‌تر از ۲۵ درصد انحراف ندارند. Sandoval-Solis *et al.* (2008)، به ارزیابی سناریوهای مدیریتی در حوضه ریوگراندا/براوو برای مشخص شدن منافع مصرف‌کنندگان آب پرداختند. مدل ارزیابی با مدل

بارندگی آینده با رویکرد بیزی، با مدل IHACRES میزان رواناب آینده محاسبه و در نهایت با مدل WEAP میزان تخصیص منابع آب با توجه به نیازها مشخص شد.

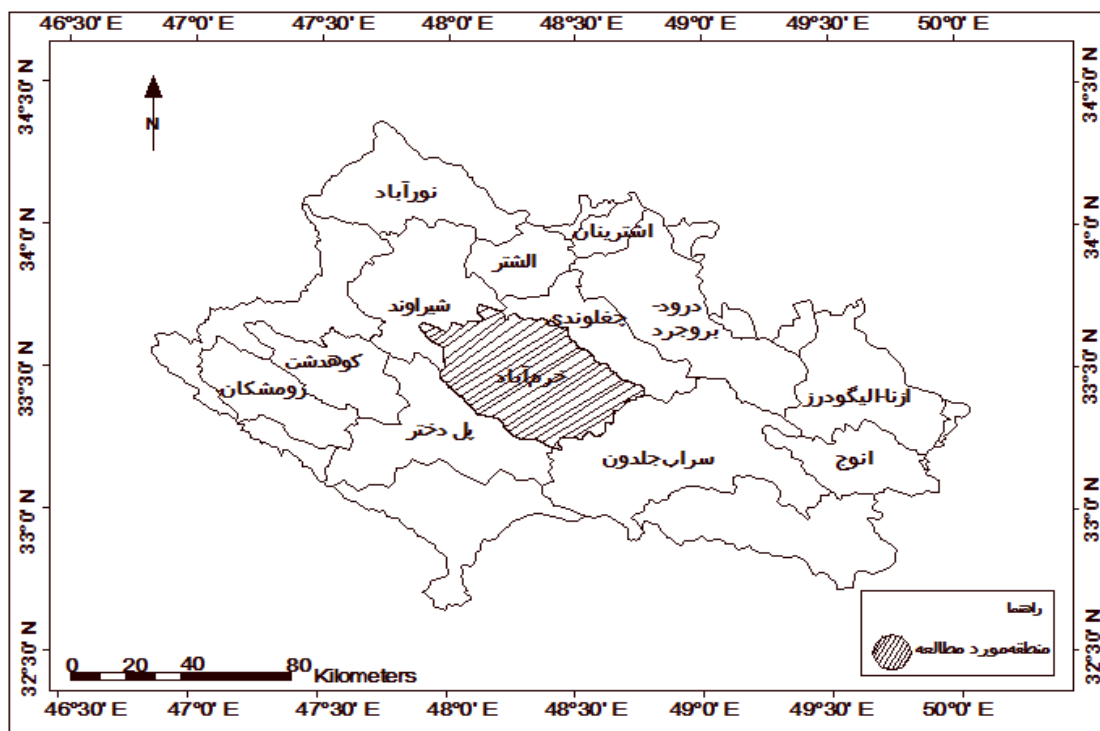
مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر به معرفی منطقه مورد مطالعه پرداخته و در ادامه با کوچک مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM و وزن‌دهی آنها مدل هیبریدی با رویکرد بیزی به وجود آمده و در نتیجه دما و بارندگی آتی به دست می‌آید و سپس با مدل IHACRES رواناب آینده تولید می‌شود. در نهایت مدیریت منابع آب با مدل WEAP انجام می‌شود.

موقعیت جغرافیایی

منطقه مطالعاتی مورد بررسی در این تحقیق، خرم‌آباد می‌باشد که مرکز استان لرستان است و بین طول‌های $47^{\circ}55'$ تا $48^{\circ}50'$ شرقی و عرض‌های $32^{\circ}40'$ تا $34^{\circ}20'$ شمالی واقع شده است. $212/4$ کیلومترمربع از وسعت محدوده را دشت و 2289 کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. از آنجایی که ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه دوره آماری $1971-2000$ را تحت پوشش خود قرار می‌دهند و بنا به توصیه IPCC (1999)، این دوره به‌عنوان دوره پایه در نظر گرفته شد. شکل (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی را در استان لرستان نشان می‌دهد.

کاهش و 39 درصد کاهش داشتند. تغییر در میزان شاخص‌ها در آینده، لزوم مدیریت پروژه‌های توسعه منابع آب را نشان داد. در نتیجه با توجه به محدودیت منابع آب و تشدید این کمبود در شرایط تغییر اقلیم، در آینده بحران آب وجود خواهد داشت. به همین دلیل نیاز به مدیریت جامع برای منابع و مصارف آب است. اگرچه در راستای مدیریت منابع آب و بررسی اثر تغییر اقلیم بر این منابع در سال‌های اخیر مطالعاتی انجام شده است (Nijssen et al., 2001; Milly et al., 2005) اما در بیشتر تحقیقات، عدم قطعیت‌های موجود نادیده گرفته شده است. نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مراحل مختلف مطالعات تغییر اقلیم باعث می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سامانه کاسته شود. در این تحقیق، برای تحلیل عدم قطعیت بر اساس رویکرد بیزی از تلفیق مدل‌های AOGCM مانند CCSR-NIES، CGCM2، CSIRO-M2K، GFDLR30، HADCM3 یک مدل توسعه‌یافته هیبریدی مونت کارلو حاصل شد و از این مدل برای تحلیل مدیریت منابع آب استفاده شد. بدین منظور از نرم‌افزار SIMLAB برای تحلیل عدم قطعیت به رویکرد بیزی استفاده شد. در این روش برای هر ماه مقدار Δt و Δr حاصله از سناریوهای تغییر اقلیم برای مدل‌های مختلف AOGCM ورودی نرم‌افزار SIMLAB و خروجی نرم‌افزار مقدار Δt و Δr برای مدل هیبریدی بر اساس رویکرد بیزی بود. پس از محاسبه دما و



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در استان لرستان

$t_{obs,t}$ و $r_{obs,t}$ = به ترتیب سری‌های زمانی دما و بارندگی ماهانه مشاهداتی در دوره پایه هستند.

مدل هیبریدی بر اساس رویکرد بیزی

در مراحل مختلف بررسی تغییر اقلیم، عدم قطعیت‌های مختلفی از جمله نامشخص بودن وضعیت آینده بشر از نظر جمعیت، اقتصاد و غیره و هم‌چنین عدم قطعیت خروجی مدل‌های AOGCM وجود دارد که باعث می‌شود از نتایج حاصل‌شده اطمینان کافی وجود نداشته باشد. در تحقیق حاضر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، مدل هیبریدی که تلفیق مدل‌های AOGCM (از گزارش سوم IPCC) مانند CCSR-NIES، CGCM2، CSIRO-M2K، GFDLR30، HADCM3 می‌باشد، بر اساس رویکرد بیزی توسعه داده شده است. به‌طور کلی رویکرد بیزی روشی است که از طریق نمونه‌سازی آماری، پاسخ‌های تقریبی فراهم می‌کند و بیش‌تر برای توصیف روشی برای انتشار عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل، به کار می‌رود. برای لحاظ کردن این منبع عدم قطعیت از رویکرد بیزی استفاده خواهد شد. مراحل محاسباتی این رویکرد عبارتند از: (۱) تولید توزیع احتمالاتی پیشین برای پارامترهای آماری، (۲) تعیین تابع درست‌نمایی احتمالاتی داده‌های مشاهداتی به‌عنوان تابعی از پارامترها و (۳) تعیین توزیع احتمالاتی پسین یک سامانه.

در این تحقیق از نرم‌افزار SIMLAB (Giglioli and Saltelli, 2003) برای تحلیل عدم قطعیت به رویکرد بیزی استفاده شده است. در این روش برای هر ماه مقدار و وزن Δt و Δr را که از سناریوهای تغییر اقلیم برای مدل‌های مختلف به‌دست آمده [مطابق رابطه (۵)] به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود و خروجی نرم‌افزار SIMLAB مقدار Δt و Δr برای مدل هیبریدی بر اساس رویکرد بیزی می‌باشد. درنهایت برای محاسبه دما و بارندگی آینده، مقادیر Δt با مقادیر مشاهداتی دما جمع و مقادیر Δr در مقادیر مشاهداتی بارندگی ضرب می‌شود.

$$W_i = \frac{1}{D_{x,i}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n D_{x,i}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، W_i = برابر وزن هر مدل؛ $D_{x,i}$ = برابر انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه‌سازی‌شده توسط هر یک از مدل‌های AOGCM در دوره پایه در ماه x از میانگین داده‌های مشاهداتی، n برابر تعداد مدل‌های AOGCM هستند.

مدل IHACRES

مدل IHACRES (Jakeman and Hornberger, 1993)، یک

سناریوهای تغییر اقلیم

مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM)، مدل‌های اقلیمی جهانی می‌باشند که هر دو فرایند اتمسفر و اقیانوس و تعاملات بین آن‌ها را مدل می‌کنند. در تحقیق حاضر از خروجی پنج مدل AOGCM که شامل CSIRO-MK2، GFDL-R30، HadCM3، CCSR-NIES، CGCM2، IPCC-، TGICIA (1999) می‌باشند همراه با توسعه یک مدل هیبرید که در ادامه توضیح داده خواهد شد، استفاده خواهد شد.

از ورودی‌های این مدل‌ها سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. SRES در واقع نام اختصاری گزارش ویژه‌ای در مورد سناریوهای انتشار است که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در سال ۲۰۰۰ منتشر کرد. در تحقیق حاضر که از سناریوی انتشار A2 استفاده می‌شود تأکید بر جنبه‌های اقتصادی، رشد اقتصادی سریع، دنیای همگرا دارد. قابل‌ذکر است که امکان استفاده مستقیم از خروجی مدل‌های AOGCM به دلیل داشتن نوسان وجود ندارد. بنابراین برای جبران این ضعف می‌توان از میانگین دوره‌ای این داده‌ها [روابط (۱) و (۲)] استفاده کرد (Jones and Hulme, 1996). در ضمن، از روش عامل تغییر برای کوچک‌مقیاس کردن استفاده می‌شود. در این روش برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوهای اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم Δt_a و Δr_a به مقادیر مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) [همانند روابط (۳) و (۴)] افزوده می‌شود (Wilby and Harris, 2006).

$$\Delta t_a = (\bar{t}_{AOGCM,fut,a} - \bar{t}_{AOGCM,base,a}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\Delta r_a = (\bar{r}_{AOGCM,fut,a} / \bar{r}_{AOGCM,base,a}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$t_f = (t_{obs,t} + \Delta t_{a,t}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$r_f = (r_{obs,t} \times \Delta r_{a,t}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

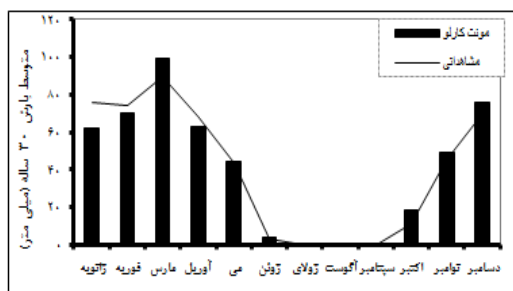
در روابط فوق Δt_a و Δr_a = به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای متوسط بلندمدت ۳۰ ساله برای هر ماه؛ $\bar{t}_{AOGCM,fut,a}$ = متوسط ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا ۲۰۴۰-۲۰۶۹) با توجه به توصیه IPCC در سال (۲۰۰۱)؛ $\bar{t}_{AOGCM,base,a}$ = متوسط ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۷۱-۲۰۰۰) برای هر ماه؛ $\bar{r}_{AOGCM,fut,a}$ = متوسط ۳۰ ساله بارندگی شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه؛ $\bar{r}_{AOGCM,base,a}$ = متوسط ۳۰ ساله بارندگی در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه؛ t_f و r_f = به ترتیب سری‌های زمانی دما و بارندگی در آینده؛ و

زیرزمینی، MODPATH برای روندیابی آلودگی و غیره، در برگرفتن طیف وسیعی از گره‌های نیاز مثل تقاضای شهری، روستایی، کشاورزی با تمام جزئیات و امکان صحت‌سنجی مدل به‌شرط دارا بودن اطلاعات دقیق. رویکرد معادله WEAP به این صورت است که یک معادله بیلان جرم-آب را در هر گره و برای هر گام زمانی حل می‌کند. میزان برداشت از منابع آب بر اساس یک برنامه‌ریزی خطی محاسبه می‌شود و برحسب اولویت تقاضاها منابع آب را به گره‌های مختلف تقاضا اختصاص می‌دهد.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج مدل هیبریدی با مقادیر مشاهداتی

برای بررسی مقایسه مدل هیبریدی، میانگین ۳۰ ساله آینده داده‌های اقلیمی حاصل از مدل هیبریدی با داده‌های مشاهداتی در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به دلیل موجود بودن داده‌ها در این دوره، مقایسه شدند و نتایج در شکل (۲) نشان داده شده است.

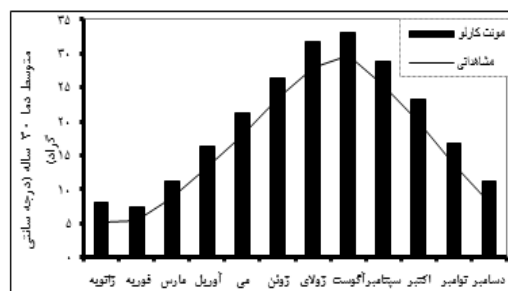


(ب)

مدل مفهومی یکپارچه بارش-رواناب است که برای محاسبه رواناب آینده در تحقیق حاضر از آن استفاده می‌شود. ورودی این مدل داده‌هایی همچون دما و بارندگی است. ازجمله مزیت‌های این مدل نسبت به سایر مدل‌های هیدرولوژیکی داده‌های کم برای ورودی این مدل می‌باشد. بر اساس این مدل در مرحله اول دما و بارندگی به‌عنوان ورودی گرفته می‌شوند و توسط مدل غیرخطی تبدیل به بارندگی مؤثر شده و درنهایت توسط مدل خطی به رواناب سطحی تبدیل می‌شوند.

مدل WEAP

امروزه یکی از ابزارهای مدیریت صحیح منابع آب استفاده از مدل‌های رایانه‌ای شبیه‌ساز و بهینه‌ساز همانند مدل کاربرد WEAP می‌باشد که اولین بار توسط Raskin *et al* (1992) مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های مختلفی باعث محبوبیت و استفاده فراوان از این مدل می‌باشد ازجمله: کاربر دوست بودن مدل در عین دقیق بودن مدل، انعطاف‌پذیر بودن مدل، امکان اتصال با سایر نرم‌افزارها مثل GIS، MODFLOW برای آب



(الف)

شکل ۲- مقایسه نتایج مدل مونت کارلو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت سناریوی A2، برای شبیه‌سازی (الف) دما و (ب) بارندگی

مشاهداتی شبیه‌سازی نموده است.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب

برای برآورد جریان سطحی رودخانه از مدل IHACRES استفاده شد، بدین منظور دما و بارندگی که از مدل مونت کارلو بدست آمده را به‌عنوان ورودی به مدل بارش-رواناب داده و رواناب به‌عنوان خروجی حاصل می‌شود. نتایج صحت‌سنجی و واسنجی مدل در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین سری زمانی جریان رودخانه تحت سناریوی انتشار A2 و طی دوره آبی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ در شکل (۳) نشان داده شده است که نشان از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی رواناب آبی دارد. فرمول معیارهای عملکرد در جدول (۱) آورده شده است.

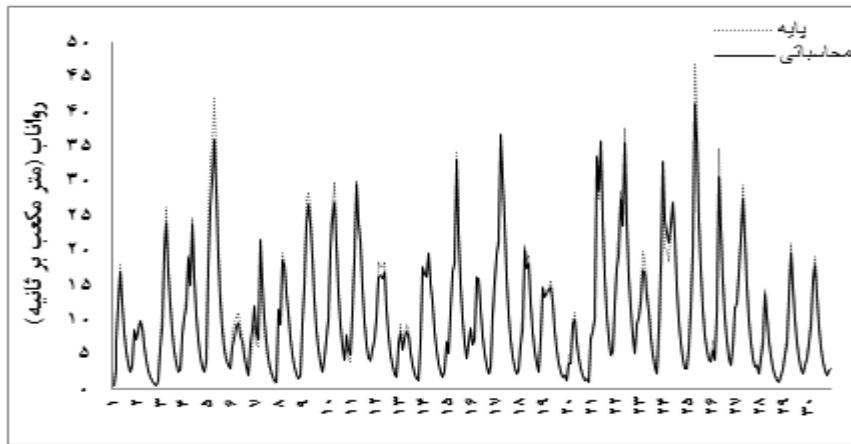
با توجه به شکل (۲-الف) می‌توان گفت در سناریوی A2 و در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ مدل مونت کارلو در همه ماه‌ها در شبیه‌سازی دما نسبت به مقادیر مشاهداتی افزایشی را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به شکل (۲-ب) می‌توان گفت این افزایش دما برای ماه‌های ژوئیه، آگوست و سپتامبر بیش‌ترین و برای ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس کم‌ترین هستند.

با توجه به شکل (۲-ب)، مدل مونت کارلو تحت سناریوی A2 طی دوره پایه ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بارندگی را برخلاف متغیر دما در برخی ماه‌ها کم‌تر و در برخی ماه‌ها بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی نموده است. به‌طورکلی می‌توان گفت مدل مونت کارلو میزان بارندگی را برای سناریوی A2 در فصل پاییز بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی و در سایر فصل‌ها کم‌تر از مقادیر

جدول ۱- معیارهای عملکرد مدل IHACRES

NSE (بدون بعد)	MAE (m^3/s)	$RMSE$ (m^3/s)	R^2 (%)	
$\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - AVE(B_i - B))^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}$	$\frac{\sum_{i=1}^n A_i - B_i }{n}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{n}}$	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - average A_i)(B_i - average B_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - average A_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (B_i - average B_i)^2}} \right) \cdot 100$	مشخصات شبیه‌سازی
۰/۶۶	۳/۳۷	۴/۹۸	۶۸/۴	دوره واسنجی (۱۹۹۰-۱۹۷۱)
۰/۶۴	۴/۲۷	۵/۷۸	۶۷/۴	دوره صحت‌سنجی (۱۹۹۱-۲۰۰۰)

که در آن، A_i = مقادیر شبیه‌سازی و B_i = مقادیر مشاهداتی هستند.



شکل ۳- مقایسه سری زمانی جریان رودخانه تحت سناریوی A2 در دوره (۲۰۴۰-۲۰۶۹) با دوره پایه

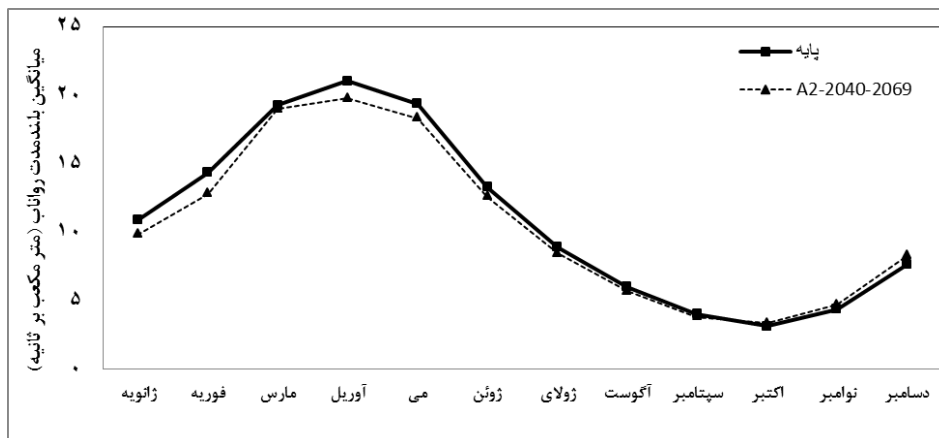
کاهش برای سناریوی A2 و دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به پایه به‌اندازه ۴/۳۳ درصد خواهد بود.

شبیه‌سازی جریان بلندمدت رودخانه در دوره آتی

پس از انجام صحت‌سنجی و واسنجی برای مدل مونت‌کارلو در سناریوی A2 مقایسه رواناب بلندمدت ماهانه حاصل از مدل مونت‌کارلو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ با مقادیر پایه انجام شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول (۱) پیدا است با توجه به بالا بودن ضریب تعیین و پایین بودن میزان خطاها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل IHACRES می‌تواند در شبیه‌سازی رواناب آینده برای مدل مونت‌کارلو عملکرد خوبی داشته باشد.

مطابق شکل (۳) که مقایسه رواناب محاسباتی حاصل از مدل مونت‌کارلو را با رواناب پایه نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که میزان رواناب آتی کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری‌که این میزان



شکل ۴. مقایسه رواناب بلندمدت ماهانه تحت سناریوی A2 طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ با مقادیر متناظر پایه

منطقه مورد مطالعه رودخانه دائمی خرم‌آباد هست و از آب سطحی فقط نیازهای مربوط به تقاضای کشاورزی برآورده می‌شود. همچنین برای در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم و مقایسه آن با حالت پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱)، سناریویی با نام A2-2040-2069 تعریف شد. مدل مورد نظر شامل یک منبع تولید (آب سطحی) و یک مصرف (نیاز کشاورزی) می‌باشد.

با سناریوی افزایش ۲۰ درصدی نیاز آبی در آینده، در قسمت نتایج می‌توان میزان آب اختصاص داده شده، تقاضای تأمین نشده و میزان اطمینان‌پذیری را مورد بررسی قرار داد. نیاز آبی، آب تخصیصی و تقاضای آب تأمین نشده به صورت بلندمدت ماهانه برای حالت پایه و سناریوهای تغییر اقلیم در جدول (۲) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۴) ملاحظه می‌شود که رواناب بلندمدت آبی تحت سناریوی A2 و در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به پایه کاهش داشته است و این کاهش برابر ۴/۳۳ درصد می‌باشد. همچنین در مقایسه تغییرات رواناب آبی نسبت به پایه در فصول مختلف، مشاهده می‌شود در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان میزان رواناب بلندمدت آبی کاهش و در فصل پاییز افزایش داشته است.

شبیه‌سازی وضعیت منابع آب

برای مدیریت منابع آب و تخصیص مقدار آب مورد نیاز از نرم‌افزار WEAP استفاده شد. برای شروع شبیه‌سازی با این نرم‌افزار، بعد از انتخاب واحد و تنظیم دوره زمانی مورد نظر که در تحقیق مورد نظر ۲۰۰۰-۱۹۷۱ می‌باشد، اجزای مختلف سامانه وارد شدند. طبق گزارش‌ها آب منطقه‌ای، منبع تأمین آب سطحی

جدول ۲- میزان مشخصه‌های مربوط به نیاز آبی، آب تخصیصی و تقاضای آب تأمین شده ماهانه بلندمدت در دوره‌های پایه و تغییر اقلیم (میلیون مترمکعب)

مشخصه‌ها	دوره بررسی	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
نیاز آبی	پایه	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۱/۹۳	۴/۸۳	۵/۳۲	۵/۳۲	۳/۸۷	۱/۹۳	۰/۶	۰/۴۸
	A2-2040-2069	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۲/۳۲	۵/۸	۶/۳۸	۶/۳۸	۴/۶۴	۲/۳۲	۰/۷۲	۰/۵۸
آب تخصیصی	پایه	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۱/۹۳	۴/۸۳	۵/۲۶	۵/۲۱	۳/۸۷	۱/۹۳	۰/۶	۰/۴۸
	A2-2040-2069	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۲/۳۲	۵/۸	۶/۲۱	۵/۸۲	۴/۰۸	۲/۲۷	۰/۷۲	۰/۵۸
تقاضای آب تأمین نشده	پایه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۱۱	۰	۰	۰	۰
	A2-2040-2069	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۰۵	۰	۰

دوره آگوست می‌باشد اما در دوره تغییر اقلیم این میزان به ۰/۵۶ مترمکعب در هر دو ماه آگوست و سپتامبر می‌رسد که نشان از ضرورت نیاز به مدیریت صحیح منابع آب به خصوص در دوره آبی را دارد.

مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری برای حالت پایه و سناریوی اقلیمی که از نرم‌افزار WEAP به دست آمده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقایسه شاخص اطمینان‌پذیری

کشاورزی	دوره بررسی
۹۸/۶۱	پایه
۹۱/۳۹	A2-2040-2069

مطابق جدول (۳) که شاخص اطمینان‌پذیری حاصل از نرم‌افزار WEAP را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود در هر دو دوره پایه و تغییر اقلیم سامانه قادر به تأمین تمام تقاضا در همه ماه‌ها نبوده و در برخی ماه‌ها تقاضای تأمین نشده وجود خواهد

با توجه به جدول (۲) ملاحظه می‌شود که در پروژه مورد نظر میزان آب تخصیص داده شده برای سناریوی تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه با توجه به افزایش تقاضا در حالت تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه، بیشتر است. در هر دو دوره پایه و تغییر اقلیم در ماه‌هایی که مصرف آب افزایش و میزان جریان کاهش می‌یابد، سامانه قادر به تأمین تمام آب مورد تقاضا نبوده و در نتیجه تقاضای تأمین نشده وجود خواهد داشت این میزان برای سناریوی تغییر اقلیم بیشتر از حالت پایه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود در دوره پایه از اواخر فصل بهار تا اواسط تابستان تقاضای تأمین نشده وجود دارد اما در دوره تغییر اقلیم این بازه طولانی‌تر شده و تقاضای تأمین نشده از اواخر بهار تا اوایل پاییز وجود خواهد داشت.

از دیگر نکات قابل توجه، افزایش میزان تقاضای تأمین نشده در دوره تغییر اقلیم نسبت به پایه می‌باشد که در دوره پایه بیشترین میزان تقاضای تأمین نشده ۰/۱۱ مترمکعب در

خواهد بود. بعد از صحت‌سنجی و واسنجی مدل IHACRES با داده‌های دما، بارندگی و رواناب پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱، با دادن مقادیر دما و بارندگی حاصل از مدل هیبریدی به مدل IHACRES، میزان جریان سطحی رودخانه در آینده به دست آمد. نتایج کاهش میزان رواناب آبی را نسبت به مقادیر پایه نشان دادند. این کاهش برای سناریوی A2 در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ به میزان ۴/۳۳ درصد می‌باشد. در نهایت وضعیت منابع آب با مدل WEAP شبیه‌سازی شد و سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و میزان تخصیص آب در دوره پایه و دوره تغییر اقلیم مقایسه شدند. با توجه به نتایج حاصل از مدل WEAP، می‌توان نتیجه گرفت در حالت پایه در فصل تابستان که بیش‌ترین مقدار تقاضا برای آب در بخش کشاورزی وجود دارد، تمام تقاضا برآورده نمی‌شود و تقاضای تأمین‌نشده وجود خواهد داشت. این وضعیت در سناریوی تغییر اقلیم A2-2040-2069 تشدید می‌شود. به طوری که مقدار تقاضای تأمین‌نشده سالانه برابر ۰/۱۷ میلیون مترمکعب و در سناریوی A2-2040-2069 برابر ۱/۳۳ میلیون مترمکعب بود. با بررسی اطمینان‌پذیری حاصل از نرم‌افزار WEAP مشخص شد که اطمینان‌پذیری سامانه در شرایط تغییر اقلیم هشت درصد نسبت به دوره پایه کاهش داشت که نشان داد در هر دو دوره به‌خصوص دوره تغییر اقلیم با توجه به کاهش اطمینان‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه نیاز به مدیریت صحیح منابع آب وجود خواهد داشت.

REFERENCES

- Ashofteh, P.-S., Rajaei, T., and Golfam, P. (2017). "Assessment of Water Resources Development Projects under Conditions of Climate Change Using Efficiency Indexes (EIs)", *Water Resources Management*, 31 (12), DOI: 10.1007/s11269-017-1701-y.
- Chithra, N. R. and Thampi, S. G. (2015). "Detection and attribution of climate change signals in precipitation in The Chaliyar River Basin, Kerala, India", *Aquatic Procedia*, 4, 755-763, DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.158.
- Davtalab, R., Madani, K., Massah, A. and Farajzadeh, M. (2014), "Evaluating the effects of climate change on water reliability in Iran's Karkheh River Basin", *World Environmental and Water Resources Congress, Portland, Oregon, 1-5 June*, DOI: 10.1061/9780784413548.212.
- Giglioli, N. and Saltelli, A., (2003), Simlab 2.2, Software for sensitivity and uncertainty analysis. Simlab Manual, Joint Research Centre European Commission.
- Ingol-Blanco, E. and McKinney, D. C. (2011), "Analysis of scenarios to adapt to climate change impacts in the Rio Conchos Basin", *World Environmental and Water Resources Congress, Palm Springs, California, United States, 22-26 May*, DOI: 10.1061/41173(414)141.
- IPCC-TGCI, (1999), Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
- IPCC, (2007) Summary for Policymakers. In: *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, United Kingdom and New York, USA, pp 18.
- IPCC, (2001). Summary for Policymakers, in McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds.) (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 1-1042.

داشت. همچنین اطمینان‌پذیری سامانه در شرایط تغییر اقلیم هشت درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. بنابراین در هر دو دوره به‌خصوص دوره تغییر اقلیم با توجه به کاهش اطمینان‌پذیری نسبت به دوره پایه نیاز به مدیریت صحیح منابع آب وجود خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مدیریت منابع آب سطحی حوضه رودخانه خرم‌آباد تحت شرایط تغییر اقلیم با توسعه یک مدل هیبریدی پرداخته شده است. به‌منظور بررسی پدیده تغییر اقلیم از خروجی پنج مدل AOGCM شامل CSIRO-MK2، CCSR-NIES، CGCM2، HadCM3 و GFDL-R30 طی دوره آبی ۲۰۶۹-۲۰۴۰، تحت سناریوی انتشار A2 استفاده شد. همچنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های خروجی مدل‌های AOGCM از رویکرد بیزی استفاده شد. بدین منظور ابتدا خروجی مدل‌های AOGCM کوچک‌مقیاس شده و وزن‌دهی شدند، سپس با استفاده از روش مونت کارلو تعداد ۱۰۰ نمونه از تابع توزیع احتمالاتی ماهانه دما و بارندگی کوچک‌مقیاس شده حوضه، تولید شدند. نتایج نشان دادند که افزایش دمای آبی به میزان ۱/۹۳ تا ۳/۷ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین طبق مدل توسعه‌یافته هیبریدی میزان بارندگی در برخی ماه‌ها افزایش و در برخی ماه‌ها کاهش داشت. محدوده تغییرات بارندگی آبی حوضه بین ۱۷/۲۹- تا ۱۰۳۶/۰۴ درصد

- IPCC, (2013) Summary for Policymakers. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, *et al.*, editors. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 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, DOI: 10.1029/93WR00877.
- Jones P. D. and Hulme M., (1996). "Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations", *International Journal of Climatology*, 16 (4), 361-377, DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199604)16:4<361::AID-JOC53>3.0.CO;2-F.
- Lane, M. E., Kirshen, P. H., and Vogel, R. M. (1999). "Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125 (4), 194-204, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(194).
- Milly, P. C., Dunne, K. A., and Vecchia, A. V. (2005). "Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate", *Nature*, 438 (7066), 347-350.
- Nijssen, B., O'donnell, G. M., Hamlet, A. F., and Lettenmaier, D. P. (2001). "Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change", *Climatic change*, 50 (1-2), 143-175.
- Novotny, E. V., and Stefan, H. G. (2007) "Stream flow in Minnesota: Indicator of climate change", *Journal of Hydrology*, 334 (3-4), 319-333, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.10.011.
- Raskin, P., Hansen, E., Zhu, J., and Iwra, M. (1992). "Simulation of water supply and demand in the Aral sea region", *Water International*, 17 (2), 55-67, DOI: 10.1080/02508069208686127.
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C, and Sanvicente-Sanchez, H. (2008), "Evaluation of water Management Scenarios for the Rio Grande/Bravo", *World Environmental and Water Resources Congress, Honolulu, Hawaii, United States, 12-16 May*, DOI: 10.1061/40976(316)259.
- Teasley, R. L. and McKinney, D. C. (2007), "Whole basin water resources planning model for the Rio Grande/Bravo", *World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, Florida, United States, 15-19 May*, DOI: 10.1061/40927(243)218.
- Vicuña, S., McPhee, J., and Garreaud, R. D. (2012). "Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138 (5), DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000202.
- 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.