



Determination of the Optimal Economic Height Increase of the Zarinah-Roud Dam Using a Simulation-optimization Approach and Evaluation of the Reservoir's Performance Under Climate Change Conditions

Omid Niroumand¹ | Mojtaba Shourian^{2✉} | Maryam Javan Salehi³

1. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: om.niroumand@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_shourian@sbu.ac.ir
3. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_javansalehi@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received 16 January 2024 Received in revised form 27 March 2024 Accepted 4 April 2024 Published online 5 September 2024</p> <p>Keywords: <i>Climate Change</i> <i>Increasing the height of the dam</i> <i>Invasive Weed Optimization (IWO) algorithm</i> <i>WEAP</i></p>	<p>In this study, the combination of the Improved Water Optimization (IWO) algorithm and the Water Evaluation and Planning System (WEAP) simulation model was employed to investigate the potential increase in the economic optimum height of the Zarinah Rood Reservoir Dam. The WEAP model's results indicated deficiencies in meeting the drinking, industrial, agricultural, and environmental needs of the study area under current conditions. Furthermore, the WEAP-IWO modeling results revealed an economically optimal increase in the height of the Zarinah Rood dam by 6.3 meters, resulting in a new reservoir volume estimated at 913.4 million cubic meters. By incorporating this increased reservoir volume into the WEAP model, there was an average 17.76 (percent) enhancement in demand coverage and water supply system reliability across the study area. Additionally, the study assessed the impact of climate change on inflows to the Zarinah Rood reservoir for the future period (2022-2040), indicating an overall decreasing trend in the average annual river discharge compared to the baseline period. Furthermore, under both the SSP1-2.6 (optimistic) and SSP5-8.5 (pessimistic) scenarios, water scarcity for meeting agricultural demands in the study area is projected to worsen relative to current conditions. Reductions in demand coverage and reliability index results for the study area were observed under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios compared to current conditions. Therefore, increasing the dam's height to mitigate the effects of climate change appears necessary.</p>

Cite this article: Niroumand, O., Shourian, M., & Javan Salehi, M. (2024). Determination of the Optimal Economic Height Increase of the Zarinah-Roud Dam Using a Simulation-optimization Approach and Evaluation of the Reservoir's Performance Under Climate Change Conditions. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 309-328.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.370706.1135>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.370706.1135>



تعیین افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد مخزنی زرينه‌رود با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد مخزن در شرایط تغییر اقلیم

امید نیرومند^۱ | مجتبی شوریان^۲ | مریم جوان صالحی^۳

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: om.niroumand@sbu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_shourian@sbu.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_javansalehi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

افزایش ارتفاع سد

تغییر اقلیم

الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز

مهاجم (IWO)

WEAP

در این مطالعه، با استفاده از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی تکثیر علف‌های مهاجم (IWO) و مدل شبیه‌سازی WEAP، میزان افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد مخزنی زرينه‌رود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی محدوده مطالعه توسط مدل WEAP نشان داد t در شرایط موجود نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست منطقه با کمبود مواجهند. نتایج مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی (WEAP-IWO) نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد زرينه‌رود برابر با ۶/۳ متر می‌باشد. حجم جدید مخزن سد با لحاظ نمودن افزایش ارتفاع نیز برابر با ۹۱۳/۴ میلیون مترمکعب برآورد گردید. با در نظر گرفتن حجم جدید مخزن سد زرينه‌رود در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدوده و شاخص اطمینان‌پذیری سیستم تأمین آب در محدوده مطالعاتی به‌طور متوسط افزایش ۱۷/۷۶ درصدی را نشان داد. در ادامه بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد زرينه‌رود در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) انجام گرفت. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زرينه‌رود نسبت به دوره پایه دارد. در ادامه نتایج نشان داد که در دوره آتی تحت سناریوی SSP1-2.6 (خوش‌بینانه) و سناریوی SSP5-8.5 (بدبینانه)، کمبود منابع آبی برای تأمین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود در وضعیت بدتری قرار دارد. در هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به نسبت شرایط موجود کاهش درصد پوشش نیازهای و همچنین نتایج شاخص اطمینان‌پذیری محدوده مطالعاتی را نشان دادند. لذا افزایش ارتفاع سد به‌منظور مقابله با اثرات تغییر اقلیم امری ضروری است.

استناد: نیرومند، امید؛ شوریان، مجتبی و جوان صالحی، مریم (۱۴۰۳). تعیین افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد مخزنی زرينه‌رود با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد مخزن در شرایط تغییر اقلیم. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۳۰۹-۳۲۸.

DOI: <https://doi.org/0.22059/jwim.2024.370706.1135>



۱. مقدمه

کمبود آب در بخش‌های زیادی از کره زمین، مشکلات قابل توجه را برای تأمین آب شرب سالم، تولید محصولات کشاورزی و در کل روند عمومی زندگی انسان‌ها به وجود آورده است. بخش کشاورزی، به منظور تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب به‌شمار می‌رود و حدوداً ۷۰ درصد برداشت از منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی به آبیاری در بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود (Xue et al., 2017).

کشور ایران به دلیل قرارگیری بر روی کمربند خشک و نیمه‌خشک دنیا و در نتیجه آن بروز خشکسالی‌های دوره‌ای، با معضل کم‌آبی در بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست مواجه است (Haddad et al., 2023). همچنین، به دلیل عدم توزیع یکنواخت زمانی و مکانی بارندگی در طول سال، ذخیره رواناب فصول تر، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توسعه سریع اقتصادی، نقش سدهای مخزنی به‌عنوان یکی از مؤثرترین زیرساخت‌ها برای توسعه و مدیریت یکپارچه منابع آب در تأمین نیازهای جوامع اهمیت بیش‌تری یافته است.

تقاضای آب در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، با رشد بالای صنعت، شهرنشینی و تغییر روش زندگی رو به افزایش است. از سوی دیگر، با گذر عمر مفید سدهای مخزنی، رسوبات بیش‌تری در مخازن انباشته می‌شوند و ظرفیت ذخیره مخازن و توانایی آن‌ها برای تأمین نیازها و کنترل سیلاب‌ها کاهش می‌یابد. در این راستا، افزایش ارتفاع سدها از جمله اقداماتی است که با هدف احیای سدهای مخزنی انجام می‌گردد. در مقایسه با روش احداث سدهای مخزنی جدید، در روش افزایش ارتفاع سدها نیازی به در نظر گرفتن محل احداث سد نیست. بنابراین با توجه به محدودیت محل احداث سدها و امکان افزایش ظرفیت مخازن با هزینه اقتصادی کم‌تر، ترفیع سدهای مخزنی قدیمی اقدامی است که برای بهبود عملکرد آن‌ها مورد توجه بسیاری از مهندسان و پژوهش‌گران قرار گرفته است (Schleiss et al., 2014).

در این راستا، در دهه‌های اخیر در بسیاری از کشورهای جهان با هدف بهینه‌سازی سود ساختارهای هیدرولیکی دست به مرتفع‌سازی سدها زده‌اند از جمله سد روسیرس^۱ در سودان (Alrajoula et al., 2016)، سد فریمان^۲ در ایران (Omran and Abbas, 1999) و سد سونگیو^۳ در چین (Yihui et al., 2008). در تعیین افزایش ارتفاع بهینه سد، از الگوریتم‌ها و روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری می‌شود. در این زمینه، روش‌های فراکاوشی توجه پژوهش‌گران را به خود اختصاص داده‌اند.

یکی از این روش‌های فراکاوشی که به‌طور خاص مورد توجه قرار گرفته است، الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) است. این الگوریتم از رفتار گروهی علف‌های هرز مهاجم الهام گرفته شده و با بهره‌گیری از تکنیک‌های تکاملی، به دنبال یافتن بهینه‌ترین ارتفاع برای سد با شرایط موجود می‌باشد. استفاده از این الگوریتم‌ها امکان دستیابی به جواب‌های بهینه و مؤثرتر در زمینه تصمیم‌گیری‌ها را فراهم می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) نسبت به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی کارایی بالا، انعطاف‌پذیری و قابلیت مقایسه با شرایط واقعی محیطی است که باعث می‌شود به‌عنوان یک انتخاب مطلوب در تعیین راه‌حل‌های بهینه برای مسائل مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Rajesh and Pyne, 2021).

برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه نیز عبارتند از Mehrabian and Lucas (2006) برای تعیین موقعیت بهینه محرک‌های پیرو الکتریک در فن‌های هوشمند از الگوریتم IWO استفاده نمودند. به‌طور مشخص در این مطالعه به شیوه تلفیقی از دو روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شده است. بدین صورت که، ابتدا با استفاده از مدل شبیه‌سازی WEAP، شرایط فعلی نیازهای منطقه اعم از نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفته

است. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی تکثیر علف‌های هرز مهاجم (IWO)، بهینه‌سازی افزایش ارتفاع سد زربنه‌رود انجام شده است. این تلفیق امکان ارائه یک راه‌کار جامع و بهینه به‌منظور بررسی میزان افزایش بهینه ارتفاع سد و بهره‌برداری از مخزن سد زربنه‌رود با هدف تأمین بیش‌تر نیازهای پایین‌دست را فراهم کرده و باعث بهبود دقت و کارایی نتایج مطالعه می‌شود. در گام آخر این مطالعه، پس از توسعه مدل تلفیقی WEAP-IWO، تأثیرات تغییر اقلیم در آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) به مدل پیشنهادی اعمال شده و نتایج حاصله تحلیل و بررسی شده است. بدین منظور برای پیش‌بینی تغییرات بارش و دما در آینده از مدل LARS-WG براساس گزارش ششم و برای پیش‌بینی رواناب حوضه از مدل IHACRES استفاده شد.

مدل LARS-WG یک مدل تولید داده‌های آب‌وهوای آب‌وهواست که برای مطالعه تأثیرات تغییر اقلیم بر مناطق آب‌وهوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل براساس الگوریتم‌های آماری و ریاضیاتی که روند تغییرات دما و بارش را شبیه‌سازی می‌کند، طراحی شده است. نام LARS-WG از اصطلاح "Long Ashton Research Station Weather Generator" گرفته شده است که به‌عنوان مرکز تحقیقاتی برای مطالعات آب‌وهوا واقع در انگلستان شناخته می‌شود. این مدل قادر است تا داده‌هایی مانند دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد را براساس داده‌های آماری از گذشته تولید کند که می‌توان از آن‌ها برای مطالعه روندهای آب‌وهوایی در آینده و تحلیل تغییرات اقلیمی استفاده کرد (Sha et al., 2021).

هم‌چنین، مدل IHACRES یک مدل هیدرولوژیکی است که برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود. نام IHACRES از اصطلاح "Instantaneous Unit Hydrograph And Component-based Rainfall-runoff Evaluation System" گرفته شده است که به معنی "سیستم ارزیابی فرایند نمودار واحد فوری و مبتنی بر اجزای رواناب" است. این مدل به‌طور اصلی برای مدل‌سازی رواناب‌ها و سیستم‌های رسوب‌زایی در حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود و می‌تواند در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آبی، پیش‌بینی سیلاب و توسعه برنامه‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد (Abushandi and Merkel, 2013).

به‌طور کلی، IHACRES یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز است که به پژوهش‌گران و متخصصان منابع آبی کمک می‌کند تا درک بهتری از واکنش‌های آبی در مقیاس حوضه‌های آبریز به بارش‌ها و رواناب‌ها داشته باشند (Abushandi and Merkel, 2013).

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. محدوده مطالعاتی

رودخانه زربنه‌رود یکی از مهم‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. این رودخانه از دامنه‌های شمالی کوه‌های چهل‌چشمه در نزدیکی مرز عراق سرچشمه گرفته و پس از جمع‌آوری جریان‌های سطحی تعدادی از شاخه‌های مهم مانند ساروق‌چای، خورخوره‌چای، سقزچای و آجرلو، از جنوب به طرف شمال جریان یافته و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. دشت زربنه‌رود در استان آذربایجان غربی واقع در شمال غربی ایران بین ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). رودخانه زربنه‌رود از شاخه‌های سقز، خورخوره‌چای و ساروق‌چای تشکیل شده و در محل یمین‌آباد به سد مخزنی زربنه‌رود وارد می‌شود.

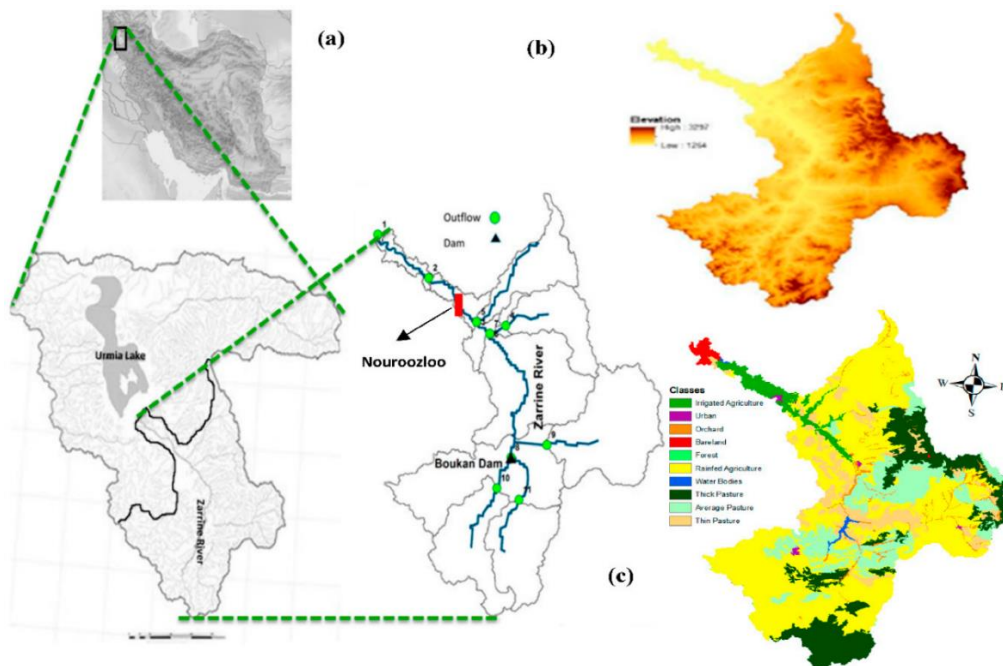


Figure 1. Location of the Zarrinehroud watershed, Lake Urmia, West Azerbaijan, Iran

عمده‌ترین منابع آب‌های سطحی دشت میاندوآب رودخانه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود می‌باشند. که پس از مشروب‌کردن اراضی دشت مزبور به دریاچه ارومیه می‌ریزد. دشت زرينه‌رود دارای وسعتی برابر ۸۵۰۰۰ هکتار می‌باشد که ۲۰۰۰۰ هکتار آن، به دلیل باتلاقی بودن و داشتن سطح تراز با سطح دریاچه ارومیه قابل استفاده نمی‌باشد. سد سنگ ریزه‌ای با هسته مرکزی رسی زرينه‌رود با حجم مخزن ۶۴۵ میلیون مترمکعب و میزان آب تنظیمی ۷۵۰ میلیون مترمکعب در سال بر روی رودخانه زرينه‌رود در استان کردستان با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی در ۸۵ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان میاندوآب و در شرق شهرستان بوکان احداث گردیده است. بند انحرافی نوروزلو در ۷۰ کیلومتری پایین‌دست سد مخزنی زرينه‌رود احداث شده و بدین ترتیب بند انحرافی و شبکه آبیاری در استان آذربایجان غربی قرار می‌گیرد.

۲.۲ روش پژوهش

شکل (۲) چارچوب و داده‌های مورد استفاده پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در این مطالعه، ابتدا میزان نیاز آبی در بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه شامل بخش کشاورزی، شرب، صنعت و زیست‌محیطی از آب منطقه‌ای استان دریافت شد (مطالعات کشاورزی دریاچه ارومیه، ۱۳۹۰). پس از مشخص شدن نیازهای بخش‌های مختلف، مدل‌سازی تخصیص منابع آب با استفاده از مدل WEAP^۴ در وضعیت موجود انجام شد.

سد زرينه‌رود به منظور افزایش رهاسازی و افزایش تأمین حق‌آبه در پایین‌دست قابلیت افزایش ارتفاع تا ۱۰ متر را دارد. در اثر افزایش ارتفاع سد و در نتیجه افزایش ذخیره مخزن، میزان آب ذخیره‌شده در مخزن سد افزایش می‌یابد، لذا رهاسازی از سد افزایش می‌یابد و آب بیش‌تری در پایین‌دست در دسترس خواهد بود و درآمد ذی‌نفعان افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع سد، افزایش هزینه ساخت را به دنبال دارد.

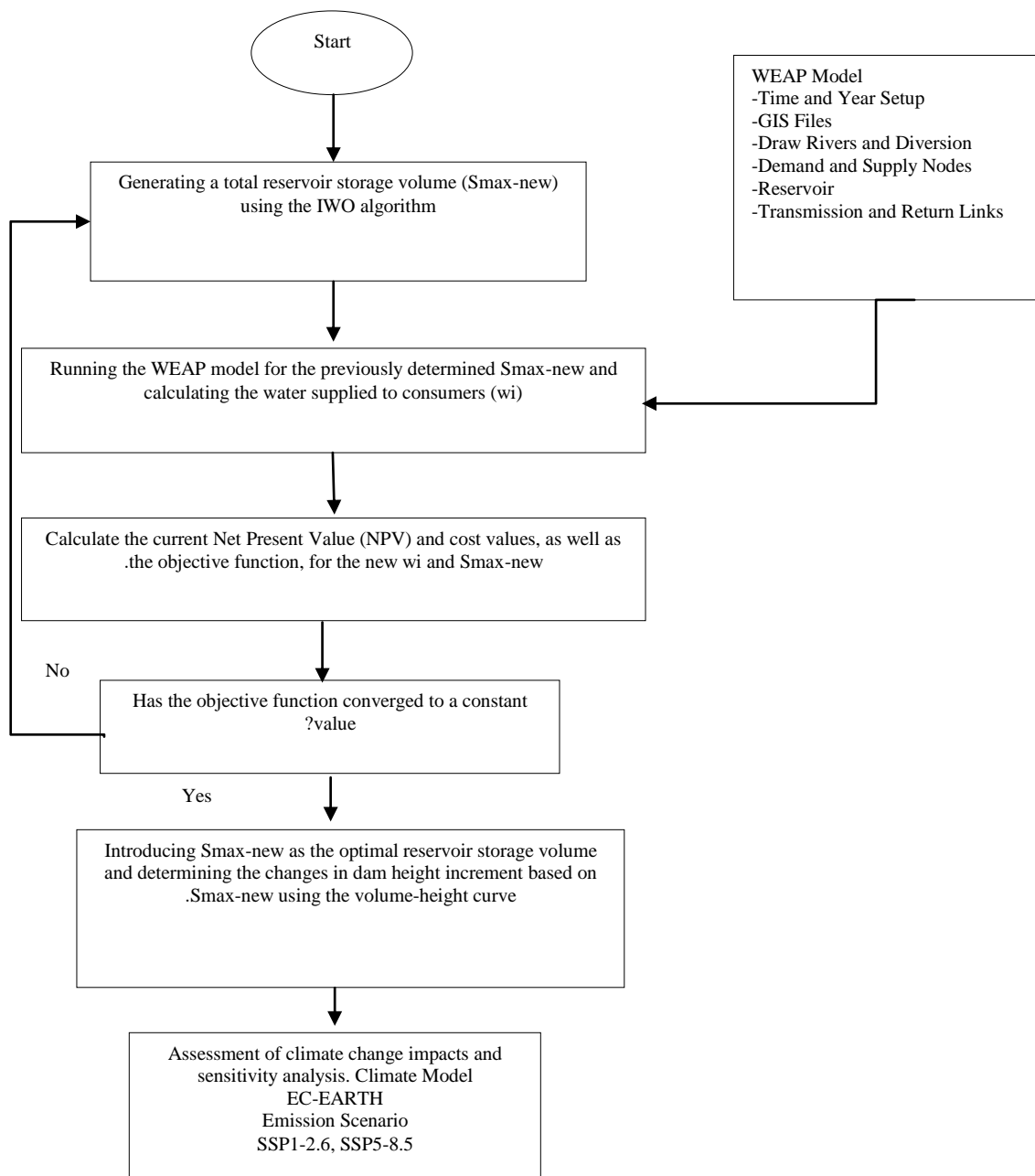


Figure 2. The workflow of the methodology steps

از این رو، در این پژوهش به کمک الگوریتم بهینه‌سازی IWO و مدل شبیه‌ساز WEAP به دنبال پاسخ به سؤال افزایش ارتفاع سد چند متر باشد تا توجیه اقتصادی داشته باشد، هستیم. از این رو، پس از ساخت و کالیبراسیون مدل WEAP، به کدنویسی الگوریتم IWO به منظور محاسبه افزایش ارتفاع بهینه سد و سپس محاسبه سود خالص از افزایش ارتفاع سد می‌پردازیم. در نهایت به منظور شناسایی شرایط هیدرولوژیکی منطقه و پیش‌بینی آن در آینده و برنامه‌ریزی منابع آب در دسترس، ضروری است که درک صحیحی از تغییرات آب‌وهوایی در مقیاس مکانی و زمانی وجود داشته باشد.

به عبارت دیگر، این مطالعه با هدف شناسایی شرایط هیدرولوژیکی منطقه در آینده و برنامه ریزی منابع آب در دسترس، نیازمند درک دقیقی از تغییرات آب و هوایی است. از این رو، از مدل‌های گردش عمومی (GCM) به عنوان ابزارهای مؤثر و به روز برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در سطح جهانی استفاده شده است. به این ترتیب، پیش‌بینی تغییرات آینده اقلیم و استفاده از این اطلاعات به عنوان ورودی مهم برای تحلیل شرایط هیدرولوژیکی و برنامه ریزی منابع آبی در آینده از اهمیت بسیاری برخوردار است. این اطلاعات می‌توانند به ما کمک کنند تا با تغییرات محتمل در شرایط آب و هوایی، به بهترین شکل ممکن برنامه ریزی و مدیریت منابع آبی را انجام دهیم و برای مواجهه با چالش‌هایی که از تغییرات اقلیمی ناشی می‌شوند، آماده باشیم.

۲.۲.۱. مدل WEAP

مدل WEAP توسط موسسه محیط زیست استکهلم (SEI) توسعه یافته است. WEAP به صورت یک ابزار پیش‌بینی، نیاز آبی، جریان‌ها و مقدار ذخیره، گسترش آلودگی و آبدهی را شبیه‌سازی می‌کند (Gao et al., 2017). این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی طیف وسیعی از مؤلفه‌های طبیعی و ساخته شده این سیستم‌ها از قبیل رواناب، دبی پایه، تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی، تحلیل نیازها، ذخیره آب، حقایقها و اولویت‌های تخصیص، بهره‌برداری از مخزن، تولید برقایی، روندیابی آلودگی و کیفیت آب، ارزیابی آسیب‌پذیری و نیازهای اکوسیستم است (Mehta et al., 2011). مزیت اصلی WEAP در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن، در راستای سیاست‌هاست (Abera Abdi and Ayenew, 2021; Banihabib et al., 2019).

در این پژوهش در ابتدا جهت مدل‌سازی منابع آب و مصارف حوضه آبریز پایین دست سد زرنه رود پیکربندی سیستم تهیه شد (شکل ۳). در شکل زیر، محصولات کشاورزی گندم (WWHT)، یونجه (ALFA)، سیب (APPLE)، جو (BARELY)، سیب‌زمینی (POTATO)، چغندر (SGBT) و گوجه‌فرنگی (TOMATO) نشان داده شده است. همچنین صنعت پرورش ماهی (Fishing industry)، شرب تبریز (Tabriz Dom)، شرب سقز (Saghez Dom) و شرب میان دوآب (Miandoab Dom) نشان داده شده است.

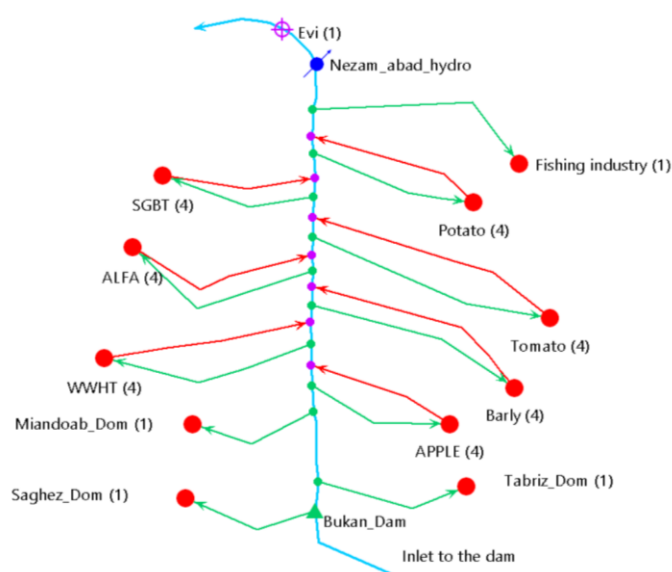


Figure 3. Configuration of Zarrinehroud river in the WEAP

برای شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز پایین‌دست سد زرینه‌رود لازم است که اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری، میزان آب ورودی به مخزن سد، میزان نیاز شرب، صنعت و کشاورزی، نیاز زیست‌محیطی و سایر موارد جمع‌آوری گردد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2013). حوضه آبریز پایین‌دست سد زرینه‌رود، شامل دو محدوده مطالعاتی صائین قلعه و میان‌دوآب می‌باشد. مقادیر نیاز سالانه کشاورزی، راندمان، درصد تأمین از منابع آب سطحی و زیرزمینی براساس آمار ارائه‌شده در گزارش مطالعات کشاورزی حوضه آبریز زرینه‌رود و همچنین براساس آمار و اطلاعات دریافتی مقادیر نیاز شرب و صنعت در حوضه آبریز پایین‌دست سد زرینه‌رود به تفکیک در جدول (۱) ارائه شده است.

Table 1. Downstream demands of Zarrinehroud dam (Water Consulting Engineers and Sustainable Development 2013)

Demand site	Area (ha)	Water requirements (m ³ /ha)	Annual requirement (MCM)	Irrigation efficiency
Saghez Domestic	-	-	40	-
Tabriz Domestic	-	-	314	-
Miandoab Domestic	-	-	115	-
Fishing Industry	-	-	140	-
Agriculture	61247	11918	730	49
Environmental	-	-	126	-

لازم به ذکر است که آب برگشتی برای مدل‌سازی محدوده موردنظر برای بخش‌های کشاورزی براساس راندمان ۴۹ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین، طبق گزارش‌های محدوده زرینه‌رود، پرورش ماهی در این محدوده به صورت سرد آبی است که طبق گزارش‌های آب برگشتی تصفیه و دوباره در استخرهای پرورش ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو شهر تبریز و میان‌دوآب نیز سیستم تصفیه فاضلاب داشته و با توجه به قرارگرفتن در خارج از حوضه زرینه‌رود آب برگشتی آن‌ها به رودخانه زرینه‌رود باز نمی‌گردد. لذا برای بخش‌های مذکور جریان آب برگشتی در نظر گرفته نشده است.

دوره شبیه‌سازی از سال (۱۹۸۳-۲۰۲۱) در نظر گرفته شد و مقادیر منابع و مصارف (شبکه‌های آبیاری و زهکشی زرینه‌رود، اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه، صنعت و شرب محدوده مطالعاتی) موجود در طول این دوره مورد وارد مدل گردید. در گام بعد اطلاعات مربوط به مخزن سد زرینه‌رود اعم از حداقل حجم ۱۶۱ (mcm) و حداکثر حجم سد ۶۴۵ (mcm)، حجم اولیه سد در ابتدای دوره شبیه‌سازی ۳۲۳ (mcm)، تبخیر از سطح سد و منحنی حجم-ارتفاع-سطح وارد مدل گردید. همچنین دبی ورودی به مخزن سد زرینه‌رود به‌عنوان دبی سرشاخه وارد مدل گردید. در ادامه تمامی مصارف شرب، صنعت و کشاورزی به تفکیک و به ترتیب با اولویت نیاز شرب، محیط زیست، صنعت و کشاورزی به مدل اضافه گردید.

۲.۲.۲ الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (Invasive Weed Optimization Algorithm)

در الگوریتم IWO، از یک پدیده متداول در کشاورزی الهام گرفته شده است. نحوه گردآمدن و تجمع علف‌های مهاجم در مزرعه‌ها و باغ‌ها الهام‌بخش توسعه IWO می‌باشد. علف مهاجم هرگونه بته، علف یا حتی درختی است که در جایی (معمولاً خودکار) رشد کند که مورد نیاز نباشد. رفتار علف‌های مهاجم حالت تهاجمی دارد و همواره موجب آسیب‌رساندن به مراتع، مزارع و باغ‌ها می‌شوند. علف‌های مهاجم رفتاری کاملاً توسعه‌یافته دارند. به‌گونه‌ای که می‌توانند خود را با محیط اطراف و شرایط جدید وفق دهند و رفتار مناسبی انتخاب نمایند. IWO با وجود سادگی، بسیاری از خصوصیات گیاهان از جمله تولید دانه، رشد و رقابت در یک دسته از گیاهان را مدل‌سازی می‌کند.

تعیین مقدار جمعیت اولیه

یک جمعیت اولیه ($P_{initial}$) از علف‌های مهاجم در فضای جستجوی d بعدی به صورت تصادفی تولید و پخش می‌شود. در واقع هر گیاه مهاجم یک جواب می‌باشد که موقعیت این گیاه در هر یک از ابعاد فضای d بعدی مسئله، متغیرهای تصمیم هستند. مجموعه‌ای از چند گیاه تشکیل یک دسته^۵ را می‌دهند.

تولید مثل

در این مرحله گیاهان با توجه به بهترین و بدترین کیفیت دسته و کیفیت خود و همچنین بیش‌ترین تعداد دانه تولیدی (S_{max}) و کم‌ترین تعداد دانه تولیدی (S_{min}) که به انتخاب کاربر می‌باشند، اجازه می‌یابند که تولید دانه کنند. همچنین $Seed_n$ تعداد دانه‌های تولیدشده، f سازگاری علف هرز فعلی، f_{min} و f_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل سازگاری از جمعیت فعلی می‌باشد. عمل تولید دانه به صورت خطی انجام می‌شود.

$$Seed_n = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad \text{رابطه (۱)}$$

پراکنده‌گی فضایی

در این مرحله دانه‌های تولیدشده به طور تصادفی در فضای چندبعدی مسئله پراکنده می‌شوند. تابع توزیع تصادفی، تابعی نرمال بوده بدین معنی که مقدار متوسط آن برابر صفر و انحراف معیار آن در مراحل مختلف متغیر می‌باشد و تضمین می‌کند که دانه‌هایی که به صورت تصادفی تقسیم شده‌اند بسیار نزدیک به گیاه والدینشان می‌باشند.

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، σ_{iter} : انحراف معیار تکرار جاری، $iter_{max}$: بیشینه تکرار (مراحل تولید نسل)، $iter$: شماره تکرار، $\sigma_{initial}$: انحراف معیار اولیه، σ_{final} : انحراف معیار نهایی و n : یک مدول غیرخطی (اندیس مدولاسیون غیرخطی)^۶ است که به انتخاب کاربر می‌باشد. این روش بیان می‌کند که احتمال قرارگیری دانه در فاصله دور از گیاه والد در ابتدای الگوریتم زیاد و طی مراحل بعدی الگوریتم که تعداد گیاهان مناسب افزایش می‌یابند، کاهش پیدا می‌کند.

حذف رقابتی

در الگوریتم علف‌های هرز مهاجم بعد از چند مرحله تکرار، تعداد دانه‌های کلونی در اثر تولید مثل به بیش‌ترین حد خود (P_{max}) می‌رسد و سپس مکانیسمی برای حذف دانه‌های ضعیف به کار گرفته می‌شود. هنگامی که بیش‌ترین تعداد دانه‌های مجاز تولید شدند هر دانه می‌تواند با توجه به روش گفته‌شده در مراحل قبل دانه‌های جدیدی تولید نماید که می‌توانند در فضای مورد بحث پراکنده شوند. هنگامی که کل دانه‌ها در محل توزیع شدند به هر دانه امتیازی داده می‌شود و در مرحله آخر دانه‌ها با امتیاز کم‌تر حذف می‌شوند، به نحوی که جمعیت دانه‌ها همان حد بیشینه بماند. این مراحل تکرار می‌شوند تا کم‌کم دانه‌ها به دانه بهینه همگرا شوند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد هدف از این پژوهش بررسی افزایش ارتفاع سد زربینه رود با توجه اقتصادی در جهت افزایش رهاسازی آب برای پایین دست می‌باشد. تابع هدف این پژوهش بیشینه نمودن ارزش خالص کنونی^۷ (رابطه ۳) حاصل از اجرای افزایش ارتفاع سد می‌باشد. یکی از مفاهیم مهم در مدیریت مالی ارزش خالص حاضر (NPV) است که

در واقع ارزش زمان‌بندی شده از تمامی درآمدها و هزینه‌های یک پروژه یا سرمایه‌گذاری است. این معیار محاسبه می‌کند که یک سری درآمدها و هزینه‌های آتی با توجه به ارزش پول در زمان‌های مختلف چقدر ارزش خالص حاضر دارند (Knokke et al., 2020). لازم به ذکر است که متغیر تصمیم بیشینه حجم ذخیره جدید مخزن بعد از افزایش ارتفاع می‌باشد (S_{max} - new).

رابطه ۳) $Objective - function = Max (NPV)$

برای محاسبه NPV، ابتدا درآمدها و هزینه‌های موردبررسی در زمان‌های مختلف (معمولاً سالیانه) تعیین می‌شود. سپس این مقادیر با استفاده از نرخ بهره‌ای (نرخ بازگشت سرمایه) که نشان‌دهنده ارزش زمانی پول است، به ارزش خالص حاضر تبدیل می‌شوند. سپس مجموع ارزش خالص حاضر درآمدها و هزینه‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت این مقدار از ارزش اولیه سرمایه‌گذاری کم می‌شود. در اثر افزایش ارتفاع سد در نتیجه افزایش ذخیره مخزن، میزان آب ذخیره‌شده در مخزن سد افزایش می‌یابد. لذا رهاسازی از سد افزایش یافته و در نتیجه آب بیشتری در پایین‌دست در دسترس کشاورزان قرار می‌گیرد که نتیجه آن افزایش عملکرد محصولات و افزایش درآمد کشاورزان می‌باشد. از این‌رو نحوه محاسبه درآمد ناشی از اجرای طرح به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$Income_j = \sum_{i=1}^j A_i * Y_i * Price_i \quad \text{رابطه ۴)}$$

$$Y_i = PY_i * \left(1 - K_i * \left(1 - \frac{W_i}{W_T} \right) \right) \quad \text{رابطه ۵)}$$

در رابطه (۴)، i شماره‌نده محصول، A مساحت هر محصول به هکتار، Y عملکرد هر محصول برحسب کیلوگرم بر هکتار و Price قیمت فروش تضمینی هر محصول برحسب ریال بر کیلوگرم و Income_j درآمد ناشی از فروش محصولات در سال jام می‌باشد.

لازم به ذکر است که برای محاسبه عملکرد محصول از رابطه (۵) استفاده شد است، که در آن K ضریب حساسیت هر محصول i به آب (ثابت)، PY_i عملکرد پتانسیل هر محصول (ثابت) (مطالعات کشاورزی دریاچه ارومیه، ۱۳۹۰)، W_i آب رسیده به پای هر محصول (تابعی از رهاسازی) و W_T حداکثر آب موردنیاز هر محصول (ثابت) می‌باشد. با تغییر حجم ذخیره مخزن و در نتیجه آن رهاسازی آب از مخزن، مقدار W_i تغییر کرده و Y_i نیز تغییر می‌کند. از طرفی، افزایش ارتفاع سد نیازمند هزینه‌هایی می‌باشد که برای محاسبه آن‌ها مطابق رابطه (۷) عمل شد.

$$Cost = (A_{new} - A_{initial}) * V \quad \text{رابطه ۷)}$$

که در آن، A_{new} مساحت جدید دریاچه سد بعد از افزایش ارتفاع است که با استفاده از منحنی حجم-سطح-ارتفاع و براساس ارتفاع محاسبه می‌شود، A_{initial} مساحت اولیه دریاچه سد برحسب کیلومتر مربع و V (هزینه ساخت) هزینه لازم برای افزایش مساحت یک کیلومتر مربع دریاچه پشت سد می‌باشد که شامل هزینه ساخت بدنه سد و استغراق اراضی می‌باشد (لازم به ذکر است که این هزینه فقط یک بار و در سال اول محاسبه می‌شود). پس از محاسبه درآمد حاصله و هزینه ناشی از افزایش ارتفاع سد، سود حاصل از افزایش ارتفاع مطابق رابطه (۸) محاسبه شده و براساس رابطه (۹) و مفهوم ارزش خالص کنونی (Net Present Value) برای سال پایه تبدیل می‌گردد.

$$Benefit = (Income_j - Income_{initial}) - Cost \quad \text{رابطه ۸)}$$

در رابطه (۸)، Income_{initial} درآمد قبل از افزایش ارتفاع که یک مقدار ثابت می‌باشد و با حجم اولیه مخزن محاسبه شده است.

$$NPV = \sum_{t=1}^j \frac{Benefit}{(1+k)^t} \quad \text{رابطه ۹)}$$

در رابطه (۹)، j شماره‌نده محصول و k نرخ بازگشت سرمایه است که در این مطالعه ۱۰ درصد (براساس داده‌های

سایت بانک مرکزی) در نظر گرفته شده است. به طور خلاصه روند این مطالعه بدین صورت است که ابتدا کالیبراسیون مدل WEAP صورت می‌گیرد و سپس الگوریتم IWO برای تولید مقدار مجهول مسئله (Smax-new) اجرا می‌شود. فرایند به این صورت است که ابتدا الگوریتم IWO یک مقدار Smax-new برای مسئله مورد نظر تولید می‌کند. سپس این مقدار Smax-new با استفاده از دستورات مربوط به مدل WEAP وارد می‌شود. مدل WEAP برای دوره آماری (۲۰۲۱-۱۹۸۳) اجرا می‌شود و مقادیر آب تحویل داده شده به بخش کشاورزی محاسبه می‌شود. این مقادیر سپس دوباره وارد نرم‌افزار متلب می‌شوند و ارزش خالص کنونی را برای یک تکرار محاسبه می‌کند. این فرایند تا زمانی تکرار می‌شود که مقدار تابع هدف (ارزش خالص کنونی) به یک عدد ثابت همگرا شود.

۳.۲.۲. تغییر اقلیم

در این پژوهش، جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، با در نظر گرفتن پارامترهای بارش و دما بیشینه و کمینه به عنوان مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی، از خروجی سه مدل AOGCM تحت دو سناریوی انتشار SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۸۶) و دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) مربوط به ششمین گزارش ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، استفاده شد. انتخاب مدل‌ها اقلیمی براساس مقایسه داده‌های تاریخی آن‌ها با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه سینوپتیک زربنه رود (جدول ۲) انجام گرفت. سه مدل انتخاب شده در این مطالعه EC-EARTH، HadGEM2-ES و CSIRO-MK3-6.0 می‌باشند. در این بین، یکی از سه مدل اقلیمی براساس عملکرد خوب آن در شبیه‌سازی داده‌های تاریخی بارش (۱۹۸۶-۲۰۱۴) و مقایسه آن با داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک زربنه رود و همچنین با توجه به مقادیر ضرایب وزن‌دهی (WPG)، R^2 ، NSE و $BIAS$ به عنوان مدل برتر انتخاب گردید (Almazroui et al., 2020). برای GCM منتخب داده‌های بارش و دما به کمک نرم‌افزار LARS-WG تحت سه سناریو (SSP1-2.6 و SSP5-8.5) ریزمقیاس گردید. از آنجایی که مدل‌های گزارش ششم در نرم‌افزار LARS-WG تعریف نشده هستند. بنابراین، نیاز است تا خروجی هر کدام از مدل‌ها با تعریف سناریو ریزمقیاس شود.

به همین منظور داده‌های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به خروجی هر مدل برای دوره آتی تحت هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج شد.

سپس برای پارامتر بارش، نسبت میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی به دوره پایه و برای پارامترهای دمای بیشینه و دمای کمینه، اختلاف میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی و دوره پایه محاسبه می‌شود (Sha et al., 2021). بنابراین، برای هر پارامتر در هر ماه ضربی به دست می‌آید که از آن برای ایجاد سناریو در نرم‌افزار LARS-WG و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گزارش ششم استفاده می‌شود (Mehta et al., 2011). در اثر تغییر اقلیم، بارش و دما محدوده در آینده دستخوش تغییرات می‌گردد. در این میان، بررسی میزان رواناب برای تخمین حجم آب در دسترس در حوضه لازم است. از این رو، برای شبیه‌سازی بارش-رواناب از مدل IHACRES استفاده شد (Jakeman and Hornberger, 1993) و دبی ورودی به سد زربنه رود با خروجی مدل اقلیمی منتخب پیش‌بینی گردید.

۳.۲.۲. معیارهای عملکردی

در پژوهش حاضر به منظور برآورد میزان خطای واسنجی و صحت‌سنجی در مدل‌های اقلیمی و مدل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی WEAP سد زربنه رود از معیارهای عملکرد نش‌ساختکلیف (NS)، شاخص اریب (Bias) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید که این معیارها با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_P - \sigma_O} \right]^2 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در روابط فوق، O_i داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های برآوردشده، \bar{O} و \bar{P} میانگین داده‌های مشاهداتی و برآوردشده، σ واریانس و n تعداد سال‌های آماری می‌باشد. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین صفر تا ۱ است، هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه می‌باشد. شاخص NS هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بیش‌تری برخوردار خواهد بود و دامنه آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ می‌باشد. BIAS هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در برآورد متغیر موردنظر می‌باشد. در صورتی که مقدار این پارامتر به سمت مثبت میل کند، نشان‌دهنده این است که متغیر موردبررسی بسیار کم‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است. اگر این پارامتر به سمت منفی میل کند، نشان می‌دهد که پارامتر موردبررسی مقدار متغیر را بسیار بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است. قابل ذکر است که برای این پارامتر آستانه خاصی در نظر گرفته نشده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نتایج واسنجی، اعتبارسنجی و شبیه‌سازی مدل WEAP

برای بالابردن دقت و کاهش خطای شبیه‌سازی، مدل شبیه‌سازی شده مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت (شکل ۴). به منظور برآورد میزان خطای واسنجی و صحت‌سنجی، مقادیر متوسط آبدهی سالانه محاسباتی توسط مدل با مقادیر مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری نظام آباد (شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی) به کمک شاخص‌های (NS)، (Bias) و R^2 مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۲). با توجه به نتایج ارائه‌شده در مطالعات گذشته در ارتباط با شاخص Bias و NS و مقایسه آن با پژوهش حاضر، می‌توان گفت که نتایج ارائه‌شده از واسنجی و صحت‌سنجی مدل WEAP قابل قبول می‌باشند.

Table 2. Calibration and validation results of the WEAP at the Nazam abad station

	Calibration (1983-2019)	Validation (2019-2021)
NS	0.86	0.78
R^2	0.81	0.75

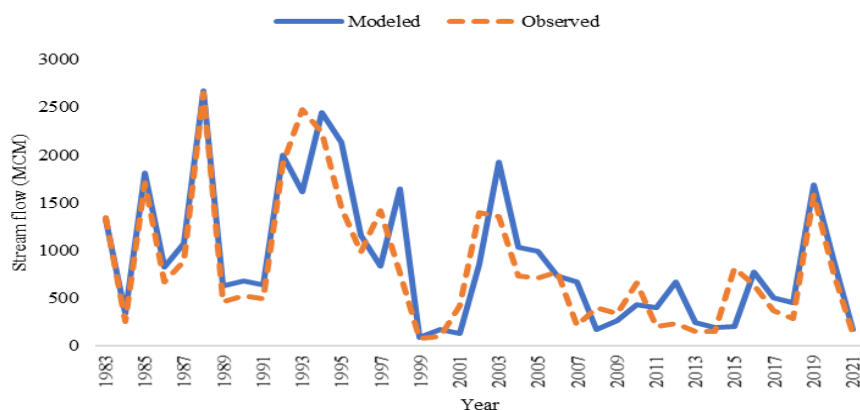


Figure 4. Comparison between simulated streamflow by WEAP and observed data

در ادامه نتایج شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه (جدول ۳) که در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۳ نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی در محدوده مطالعاتی در طول دوره آماری به صورت کامل تأمین نمی‌شود. به عنوان مثال، در بخش کشاورزی به جز فصل بهار در مابقی فصول کمبود منابع آب در جهت تأمین نیازهای کشاورزی کاملاً مشهود است. در ماه Oct و Nov به دلیل کاهش رواناب ورودی به مخزن و کاهش حجم ذخیره آب سد، تأمین نیازهای پایین دست با مشکل مواجه است. همچنین نتایج جدول (۳) نشان داد صنعت آبی پروی پایین دست سد زرینه‌رود در ماه Oct و Nov با کمبود شدید منابع آب روبه‌رو است. در مجموع نتایج نشان می‌دهد که در وضعیت موجود اغلب نیازهای پایین دست بخصوص در فصول تابستان و پاییز با کمبود منابع آب سطحی مواجه می‌باشند.

Table 3. Coverage of fulfilling demands (Percentage) in different months under current conditions

Demand Site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Agriculture	84.02	89.89	98.24	100.00	99.90	95.66	92.92	71.41	71.48	42.03	100.00	81.90
Tabriz_Dom	81.56	90.85	100.00	100.00	100.00	97.41	94.67	79.93	47.30	22.78	49.61	72.28
Saghez_Dom	81.61	90.89	100.00	100.00	100.00	97.42	94.67	79.95	47.35	22.85	49.67	72.34
Miandoab_Dom	81.59	90.87	100.00	100.00	100.00	97.41	94.67	79.94	47.33	22.82	49.64	72.31
Fishing industry	51.22	69.82	99.45	100.00	100.00	94.87	91.86	65.55	45.60	46.90	45.90	43.90
Environmental	81.20	90.60	100.00	100.00	100.00	96.10	91.60	69.10	34.60	15.20	48.40	71.90

۲.۳. نتایج بهینه‌سازی افزایش ارتفاع سد زرینه‌رود

محدوده مقادیر پارامترهای استفاده شده برای IWO در جدول (۴) گزارش شده‌اند نتایج مدل بهینه‌سازی IWO-WEAP نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه سد زرینه‌رود برابر با ۶/۳ متر می‌باشد. حجم جدید مخزن سد با لحاظ کردن افزایش ارتفاع نیز برابر با ۹۱۳/۴۰ میلیون مترمکعب برآورد گردید. محاسبه مقدار درآمد حاصل از اجرای پروژه نیز مطابق با شکل (۵) برابر ۸۳/۸۳ میلیارد تومان برآورد گردید.

Table 4. Values of parameters for the IWO algorithm

Parameter	iter _{max}	iter	P _{initial}	P _{max}	NoS _{max}	N	σ _{initial}	σ _{final}
value	200	70	5	10	0-5	2	0.05	0.001

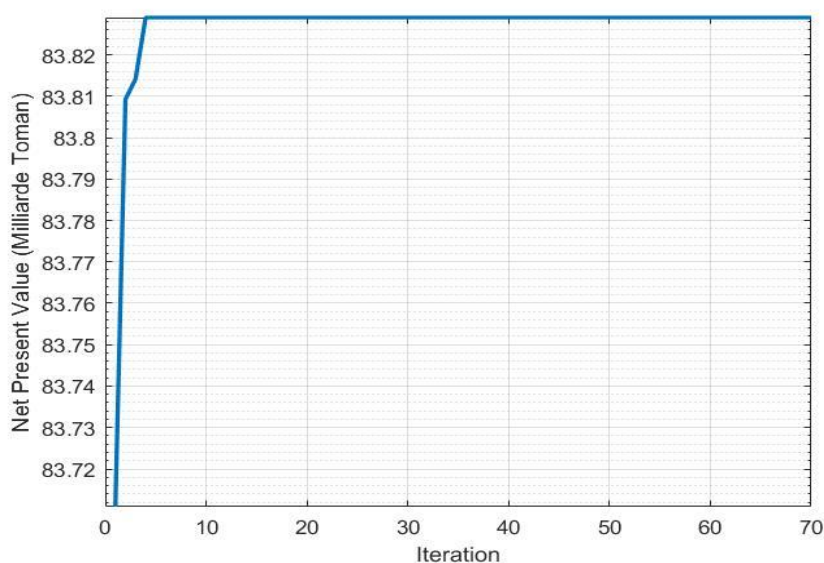


Figure 5. NPV value after calculating the optimal increase in Zarrinehroud dam height

با لحاظ نمودن حجم جدید در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدوده و شاخص اطمینان پذیری سیستم تأمین آب در محدوده مطالعاتی مطابق با جدول های (۵) و (۶) می باشد.

Table 5. Percentage coverage of downstream demands in various months with dam height increase

Demand Site	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Agriculture	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.82	91.25	88.18	83.15	75.02
Tabriz_Dom	100.00	100.00	100.00	99.29	96.00	93.91	93.04	88.29	86.98	82.96	72.53	69.86
Saghez_Dom	100.00	100.00	100.00	99.30	96.00	93.92	93.07	88.31	86.99	82.98	72.55	69.90
Miandoab_Dom	100.00	100.00	100.00	99.29	96.00	93.91	93.04	88.29	86.98	82.96	72.53	69.86
Fishing industry	100.00	100.00	100.00	99.30	96.00	93.92	93.07	88.31	86.99	82.98	72.55	69.90
Environmental	100.00	100.00	100.00	99.29	96.00	93.91	93.04	88.29	86.98	82.96	72.53	69.86

Table 6. Reliability index (Percentage) for fulfilling demands with dam height increase

Demand	The reliability index (Percent) without an increase in reservoir height	"The reliability index (Percent) with an increase in reservoir height."	Percent increase
Agriculture	85.62	94.70	+10.61
Tabriz_Dom	75.43	92.31	+22.38
Saghez_Dom	90.60	96.15	+6.13
Miandoab_Dom	75.43	92.31	+22.38
Fishing industry	75.43	92.31	+22.38
Environmental	75.00	92.00	+22.67

مقایسه نتایج بعد از افزایش ارتفاع و در نتیجه آن افزایش ذخیره مخزن سد، نشان می دهد که شاخص اطمینان پذیری به طور متوسط ۱۷/۷۶ درصد افزایش داشته است. مقایسه نتایج شاخص اطمینان پذیری قبل از افزایش ارتفاع و پس از افزایش ارتفاع نشان از افزایش ۱۰/۶۱ درصدی در شاخص اطمینان پذیری در بخش کشاورزی دارد. همچنین مقایسه نتایج در بخش آبیاری پروری افزایش ۲۳/۳۸ درصدی را نشان می دهد.

۳.۳. تحلیل حساسیت افزایش ارتفاع سد

به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهایی همچون قیمت محصولات کشاورزی و نیز هزینه های اجرایی طرح، در این پژوهش سعی گردید تحلیل حساسیتی بر روی این دو پارامتر به کمک مدل بهینه سازی WEAP-IWO انجام گیرد. به این صورت که در سه حالت نخست افزایش ۱۰-۲۰ و ۳۰ درصدی هزینه های ساخت، و در ادامه افزایش ۱۰-۲۰ و ۳۰ درصدی قیمت محصولات کشاورزی مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای فوق در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش هزینه های ساخت، به دلیل این که مدل توجیه اقتصادی داشته باشد، افزایش ارتفاع بهینه سد روند کاهشی داشته است و همچنین با افزایش میزان قیمت محصولات کشاورزی در محدوده مطالعاتی، ارتفاع بهینه سد نیز روندی افزایشی داشته است.

در نهایت پس از انجام تحلیل حساسیت، نتایج شاخص اطمینان پذیری و درصد پوشش نیازهای محدوده توسط مدل WEAP برای حالت های A1-A3 و B1-B3 استخراج گردید. نتایج نشان داد تغییرات ارتفاع بهینه سد حاصل از تحلیل حساسیت (شکل ۶) بر درصد پوشش نیازها و شاخص اطمینان پذیری نیازها تأثیر چشم گیری ندارد.

۴.۳. ارزیابی دما، بارش و رواناب دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۲)

نتایج وزن دهی و صحت سنجی مدل ها برای ایستگاه زرينه رود در جدول (۷) ذکر شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در مجموع مشخص شد که مدل اقلیمی EC-EARTH در بین سه مدل موجود، با رتبه ۲/۷۵ دارای بالاترین مقدار رتبه بندی می باشد و به عنوان بهترین مدل در این پژوهش انتخاب می گردد.

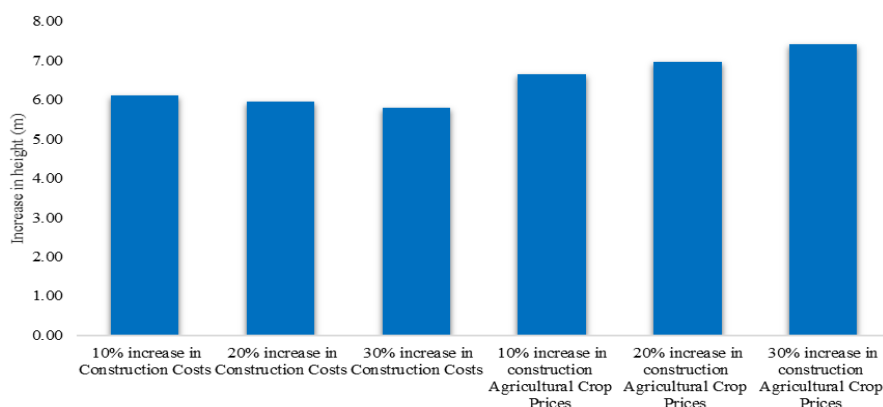


Figure 6. Sensitivity analysis of Zarrinehroud dam height increase

Table 7. Selection of the superior climate change model by comparing precipitation estimates with historical Data from the Zarrinehroud station (1983-2014)

AOGCM	WPG	R ²	Bias	NSE	Rank				Overall Rank
					R ²	Bias	NSE	WPG	
HadGEM2-ES	0.17	0.36	-0.98	-2.19	1	1	1	1	1
CSIRO-MK3-6-0	0.30	0.62	-0.01	0.45	2	3	2	2	2.25
EC-EARTH	0.53	0.69	0.19	0.67	3	2	3	3	2.75

بررسی نتایج میانگین ماهانه دمای حداقل در دوره پایه و دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) نشان می‌دهد که مقدار دمای حداقل در دوره آتی نسبت به دوره پایه در مدل EC-EARTH پیش‌بینی اقلیمی تحت هر سه سناریوی انتشار افزایش داشته است. همچنین میانگین سالانه دمای حداقل نشان داد که در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5، حداکثر ۱/۳ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی SSP1-2.6، ۱/۱ درجه سانتی‌گراد، دمای حداقل محدوده در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت (شکل ۷).

همچنین نتایج نشان می‌دهد در فصل بهار بیش‌ترین افزایش دمای حداقل را خواهیم داشت. میانگین ماهانه دمای حداکثر در تمامی ماه‌ها روند افزایشی داشته و نیز سناریوی انتشار SSP5-8.5 بیش‌تر افزایش دما را نشان می‌دهد. در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5، حداکثر ۱/۲ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی SSP1-2.6، ۰/۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمای حداکثر محدوده در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت. به‌طور کلی این نتایج نشان از گرم‌تر شدن محدوده مورد مطالعه در دوره آتی دارد. از مقایسه نتایج دمای حداقل و حداکثر انتظار می‌رود دمای حداقل افزایش بیش‌تری نسبت به دمای حداکثر در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه داشته باشد.

نتایج تغییرات بارش حاصل از مدل اقلیمی EC-EARTH به‌صورت میانگین ماهانه در دوره پایه و دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نشان داد که مقدار میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده برای دوره آتی نسبت به دوره پایه، روند مشخص افزایشی یا کاهش‌ی ندارد و در برخی ماه‌ها افزایش بارش (فصل پاییز) و در برخی کاهش بارش (فصل بهار) را در دوره آتی خواهیم داشت. اما در مجموع سالانه، پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی نشان از کاهش میزان بارش در محدوده مطالعاتی را دارد. همچنین نتایج نشان داد در مدل اقلیمی EC-EARTH، سناریوی انتشار SSP5-8.5 بیش‌ترین کاهش بارندگی و سناریوی انتشار SSP1-2.6 کم‌ترین کاهش بارندگی را به‌ترتیب با مقادیر ۳۷/۷ و ۶/۶ میلی‌متر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مدل‌های GCMs و نرم‌افزار LARS-WG به‌عنوان یک مولد آب‌وهوایی عملکرد خوبی در پیش‌بینی دما ماهانه و سالانه در ایران از خود نشان دادند در صورتی‌که بخش عمده مدل‌های GCMs عملکرد ضعیفی برای پیش‌بینی بارش دارند (Abbasian et al., 2018).

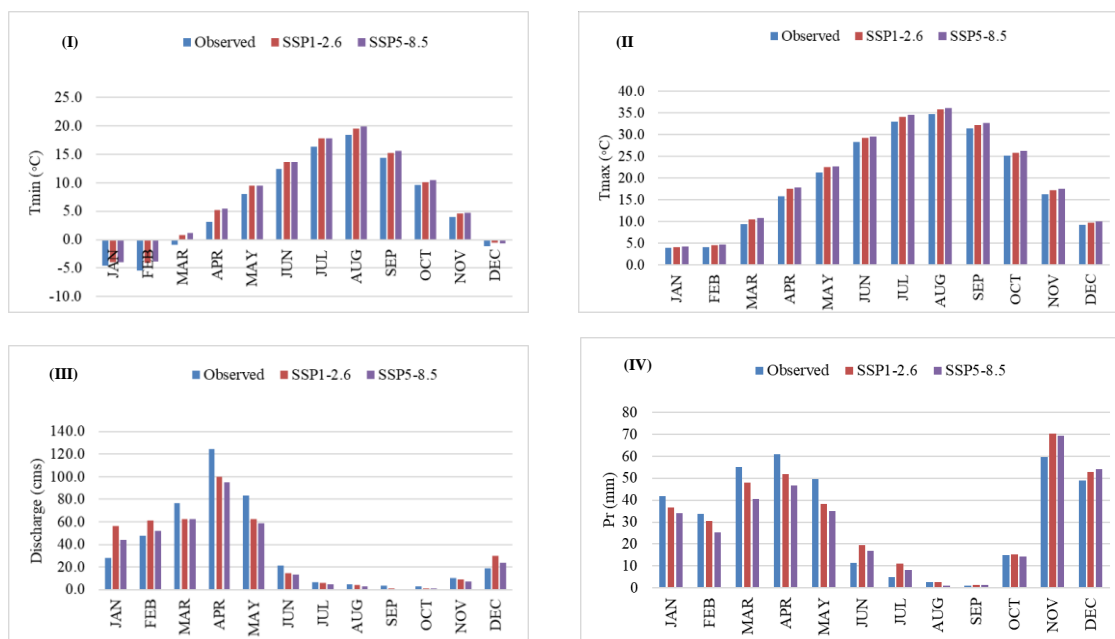


Figure 7. (I) Comparison of monthly average minimum temperature (Tmin), (II) maximum temperature (Tmax), (III) precipitation (Pr), and (IV) streamflow (Q) between the base period and future period as simulated by EC-EARTH model under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

از آنجاکه در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوزه امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار، با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی، پیش‌بینی قابل‌قبولی از رواناب سطحی ارائه نماید، ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو، به منظور بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم، از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. در این مطالعه، سطح زیر کشت ثابت، قیمت تضمینی فروش محصولات کشاورزی ادامه روند حاضر و متغیرهای بارش، دمای حداقل و حداکثر براساس نتایج مدل‌سازی تغییر اقلیم در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زرينه‌رود نسبت به دوره پایه می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که سناریوی SSP1-2.6 و سناریوی SSP5-8.5 مدل EC-EARTH به ترتیب بیش‌ترین (۳/۹۹ مترمکعب بر ثانیه) و کم‌ترین (۳۰/۴۰ مترمکعب بر ثانیه) میزان متوسط رواناب سالانه را برای دوره آتی پیش‌بینی نموده‌اند.

۵.۳. ارزیابی مدل WEAP در دوره آتی با افزایش ارتفاع سد زرينه‌رود

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی رواناب سناریوی SSP1-2.6 مدل اقلیمی EC-EARTH و سناریوی SSP5-8.5 مدل EC-EARTH به ترتیب به عنوان سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) در دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۰ به عنوان رواناب ورودی به سد زرينه‌رود در نظر گرفته شد تا مدیریت و تخصیص مصارف در محدوده سد زرينه‌رود با حجم بهینه ۹۱۳/۴ میلیون مترمکعب تحت تأثیر سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۰ مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. نتایج جدول‌های (۸) و (۱۰) نشان می‌دهد که در دوره آتی در هر دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه کمبود منابع آبی برای تأمین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود کاهش می‌یابد و عدم تأمین نیاز کشاورزی محدوده در طول دوره آتی کاملاً مشهود می‌باشد. این موضوع در سناریو بدبینانه به مراتب بدتر می‌باشد.

Table 8. Coverage of fulfilling downstream demands (Percentage) under the climate scenario SSP1-2.6 with increase in height (Optimistic Scenario)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Agriculture	83.20	88.00	95.10	97.00	92.00	90.60	87.50	82.40	75.70	53.40	97.00	81.80
Tabriz_Dom	79.10	87.90	97.00	97.00	95.40	91.10	88.90	79.10	63.10	37.20	49.70	69.70
Saghez_Dom	79.20	88.00	97.00	97.00	95.40	91.10	88.90	79.10	63.10	37.20	49.70	69.70
Miandoab_Dom	79.10	87.90	97.00	97.00	95.40	91.10	88.90	79.10	63.10	37.20	49.70	69.70
Fishing industry	71.30	78.10	96.30	97.00	94.00	89.50	84.60	77.10	59.30	51.50	56.80	51.20
Environmental	79.10	87.90	97.00	97.00	95.40	91.10	88.90	79.10	63.10	37.20	49.70	69.70

درصد پوشش نیازهای محدوده طی ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که در دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه به نسبت شرایط موجود با کاهش مواجه هستیم که این موضوع در ماه‌های July تا October که ماه‌های آبیگری سد است، کاملاً مشخص می‌باشد. کاهش رواناب رودخانه زربنده رود علاوه بر بخش کشاورزی، تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه را نیز با مشکل مواجه می‌کند که این امر می‌تواند اکوسیستم رودخانه را با چالش مواجه کند. نتایج جدول‌های (۹) و (۱۱) کاهش شاخص اطمینان‌پذیری در بخش کشاورزی در سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 را طی دوره آبی حتی با افزایش ارتفاع سد را نشان می‌دهد. به طوری که، در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه به نسبت شرایط موجود به ترتیب ۱۳/۴۲ و ۱۸/۲۰ درصد کاهش پوشش نیازهای محدوده مطالعاتی را خواهیم داشت. از طرفی، نتایج شاخص اطمینان‌پذیری نشان داد که در بخش کشاورزی در سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۱۵/۵۳ و ۲۰/۲۴ درصد کمبود وجود خواهد داشت. به طور کلی، با ارائه نتایج شبیه‌سازی دوره آبی در این بخش مشخص گردید که تغییرات اقلیمی در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه می‌تواند اثرات مخربی بر بخش کشاورزی و محیط زیست منطقه داشته باشد. لذا افزایش ارتفاع سد به منظور مقابله با اثرات تغییر اقلیم امری ضروری به نظر می‌رسد.

Table 9. Reliability index of fulfilling downstream demands under the climate scenario SSP1-2.6 with increase in height (Optimistic Scenario)

Demand	Rel (Precent)
Agriculture	85.31
Tabriz_Dom	77.93
Saghez_Dom	77.95
Miandoab_Dom	77.93
Fishing industry	75.75
Environmental	77.93

Table 10. Coverage of fulfilling downstream demands (Percentage) under the climate change scenario SSP5-8.5 with increase in height (Pessimistic Scenario)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Agriculture	78.90	83.40	90.20	92.00	87.20	85.90	83.00	78.10	71.80	50.60	92.00	77.60
Tabriz_Dom	75.00	83.40	92.00	92.00	90.40	86.40	84.40	75.00	59.80	35.30	47.10	66.10
Saghez_Dom	75.10	83.40	92.00	92.00	90.40	86.40	84.40	75.00	59.90	35.30	47.10	66.10
Miandoab_Dom	75.00	83.40	92.00	92.00	90.40	86.40	84.40	75.00	59.90	35.30	47.10	66.10
Fishing industry	68.70	69.23	95.30	95.60	89.10	85.30	82.20	73.10	46.70	40.40	45.40	49.10
Environmental	75.00	83.40	92.00	92.00	90.40	86.40	84.40	75.00	59.80	35.30	47.10	66.10

Table 11. Reliability index of fulfilling downstream demands under the climate scenario SSP5-8.5 with increase in height (Pessimistic Scenario)

Demand	Rel (Precent)
Agriculture	80.89
Tabriz_Dom	73.91
Saghez_Dom	73.93
Miandoab_Dom	73.92
Fishing industry	70.01
Environmental	73.91

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف محاسبه افزایش ارتفاع بهینه سد زربینه‌رود به کمک الگوریتم بهینه‌سازی IWO-WEAP انجام شد. از این‌رو، ابتدا شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی به کمک نرم‌افزار WEAP صورت گرفت. پس از کالیبراسیون مدل WEAP، الگوریتم IWO بهینه‌سازی به منظور محاسبه ارتفاع بهینه سد استفاده شد. در نهایت با محاسبه حجم جدید مخزن، مدل WEAP مجدداً اجرا شد و نتایج شاخص اطمینان‌پذیری و درصد پوشش نیازهای محدوده مطالعاتی استخراج گردید. نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار WEAP نشان داد، در طول دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۳ با توجه به حجم ذخیره مخزن نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی در محدوده مطالعاتی به صورت کامل تأمین نمی‌شود و با کمبود مواجه است. هم‌چنین نتایج مدل بهینه‌سازی IWO-WEAP نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه سد زربینه‌رود برابر با $6/3$ متر می‌باشد و حجم جدید مخزن سد با لحاظ نمودن افزایش ارتفاع نیز برابر با $913/4$ میلیون مترمکعب برآورد گردید. با لحاظ نمودن حجم جدید در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدود و شاخص اطمینان‌پذیری سیستم تأمین آب در محدوده مطالعاتی نشان داد که درصد پوشش نیازها و شاخص اطمینان‌پذیری افزایش چشم‌گیری نسبت به شرایط قبل داشته است. نتایج تحلیل حساسیت دو پارامتر افزایش هزینه‌های ساخت و افزایش قیمت محصولات نشان داد با افزایش هزینه‌های ساخت، به دلیل این که مدل توجیه اقتصادی داشته باشد، افزایش ارتفاع بهینه سد روند کاهشی داشته است و با افزایش میزان قیمت محصولات کشاورزی در محدوده مطالعاتی، ارتفاع بهینه سد نیز روندی افزایشی داشته است.

هم‌چنین نتایج ارزیابی تغییر اقلیم نشان داد میانگین سالانه دمای حداقل در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5، حداکثر $1/3$ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی SSP1-2.6، $1/1$ درجه سانتی‌گراد، در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت. هم‌چنین میانگین ماهانه دمای حداکثر در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5، حداکثر $1/2$ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی SSP1-2.6، $0/90$ درجه سانتی‌گراد، در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت.

در مجموع سالانه، پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی نشان از کاهش میزان بارش در محدوده مطالعاتی را دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد در مدل اقلیمی EC-EARTH، سناریوی انتشار SSP5-8.5 بیش‌ترین کاهش بارندگی و سناریوی انتشار SSP1-2.6 کم‌ترین کاهش بارندگی را به ترتیب با مقادیر $37/7$ و $6/6$ میلی‌متر نشان می‌دهد. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زربینه‌رود نسبت به دوره پایه دارد. در ادامه نتایج نشان داد که در دوره آتی در هر دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه از منظر تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی برای تأمین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود در وضعیت بدتری قرار دارد. به طوری که، در هر دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه به نسبت شرایط موجود به ترتیب $13/42$ و $18/20$ درصد کاهش پوشش نیازهای محدوده مطالعاتی را خواهیم داشت. از طرفی، نتایج شاخص اطمینان‌پذیری نشان داد که در بخش کشاورزی در سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب $15/53$ و $20/24$ درصد کمبود وجود خواهد داشت.

به طور کلی، با ارائه نتایج شبیه‌سازی دوره آتی در این بخش مشخص گردید که تغییرات اقلیمی در هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه می‌تواند اثرات مخربی بر بخش کشاورزی و محیط زیست منطقه داشته باشد. لذا، افزایش ارتفاع سد به منظور مقابله با اثرات تغییر اقلیم امری ضروری به نظر می‌رسد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Roseires
2. Fariman
3. Songyue
4. Water Evaluation and Planning System
5. Colony
6. Nonlinear Modulation Index
7. Net Present Value (NPV)

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. مراجع

- Abushandi, E., & Merkel, B. (2013). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water resources management*, 27, 2391-2409.
- Abbasian, M., Moghim, S., & Abrishamchi, A. (2019). Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3), 1465-1483.
- Abera Abdi, D., & Ayenew, T. (2021). Evaluation of the WEAP model in simulating subbasin hydrology in the Central Rift Valley basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(1), 1-14.
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 297-320.
- Alrajoula, M. T., Al Zayed, I. S., Elagib, N. A., & Hamdi, M. R. (2016). Hydrological, socio-economic and reservoir alterations of Er Roseires Dam in Sudan. *Science of the Total Environment*, 566, 938-948.
- Banihabib, M. E., Najafi Marghmaleki, S., & Shabestari, M. H. (2019). An Integrated Water Resources Planning Model for Assessment and Prediction of Environmental Water Supplying Hawizeh Wetland from In Turkey, Iraq and Iran. *Iranian Water Researches Journal*, 13(1), 115-126 (In Persian).
- Gao, J., Christensen, P., & Li, W. (2017). Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China. *Journal of environmental management*, 198, 363-371.
- Haddad, R., Najafi Marghmaleki, S., Kardan Moghaddam, H., Mofidi, M., Mirzavand, M., & Javadi, S. (2023). Improving the management of agricultural water resources to provide Gavkhuni wetland ecological water right in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24.
- Jakeman, A. J., & Hornberger, G. M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water resources research*, 29(8), 2637-2649.
- Knoke, T., Gosling, E., & Paul, C. (2020). Use and misuse of the net present value in environmental studies. *Ecological Economics*, 174, 106664.
- Mehrabian, A. R., & Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weeds colonization. *Ecological informatics*, 1(4), 355-366.
- Mehta, V. K., Rheinheimer, D. E., Yates, D., Purkey, D. R., Viers, J. H., Young, C. A., & Mount, J. F. (2011). Potential impacts on hydrology and hydropower production under climate warming of the Sierra Nevada. *Journal of Water and Climate Change*, 2(1), 29-43.
- Omran, M. E., & Abbas, H. (1999). Strengthening, heightening and leakage control measures for an ancient Fariman dam in Iran. *In Proceedings of the 1998 symposium Rehabilitation of dams, ICOLD 66th annual meeting*. (pp. 139-149).
- Rajesh, K., & Pyne, S. (2021). Invasive weed optimization-based scheduling for digital microfluidic biochip operations. *Integration*, 76, pp.122-134.
- Schleiss, A. J., De Cesare, G., Franca, M. J., & Pfister, M. (Eds.). (2014). *Reservoir sedimentation*. CRC Press.

- Sha, J., Li, X., & Yang, J. (2021). Estimation of watershed hydrochemical responses to future climate changes based on CMIP6 scenarios in the Tianhe River (China). *Sustainability*, 13(18), p.10102.
- Water Consulting Engineers and Sustainable Development. (2013). Update studies of water resources balance study areas of Urmia Lake catchment area leading to the water year of 2009-2010. Zarrinehroud Study Area Water Balance Report. (In Persian).
- Xue, J., Gui, D., Lei, J., Sun, H., Zeng, F., & Feng, X. (2017). A hybrid Bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. *Advances in Water Resources*, 110, 445-458.
- Yihui, L. U., Shifa, X. I. A., Yuezhen, Y. U. E., & Jiahong, Z. H. A. N. G. (2008). Key technology for dam heightening of Songyue RCC dam. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(11), 1614-1619.