

## تعیین افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد مخزنی زرینه رود با استفاده از رویکرد شبیه سازی - بهینه سازی و

### ارزیابی عملکرد مخزن در شرایط تغییر اقلیم

امید نیرومند<sup>۱</sup>، مجتبی شوریان<sup>۲\*</sup>، مریم جوان صالحی<sup>۳</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران- ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران- ایران

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران- ایران

### چکیده

در این مطالعه، با استفاده از تلفیق الگوریتم بهینه سازی فراکاوشی تکثیر علف های مهاجم (IWO) و مدل شبیه سازی WEAP، میزان افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد مخزنی زرینه رود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل سازی محدوده مطالعه توسط مدل WEAP نشان داد در شرایط موجود نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست منطقه با کمبود مواجه اند. نتایج مدل شبیه سازی - بهینه سازی (WEAP-IWO) نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه اقتصادی سد زرینه رود برابر با ۶۳ متر می باشد. حجم جدید مخزن سد با لحاظ نمودن افزایش ارتفاع نیز برابر با ۹۱۳/۴ میلیون متر مکعب برآورد گردید. با در نظر گرفتن حجم جدید مخزن سد زرینه رود در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدوده و شاخص اطمینان پذیری سیستم تامین آب در محدوده مطالعاتی به طور متوسط افزایش ۱۷/۷۶ درصدی را نشان داد. در ادامه بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد زرینه رود در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) انجام گرفت. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زرینه رود نسبت به دوره پایه دارد. در ادامه نتایج نشان داد که در دوره آتی تحت سناریو SSP1-2.6 (خوشبینانه) و سناریو SSP5-8.5 (بدبینانه)، کمبود منابع آبی برای تامین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود در وضعیت بدتری قرار دارد. در هر دو سناریو 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 به منظور مقابله با اثرات تغییر اقلیم امری ضروری است.

## واژگان کلیدی: افزایش ارتفاع سد، تغییر اقلیم، الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO)، WEAP

### 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 به شمار 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 نیمه خشک دنیا و به تبع 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 به عنوان یکی از موثرترین 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 محققان 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<sup>۱</sup> در سودان (Alrajoula et al., 2016)، سد فریمان<sup>۲</sup> در ایران (Omran and Abbas, 1999) و سد سونگیو<sup>۳</sup> 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 محققان 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 موثرتر 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 به عنوان یک انتخاب مطلوب در تعیین راه‌حل‌های بهینه برای مسائل مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Rajesh and Pyne, 2021).

برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه نیز عبارتند از: Mehrabian and Lucas (2006) برای تعیین موقعیت بهینه محرک‌های پیزو الکتریک در فن‌های هوشمند از الگوریتم IWO استفاده نمودند. بطور 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 فراکاوشی تکثیر علف‌های هرز مهاجم (IWO)، بهینه‌سازی افزایش ارتفاع سد زرينه‌رود انجام شده است. این تلفیق امکان ارائه یک راهکار جامع و بهینه بمنظور بررسی میزان افزایش بهینه ارتفاع سد و بهره‌برداری از مخزن سد زرينه رود با هدف تامین بیشتر نیازهای پایین دست را فراهم کرده و باعث بهبود دقت و کارایی نتایج مطالعه می‌شود. در گام آخر این مطالعه، پس از توسعه مدل تلفیقی WEAP-IWO، تاثیرات تغییر اقلیم در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۲) 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 بر اساس گزارش ششم و برای پیش‌بینی رواناب حوضه از مدل IHACRES استفاده شد.

مدل LARS-WG یک مدل تولید داده‌های آب و هوا است که برای مطالعه تأثیرات تغییر اقلیم بر مناطق آب و هوایی مورد

---

<sup>1</sup> Roseires

<sup>2</sup> Fariman

<sup>3</sup> Songyue

استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس 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 به عنوان مرکز تحقیقاتی برای مطالعات آب و هوا واقع در انگلستان شناخته می‌شود. این مدل قادر است تا داده‌هایی مانند دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد را بر اساس داده‌های آماری از گذشته تولید کند، که می‌توان از آن‌ها برای مطالعه روندهای آب و هوایی در آینده و تحلیل تغییرات اقلیمی استفاده کرد. (Sha et al., 2021).

همچنین، مدل IHACRES یک مدل هیدرولوژیکی است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای 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 فرآیند نمودار واحد فوری و مبتنی بر اجزای رواناب" است. این مدل به طور 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).

به طور کلی، IHACRES یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز است که به محققان 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 زربینه رود یکی از مهم‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. این رودخانه از دامنه‌های شمالی کوه‌های چهل چشمه 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 زربینه رود 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

زرينه‌رود از شاخه‌های سقز، خورخوره چای و ساروق چای تشكيل شده و در محل يمين‌آباد به سد مخزني زرينه‌رود وارد مي‌شود.

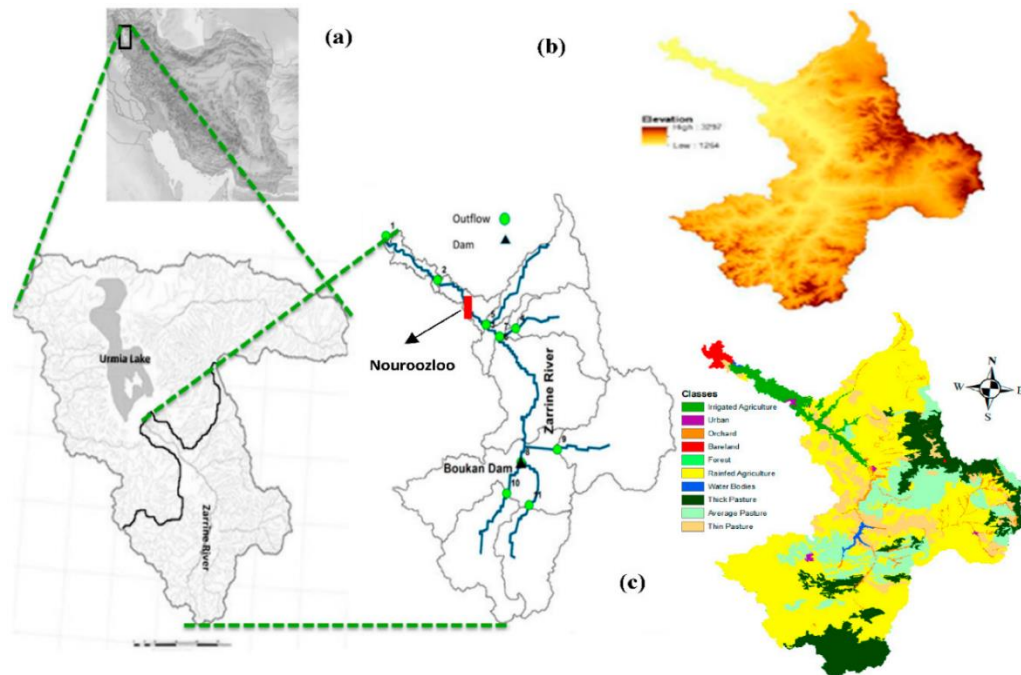


Figure 1. Location of the Zarrinehroud watershed, Lake Urmia, West Azerbaijan, Iran

عمده‌ترين منابع آب‌های سطحی دشت مياندوآب رودخانه‌های زرينه رود و سيمينه رود مي‌باشند. که پس از مشروب ساختن اراضي دشت مزبور به درياچه اروميه مي‌ريزد. دشت زرينه رود داراي وسعتی برابر ۸۵۰۰۰ هکتار مي‌باشد که ۲۰۰۰۰ هکتار آن، بدليل باتلاقی بودن و داشتن سطح تراز با سطح درياچه اروميه قابل استفاده نمی‌باشد. سد سنگ ريزه‌ای با هسته مرکزی رسی زرينه‌رود با حجم مخزن ۶۴۵ ميليون متر مکعب و ميزان آب تنظيمی ۷۵۰ ميليون متر مکعب در سال بروی رودخانه زرينه‌رود در استان کردستان با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۲ دقيقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۶ دقيقه عرض شمالی در ۸۵ كيلومتری جنوب شرقی شهرستان مياندوآب و در شرق شهرستان بوکان احداث گردیده است. بند انحرافی نوروژلو در ۷۰ كيلومتری پائين دست سد مخزني زرينه‌رود احداث شده و بدین ترتيب بند انحرافی و شبکه آبياری در استان آذربايجان غربی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲- روش تحقيق

شکل (۲) چارچوب و داده‌های مورد استفاده پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

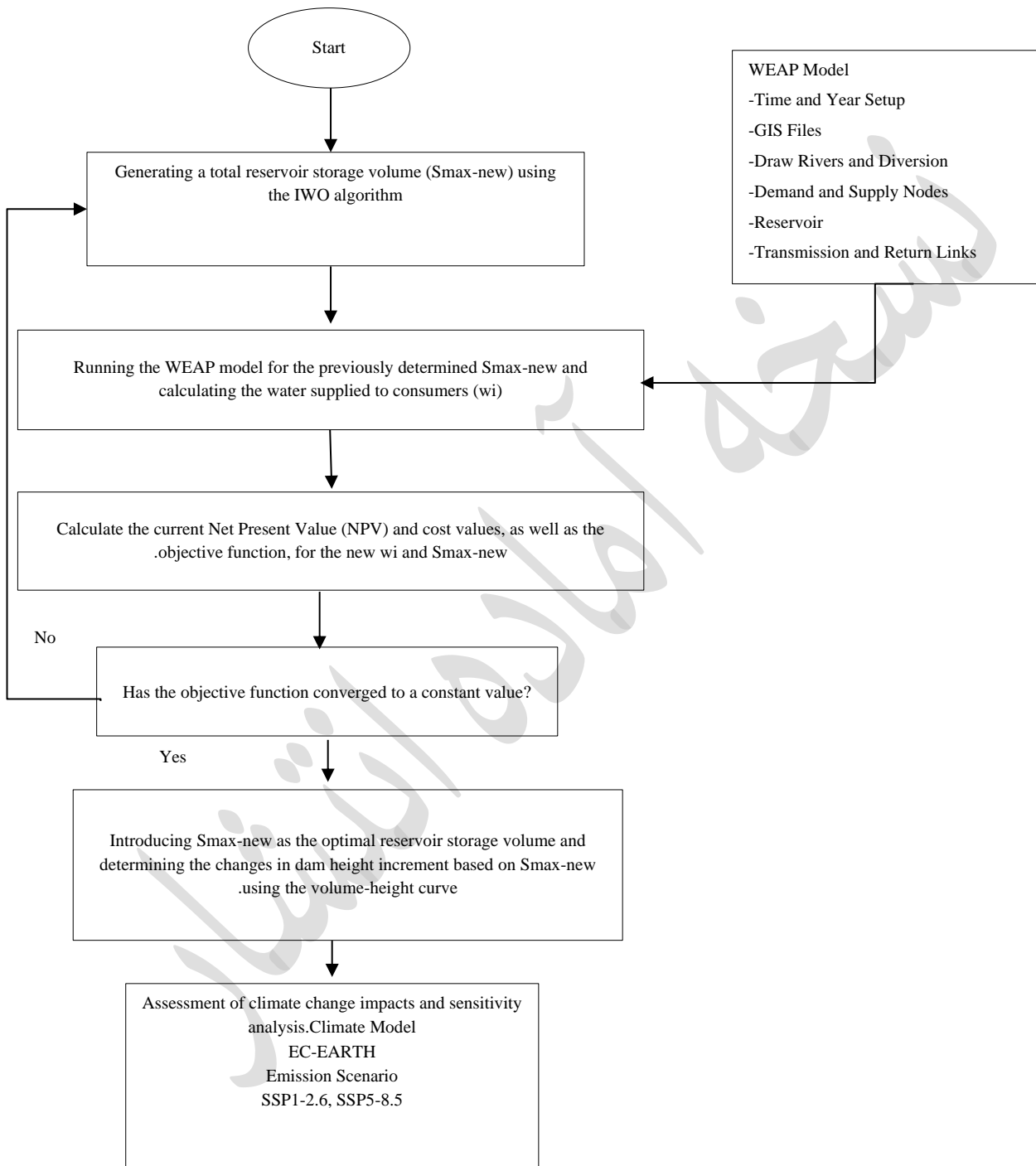


Figure 2. The workflow of the methodology steps

در این مطالعه، ابتدا میزان نیاز آبی در بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه شامل بخش کشاورزی، شرب، صنعت و

زیست محیطی از آب منطقه ای استان دریافت شد (مطالعات کشاورزی دریاچه ارومیه، ۱۳۹۰). پس از مشخص شدن نیازهای بخش های مختلف، مدل سازی تخصیص منابع آب با استفاده از مدل WEAP<sup>1</sup> در وضعیت موجود انجام شد.

سد زرینه رود به منظور افزایش رهاسازی و افزایش تامین حق آبه در پایین دست قابلیت افزایش ارتفاع تا ۱۰ متر را دارد. در اثر افزایش ارتفاع سد و به تبع افزایش ذخیره مخزن، میزان آب ذخیره شده در مخزن سد افزایش می یابد، لذا رهاسازی از سد افزایش می یابد و آب بیشتری در پایین دست در دسترس خواهد بود و درآمد ذینفعان افزایش می یابد. همچنین افزایش ارتفاع سد، افزایش هزینه ساخت را به دنبال دارد.

از این رو در این پژوهش به کمک الگوریتم بهینه سازی IWO و مدل شبیه ساز WEAP به دنبال پاسخ به سوال افزایش ارتفاع سد چند متر باشد تا توجیه اقتصادی داشته باشد، هستیم. از این رو پس از ساخت و کالیبراسیون مدل WEAP، به کد نویسی الگوریتم IWO به منظور محاسبه افزایش ارتفاع بهینه سد و سپس محاسبه سود خالص از افزایش ارتفاع سد می پردازیم. در نهایت به منظور شناسایی شرایط هیدرولوژیکی منطقه و پیش بینی آن در آینده و برنامه ریزی منابع آب در دسترس، ضروری است که درک صحیحی از تغییرات آب و هوایی 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 مدل های گردش عمومی (GCM) به عنوان ابزارهای موثر و به روز برای پیش بینی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در سطح جهانی استفاده شده است. به این ترتیب، پیش بینی 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 می توانند 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 چالش هایی که از تغییرات اقلیمی ناشی می شوند، آماده باشیم.

---

<sup>1</sup> Water Evaluation and Planning System

## WEAP مدل ۱-۲-۲

مدل WEAP توسط موسسه محیط زیست استکهلم (SEI) توسعه یافته است. WEAP بصورت یک ابزار پیش‌بینی، نیاز آبی، جریان‌ها و مقدار ذخیره، گسترش آلودگی و آبدهی را شبیه‌سازی می‌کند (Gao et al., 2017). این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی طیف وسیعی از مولفه‌های طبیعی و ساخته شده این سیستم‌ها از قبیل رواناب، دبی پایه، تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی، تحلیل نیازها، ذخیره آب، حقابه‌ها و اولویت‌های تخصیص، بهره‌برداری از مخزن، تولید برقابی، 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 سیاست‌ها است (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 زرینه رود پیکربندی سیستم تهیه شد (شکل ۳). در شکل زیر محصولات کشاورزی گندم (WWHT)، یونجه (ALFA)، سیب (APPLE)، جو (BARELY)، سیب زمینی (POTATO)، چغندر (SGBT) و گوجه (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.

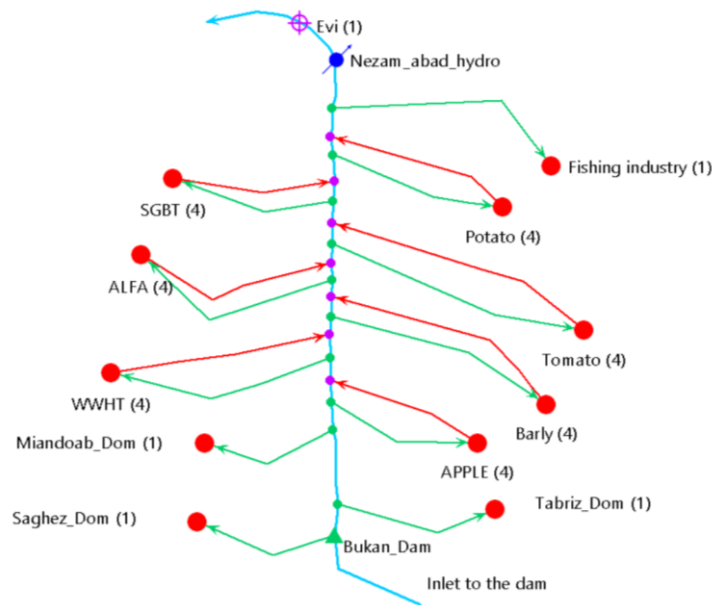


Figure 3. Configuration of Zarrinehroud river in the WEAP



برای شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه‌آبریز پایین دست سد زرینه رود لازم است که اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری، میزان آب ورودی به مخزن سد، میزان نیاز شرب، صنعت و کشاورزی، نیاز زیست محیطی و سایر موارد جمع‌آوری گردد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2013). حوضه‌آبریز پایین دست سد زرینه رود، شامل ۲ محدوده مطالعاتی صائین قلعه و میان‌دوآب می‌باشد. مقادیر نیاز سالانه کشاورزی، راندمان، درصد تامین از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر اساس آمار ارائه شده در گزارش مطالعات کشاورزی حوضه آبریز زرینه رود و همچنین بر اساس آمار و اطلاعات دریافتی مقادیر نیاز شرب و صنعت در حوضه‌آبریز پایین دست سد زرینه رود 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 <sup>3</sup> /ha)	Annual requirement (MCM)	Irrigation efficiency
Saghez Domestic	-	-	40	-
Tabriz Domestic	-	-	314	-
Miandoab Domestic	-	-	115	-
Fishing Industry	-	-	140	-
Agriculture	6124	11918	730	49
Environmental	-	-	126	-

لازم به ذکر است که، آب برگشتی برای مدل سازی محدوده مورد نظر برای بخش های کشاورزی بر اساس راندمان ۴۹ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین، طبق گزارشات محدوده زرینه رود، پرورش ماهی در این محدوده به صورت سرد آبی است که طبق گزارشات آب برگشتی تصفیه و مجددا در استخر های پرورش ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو شهر تبریز و میان‌دوآب نیز سیستم تصفیه فاضلاب داشته و با توجه به قرار گرفتن در خارج از حوضه زرینه رود آب برگشتی آن‌ها به رودخانه زرینه رود باز نمی‌گردد. لذا برای بخش های مذکور جریان آب برگشتی در نظر گرفته نشده است.

دوره شبیه‌سازی از سال (۲۰۲۱-۱۹۸۳) در نظر گرفته شد و مقادیر منابع و مصارف (شبکه‌های آبیاری و زهکشی زرینه رود، 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 زربینه رود 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 زربینه رود به عنوان 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 شده‌است. نحوه گرد آمدن 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 آسیب رساندن 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 علی‌رغم 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 مساله، متغیرهای تصمیم هستند. مجموعه‌ای از چند گیاه تشکیل یک دسته<sup>۱</sup> 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

<sup>۱</sup> Colony

دانه‌های تولید شده،  $f$  سازگاری علف هرز فعلی،  $f_{max}$  و  $f_{min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل سازگاری از جمعیت فعلی می‌باشد. عمل تولید دانه به صورت خطی انجام می‌شود.

$$Seed_n = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad (1)$$

### پراکنندگی فضایی

در این مرحله دانه‌های تولید شده به طور تصادفی در فضای چند بعدی 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.

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (2)$$

که در آن،  $\sigma_{iter}$ : انحراف معیار تکرار جاری،  $iter_{max}$ : بیشینه تکرار (مراحل تولید نسل)،  $iter$ : شماره تکرار،  $\sigma_{initial}$ : انحراف معیار اولیه،  $\sigma_{final}$ : انحراف معیار نهایی و  $n$ : یک مدول غیرخطی (اندیس مدولاسیون غیرخطی)<sup>1</sup> است که به انتخاب کاربر می‌باشد. این روش بیان می‌کند که احتمال فرارگیری 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 مکانیزمی برای حذف دانه‌های ضعیف به کار گرفته می‌شود. هنگامی که بیشترین تعداد دانه‌های مجاز تولید شدند هر دانه می‌تواند با توجه به روش گفته شده 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 ماکزیمم بماند. این مراحل تکرار می‌شوند تا کم دانه‌ها به دانه بهینه همگرا شوند.

<sup>1</sup> Nonlinear Modulation Index

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 تحقیق ماکزیم نمودن ارزش خالص کنونی<sup>۱</sup> (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 (Knoke et al., 2020). لازم به ذکر است که متغیر تصمیم ماکزیمم حجم ذخیره جدید مخزن بعد از افزایش ارتفاع می‌باشد (S<sub>max</sub> - new).

$$\text{Objective - function} = \text{Max (NPV)} \quad (۳)$$

برای محاسبه NPV، ابتدا درآمدها و هزینه‌های مورد بررسی 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 به تبع افزایش ذخیره مخزن، میزان آب ذخیره شده در مخزن سد افزایش می‌یابد. لذا رهاسازی از سد افزایش یافته و در نتیجه آب بیشتری در پایین دست در دسترس کشاورزان قرار می‌گیرد که نتیجه آن افزایش عملکرد محصولات و افزایش درآمد کشاورزان می‌باشد. از این رو نحوه محاسبه درآمد ناشی از اجرای طرح به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$\text{Income}_j = \sum_{i=1}^7 A_i * Y_i * \text{Price}_i \quad (۴)$$

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

در رابطه (۴)، i شماره‌دهنده محصول، A مساحت هر محصول به هکتار، Y عملکرد هر محصول بر حسب کیلوگرم بر هکتار و Price قیمت فروش تضمینی هر محصول بر حسب ریال بر کیلوگرم و  $\text{Income}_j$  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

<sup>۱</sup> Net Present Value (NPV)

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 مورد نیاز هر محصول (ثابت) می‌باشد. با تغییر حجم ذخیره مخزن و به تبع 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.

$$Cost = (A_{new} - A_{initial}) * V \quad (7)$$

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 بر حسب 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 بر اساس رابطه (۹) و مفهوم ارزش خالص کنونی (Net Present Value) برای سال پایه تبدیل می‌گردد

$$Benefit = (Income_j - Income_{initial}) - Cost \quad (8)$$

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

$$NPV = \sum_{t=1}^j \frac{Benefit}{(1+k)^t} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $j$  شمارنده محصول و  $k$  نرخ بازگشت سرمایه است که در این مطالعه ۱۰ درصد (بر اساس 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 مساله ( $S_{max-new}$ ) اجرا می‌شود. فرآیند به این صورت است که ابتدا الگوریتم IWO یک مقدار  $S_{max-new}$  برای مساله مورد نظر تولید می‌کند. سپس این مقدار  $S_{max-new}$  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 مجدداً 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.

### ۲-۲-۳- تغییر اقلیم

در این پژوهش، جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، با در نظر گرفتن پارامترهای بارش و دما ماکزیمم و مینیمم به عنوان مهمترین پارامترهای اقلیمی، از خروجی 3 مدل AOGCM تحت دو سناریوی انتشار SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۲۱) و دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) مربوط به ششمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، استفاده شد. انتخاب مدل‌ها اقلیمی بر اساس مقایسه داده‌های تاریخی آن‌ها با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه سینوپتیک زرینه 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 بر اساس عملکرد خوب آن در شبیه‌سازی داده‌های تاریخی بارش (۱۹۸۶-۲۰۱۴) و مقایسه آن با داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک زرینه رود و همچنین با توجه به مقادیر ضرایب وزن دهی (WPG)،  $R^2$ ،  $NSE^1$  و BIAS به عنوان مدل برتر انتخاب گردید (Almazroui et al., 2020). برای GCM منتخب داده‌های بارش و دما به کمک نرم افزار LARS-WG تحت سه سناریو (SSP1-2.6 و SSP5-8.5) ریزمقیاس گردید. از آنجایی که مدل‌های گزارش ششم در نرم افزار 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 ضریبی به دست می‌آید که از آن برای ایجاد سناریو در نرم‌افزار LARS-WG و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گزارش

<sup>1</sup> Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

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 زرینه رود با خروجی مدل اقلیمی منتخب پیش‌بینی گردید.

### ۲-۳- معیارهای عملکردی

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

$$R^2 = \left[ \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s - \sigma_o} \right]^2 \quad (10)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

$$BIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (12)$$

در روابط فوق،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $P_i$  داده‌های برآورد شده،  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  میانگین داده‌های مشاهداتی و برآورد شده،  $\sigma$  واریانس و  $n$  تعداد سال‌های آماری می‌باشد.  $R^2$  بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است، هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده ارتباط قوی بین دو گروه می‌باشد. شاخص NS هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود و دامنه آن از منفی بینهایت تا ۱ می‌باشد. BIAS هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده دقت بالاتر مدل در برآورد متغیر مورد نظر می‌باشد. در صورتی که مقدار این پارامتر به سمت مثبت میل کند، نشان دهنده این است که متغیر مورد بررسی بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. اگر این پارامتر به سمت منفی میل کند، نشان می‌دهد که پارامتر مورد بررسی 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 بالا بردن دقت و کاهش خطای شبیه‌سازی، مدل شبیه‌سازی شده مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت (شکل ۴). به‌منظور 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 ارائه شده در مطالعات گذشته در ارتباط با شاخص Bias و NS و مقایسه آن با پژوهش حاضر، می‌توان گفت که نتایج ارائه شده 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

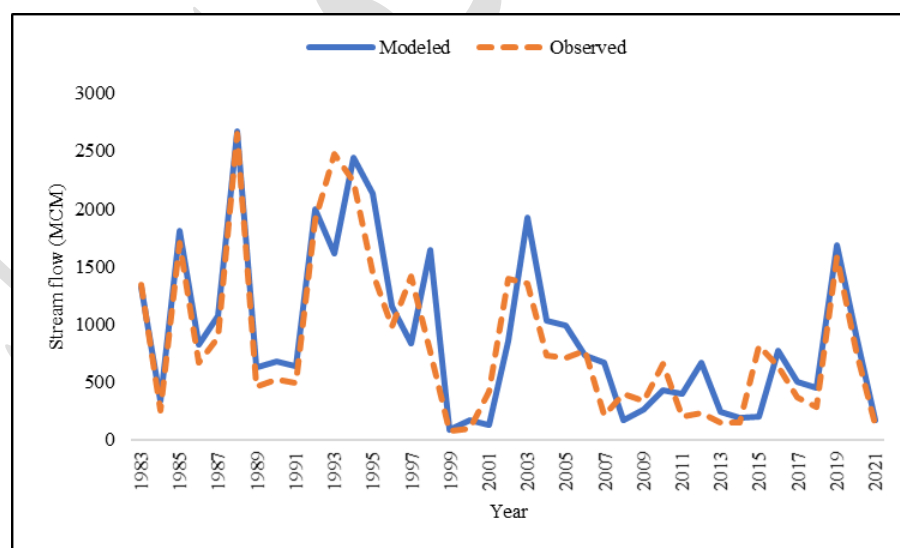


Figure 4. Comparison between simulated streamflow by WEAP and observed data

در ادامه نتایج شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه (جدول ۳) که در طول دوره آماری ۱۹۸۳-۲۰۲۱ نیاز شرب، صنعت،



کشاورزی و زیست‌محیطی در محدوده مطالعاتی در طول دوره آماری به صورت کامل تامین نمی‌شود. به عنوان مثال در بخش کشاورزی به جز فصل بهار در مابقی فصول کمبود منابع آب در جهت تامین نیازهای کشاورزی کاملاً مشهود است. در ماه Oct و Nov به دلیل کاهش رواناب ورودی به مخزن و کاهش حجم ذخیره آب سد، تامین نیازهای پایین دست با مشکل مواجه است. همچنین نتایج جدول (۳) نشان داد صنعت آبیاری پروی پایین دست سد زرینه رود در ماه Oct و Nov با کمبود شدید منابع آب رو به رو 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 مواجه‌اند.

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 زرینه رود

محدوده مقادیر پارامترهای استفاده شده برای IWO در جدول (۴) گزارش شده‌اند نتایج مدل بهینه‌سازی IWO-WEAP نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه سد زرینه رود برابر با  $\frac{6}{3}$  متر می‌باشد. حجم جدید مخزن سد با لحاظ نمودن افزایش ارتفاع نیز برابر با  $\frac{913}{40}$  میلیون متر مکعب برآورد گردید. محاسبه مقدار درآمد حاصل از اجرای پروژه نیز مطابق با شکل (۵) برابر  $\frac{83}{83}$  میلیارد تومان برآورد گردید.

Table 4. Values of parameters for the IWO algorithm

$\sigma_{final}$	$\sigma_{initial}$	n	NoS <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>initial</sub>	iter	iter <sub>max</sub>	Parameter value
0.001	0.05	2	0-5	10	5	70	200	

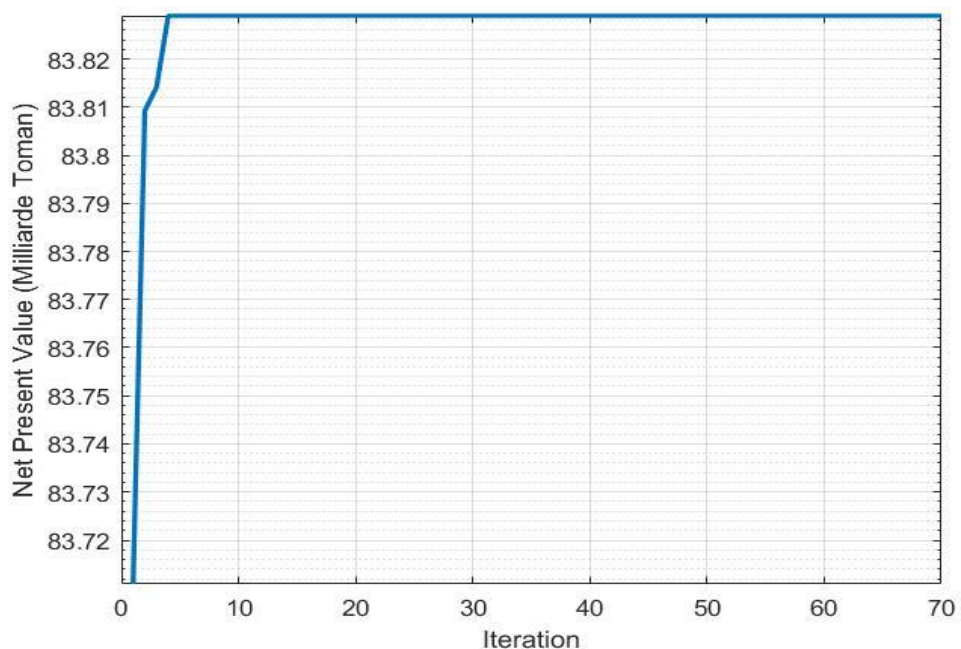


Figure 5. NPV value after calculating the optimal increase in Zarrinehroud dam height

با لحاظ نمودن حجم جدید در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدوده و شاخص اطمینان‌پذیری سیستم تامین آب در محدوده مطالعاتی مطابق با جدول (۵) و (۶) می‌باشد.

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	"The reliability index	Percent increase
	(Precent) without an increase in reservoir height	(Precent) with an increase in reservoir height."	
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 به تبع آن افزایش ذخیره مخزن سد، نشان می‌دهد که شاخص اطمینان پذیری به طور متوسط ۱۷/۷۶ درصد افزایش داشته است. مقایسه نتایج شاخص اطمینان‌پذیری قبل از افزایش ارتفاع و پس از افزایش ارتفاع نشان از افزایش ۱۰/۶۱ درصدی در شاخص اطمینان‌پذیری در بخش کشاورزی دارد. همچنین مقایسه نتایج در بخش آبی‌پرویی افزایش ۲۳/۳۸ درصدی را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- تحلیل حساسیت افزایش ارتفاع سد

به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهایی همچون قیمت محصولات کشاورزی و نیز هزینه‌های اجرایی طرح، در این تحقیق سعی گردید تحلیل حساسیتی بر روی این دو پارامتر به کمک مدل بهینه‌سازی WEAP-IWO انجام گیرد. به این صورت که در سه حالت نخست افزایش ۱۰-۲۰ و ۳۰ درصدی هزینه‌های ساخت، و در ادامه افزایش ۱۰-۲۰ و ۳۰ درصدی قیمت محصولات کشاورزی مد نظر قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای فوق در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش هزینه‌های ساخت، به دلیل اینکه 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 اطمینان‌پذیری و درصد پوشش نیازهای محدوده توسط مدل WEAP برای حالات 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 اطمینان‌پذیری نیازها تاثیر چشم‌گیری ندارد.

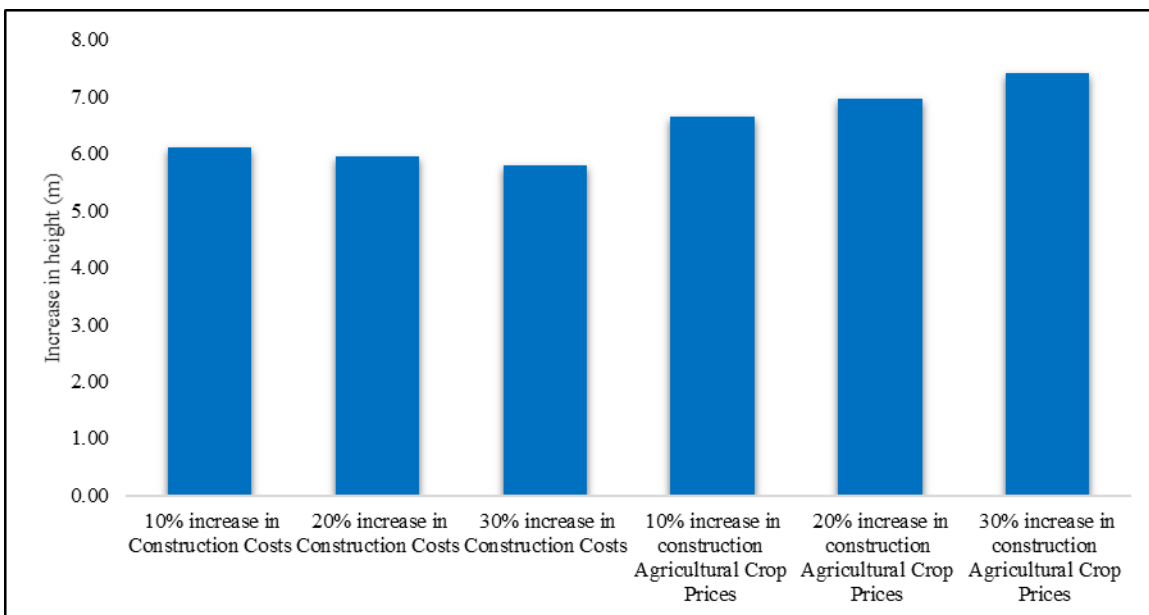


Figure 6. Sensitivity analysis of Zarrinehroud dam height increase

#### ۳-۴- ارزیابی دما، بارش و رواناب دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰)

نتایج وزن دهی و صحت سنجی مدل‌ها برای ایستگاه زرینه رود در جدول (۷) ذکر شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در مجموع مشخص شد که مدل اقلیمی EC-EARTH در بین ۳ مدل موجود، با رتبه ۲/۷۵ دارای بالاترین مقدار رتبه بندی می‌باشد و به عنوان بهترین مدل در این پژوهش انتخاب می‌گردد.

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 <sup>2</sup>	Bias	NSE	Rank				Overall Rank
					R <sup>2</sup>	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 سناریو انتشار افزایش داشته است. همچنین

میانگین سالانه دمای حداقل نشان داد که در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریو انتشار SSP5-8.5، حداکثر ۱/۳ درجه سانتیگراد و در سناریو SSP1-2.6، ۱/۱ درجه سانتیگراد، دمای حداقل محدوده در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت (شکل ۷).

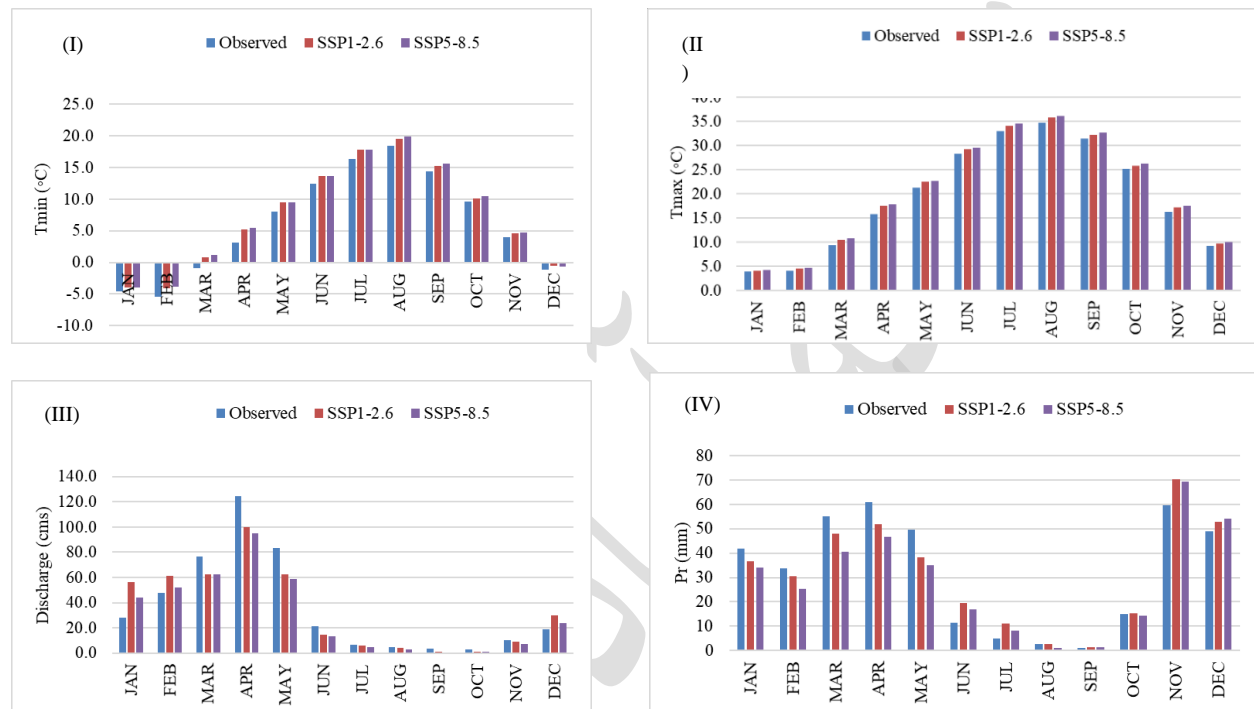


Figure 7. (I) Comparison of monthly average minimum temperature (Tmin), (II) maximum temperature (Tmax), (III) precipitation (Pr), and (IV) streamflow (Q) between the base period and future period as simulated by EC-EARTH model under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

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 سناریو 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. به طور 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 به صورت میانگین ماهانه در دوره پایه و دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۲) تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نشان داد که مقدار میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده 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، سناریو انتشار SSP5-8.5 بیشترین کاهش بارندگی و سناریو انتشار SSP1-2.6 کمترین کاهش بارندگی را به ترتیب با مقادیر  $37/7$  و  $6/6$  میلیمتر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مدل‌های GCMs و نرم افزار LARS-WG به عنوان یک مولد آب و هوایی عملکرد خوبی در پیش‌بینی دما ماهانه و سالانه در ایران از خود نشان دادند در صورتی که بخش عمده مدل‌های GCMs عملکرد ضعیفی برای پیش‌بینی بارش دارند (Abbasian et al., 2018).

از آن جا که در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس العمل حوزه امکان پذیر نمی‌باشد بنابراین انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار، با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی، پیش‌بینی قابل قبولی از رواناب سطحی ارایه نماید، ضروری به نظر می‌رسد. از این رو 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 بر اساس نتایج مدل‌سازی تغییر اقلیم در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زربینه رود نسبت به دوره پایه می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که سناریو SSP1-2.6 و سناریو SSP5-8.5 مدل EC-EARTH به ترتیب بیشترین ( $3/99$  متر مکعب بر ثانیه) و کمترین ( $30/40$  متر مکعب بر ثانیه) میزان متوسط رواناب سالانه را برای دوره آتی پیش‌بینی نموده‌اند.

### ۵-۳- ارزیابی مدل WEAP در دوره آتی با افزایش ارتفاع سد زربینه رود

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی رواناب سناریو SSP1-2.6 مدل اقلیمی EC-EARTH و سناریو SSP5-8.5 مدل EC-EARTH به ترتیب به عنوان سناریو خوشبینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۲ به عنوان رواناب

ورودی به سد زربینه رود در نظر گرفته شد تا مدیریت و تخصیص مصارف در محدوده سد زربینه رود با حجم بهینه ۹۱۳/۴ میلیون متر مکعب تحت تاثیر سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۰ مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. نتایج جدول (۸) و (۱۰) نشان می‌دهد که در دوره آتی در هر دو سناریو خوشبینانه و بدبینانه کمبود منابع آبی برای تامین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود کاهش می‌یابد و عدم تامین 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 زربینه رود علاوه بر بخش کشاورزی، تامین نیاز زیست محیطی رودخانه را نیز با مشکل مواجه می‌کند که این امر می‌تواند اکوسیستم رودخانه را با چالش مواجه کند. نتایج جداول (۹ و ۱۱) کاهش شاخص اطمینان‌پذیری در بخش کشاورزی در سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 را طی دوره آتی حتی با افزایش ارتفاع سد را نشان می‌دهد. بطوریکه، در هر دو سناریو 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 سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب ۱۵/۵۳ و ۲۰/۲۴ درصد کمبود وجود خواهد داشت.

بطورکلی، با ارائه نتایج شبیه‌سازی دوره آتی در این بخش مشخص گردید که تغییرات اقلیمی در هر دو سناریو خوشبینانه و بدبینانه می‌تواند اثرات مخربی بر بخش کشاورزی و محیط زیست منطقه داشته باشد. لذا افزایش ارتفاع سد بمنظور 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- جمع بندی و نتیجه گیری

این مطالعه با هدف محاسبه افزایش ارتفاع بهینه سد زربنه رود به کمک الگوریتم بهینه‌سازی IWO-WEAP انجام شد. از این رو 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 نرم-



افزار 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 تامین نمی‌شود و با کمبود مواجه است. همچنین نتایج مدل بهینه‌سازی IWO-WEAP نشان داد مقدار افزایش ارتفاع بهینه سد زرينه رود برابر با ۶/۳ متر می‌باشد و حجم جدید مخزن سد با لحاظ نمودن افزایش ارتفاع نیز برابر با ۹۱۳/۴ میلیون متر مکعب برآورد گردید. با لحاظ نمودن حجم جدید در مدل WEAP، مقادیر درصد پوشش نیازها محدوده و شاخص اطمینان‌پذیری سیستم تامین 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 اینکه 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 سناریو انتشار SSP5-8.5، حداکثر ۱/۳ درجه سانتیگراد و در سناریو SSP1-2.6، ۱/۱ درجه سانتیگراد، در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) افزایش خواهد یافت. همچنین میانگین ماهانه دمای حداکثر در مدل اقلیمی EC-EARTH و تحت سناریو انتشار SSP5-8.5، حداکثر ۱/۲ درجه سانتیگراد و در سناریو SSP1-2.6، ۰/۹۰ 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، سناریو انتشار SSP5-8.5 بیشترین کاهش بارندگی و سناریو انتشار SSP1-2.6 کمترین کاهش بارندگی را به ترتیب با مقادیر ۳۷/۷ و ۶/۶ میلیمتر نشان می‌دهد. در مجموع نتایج نشان از روند کاهشی میانگین آورد سالانه رودخانه زرينه رود 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 تامین نیاز کشاورزی محدوده مطالعاتی به نسبت شرایط موجود در وضعیت بدتری قرار دارد. بطوریکه، در هر دو سناریو 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 سناریو SSP5-8.5 و SSP1-2.6 به ترتیب ۱۵/۵۳ و ۲۰/۲۴ درصد کمبود وجود خواهد داشت.

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

## - مراجع

- Abushandi, E. and 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, pp.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. and Paul, C., 2020. Use and misuse of the net present value in environmental studies. *Ecological Economics*, 174, p.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. and 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. and 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., Yuezheng, 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.

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

Omid Niroumand<sup>1</sup>, Mojtaba Shourian<sup>21\*</sup>, Maryam Javan Salehi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. PhD Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

## **Abstract**

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 Zarineh 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 Zarineh 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 Zarineh 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.

**Keywords:** Increasing the height of the dam, Invasive Weed Optimization (IWO) algorithm ,WEAP

---

\*Corresponding Author

Email: m\_shourian@sbu.ac.ir