

بررسی تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر جریان ورودی به تالاب انزلی با کمک پویایی سیستم‌ها

حامد مازندرانی زاده^۱ | مرتضی کریمی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir
۲. دانشجوی دوره دکتری مدیریت منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: morteza.karimi.91@gmail.com

چکیده

وقوع تغییر اقلیم از یک سو و طرح‌های توسعه منابع آب در بالادست حوضه‌ها از سوی دیگر، موجب تغییر در توازن توزیع منابع آب و افزایش کمبود و ایجاد مناقشات بین ذینفعان خواهد شد. با توجه به درهم‌تنیدگی سیستم‌های منابع آب با سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی، عدم توجه به مدیریت منابع آب بر سیستم‌های مذکور تأثیر می‌گذارد. هدف از انجام این مطالعه بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب سطحی در حوضه سد سفیدرود و تالاب انزلی و به دنبال آن تغییرات دبی ورودی به تالاب انزلی با کمک پویایی سیستم‌ها است. لذا داده‌های بارشی پروژه CMIP6 در سناریوهای تغییر اقلیم SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۰ انتخاب و زیرسیستم‌های حوضه سد سفیدرود، حوضه تالاب انزلی و بخشی از شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود در VensimPLE شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که به دلیل روند افزایشی برداشت‌های آب در بالادست سد سفیدرود و همچنین افزایش نیاز آبی آبیاری شبکه در دوره آینده، با وجود پیش‌بینی افزایش میانگین بارندگی، میانگین سالانه دبی ورودی به تالاب انزلی بین ۳/۱ تا ۱۶/۳ درصد کاهش خواهد یافت. با توجه به اهمیت شش‌ماهه‌ی دوم سال آبی در شبکه آبیاری، میانگین دبی رودخانه‌های ورودی به تالاب در این بازه‌ی زمانی بین ۱۶/۳ تا ۳۲/۹ درصد با کاهش مواجه خواهد شد.

کلمات کلیدی: پویایی سیستم، تغییر اقلیم، دبی رودخانه، CMIP6، VENSIM.

۱. مقدمه

عدم توجه به مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز موجب بروز مسائلی همچون تشدید تعارض میان مصرف‌کنندگان بالادست و پایین‌دست، عدم رعایت عدالت اجتماعی، مناقشات بین بخشی، عدم تأمین حداقل نیازهای زیست‌محیطی و در نهایت متأثر شدن برآیندهای اقتصادی می‌شود (Vinten et al., 2019). افزایش استحصال آب در بالادست حوضه در قالب برنامه‌های توسعه منابع آب موجب حذف یا کاهش خدمات و کارکردهای اکوسیستم‌های آبی واقع در پایین‌دست می‌شود (Han et al., 2024; Rahman et al., 2024). از طرف دیگر با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز نیز تغییر کرده و به تبع آن مقدار آب و میزان دسترسی به آن تحت تأثیر قرار گرفته است (Aryal et al., 2019; Kim et al., 2021). از این رو با توجه به درهم تنیدگی سیستم‌های منابع آب و سایر سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، تحلیل حوضه نیازمند نگرشی جامع، سیستمی و آینده‌نگر است به طوری که تمام جنبه‌های اثرگذار و بازخوردهای اجزا بر یکدیگر را به خوبی شبیه‌سازی کند و در پایش وضعیت حال و آینده راهبردها و گزینه‌های مدیریتی مؤثر واقع شود (Gain et al., 2020; Hashemi et al., 2020; Dahal et al., 2025).

احداث سد‌های متعدد در بالادست سد سفیدرود، افزایش بهره‌برداری از منابع آب حوضه و عدم پایداری به مدیریت یکپارچه منابع آب از یک سو و تغییر الگوی بارندگی ناشی از تغییر اقلیم از سوی دیگر، باعث تغییر در کمیت و کیفیت سیستم‌های منابع آب حوضه شده است که تبعات آن می‌تواند بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیست در حوضه تالاب انزلی را تحت تأثیر قرار دهد (Mahdian et al., 2023). تراز تالاب انزلی بیشتر تحت تأثیر ارتباط آن با دریای کاسپین قرار دارد و تنها در مواقع سیلابی، تراز سطح آب تالاب تحت تأثیر دبی ورودی از بالادست تغییر می‌کند. اما با این حال کاهش کیفیت جریان ورودی به دلیل عوامل مختلف انسانی و اقلیمی، باعث تغییر شرایط اکولوژیکی تالاب شده است (Modaberi & Shokoohi, 2020; Karimi & Shokoohi, 2025).

در همین راستا پژوهش حاضر به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب در حوضه آبریز تالاب انزلی به‌عنوان بخشی از شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود و به تبع آن تغییر دبی جریان ورودی به تالاب با استفاده از پویایی سیستم‌ها می‌پردازد. لذا در گام اول ضروری است که درک صحیحی از تغییرات آب و هوایی در مقیاس‌های مکانی و زمانی جهت پیش‌بینی آینده وجود داشته باشد. از این رو مدل‌های گردش عمومی (GCM) به‌عنوان به‌روزترین ابزار در دسترس برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در سطح جهان، ارائه شده‌اند (Sachindra et al., 2018). تاکنون مدل‌های اقلیمی بسیاری به‌عنوان ابزارهای مؤثر برای پایش و پیش‌بینی تغییر اقلیم توسعه داده شده‌اند (Hosseinpour et al., 2025). این مدل‌ها ضمن توانایی قابل توجه در شبیه‌سازی بارش و سایر مؤلفه‌های اقلیمی، دارای محدودیت‌هایی از جمله خطاهای سیستماتیک در بازتولید این مقادیر به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده، همانند ایران، هستند (IPCC, 2013).

یکی از ابزارهای مفید در نگرش به‌هم‌پیوسته در شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌ها، فن مبتنی بر نگرش پویایی سیستم است که نخستین بار توسط فاستر در دهه ۶۰ میلادی ارائه شد. پویایی سیستم‌ها شامل ترکیبی از سیستم‌های مهندسی و رویکردهای تصمیم‌گیری مدیریتی است که روابط بین مسائل اقتصادی-اجتماعی، منابع آب و محیط‌زیست را به خوبی بیان می‌کند (Naeem et al., 2023). تا به حال مدل‌سازی پویایی سیستم برای بررسی سیستم‌های زیست‌محیطی و آب در مقیاس‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Babolhakami et al., 2023; Cerecedo Arroyo & Martínez Austria, 2021) و نتایج مطلوبی در ارزیابی و تلفیق سیستم‌های

اجتماعی-اقتصادی و منابع آب (Zhang & Chui, 2025) و و نیز در برنامه‌ریزی واسطه‌گذاری تصمیم‌گیری و تدوین استراتژی‌های مدیریتی برای مقابله با کمبود آب و تغییرات اقلیمی (Dehghani et al., 2024) ارائه شده است.

مطالعات متعددی به بررسی اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تالاب‌ها و حوضه‌های آبریز پرداخته‌اند. یکی از مهم‌ترین این مطالعات با به‌کارگیری مدل SWAT، اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی بر پارامترهای هیدروژئومورفولوژیک حوضه آبخیز تالاب انزلی بررسی شد. سناریوهای اقلیمی SSP از داده‌های پروژه CMIP6 و تغییرات آبی پوشش زمین با استفاده از LCM مورد تحلیل قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد اگرچه تغییرات اقلیمی به‌تنهایی می‌تواند منجر به کاهش رواناب و بار رسوب شود، اما اثر هم‌افزایی تغییر کاربری اراضی (به‌ویژه جنگل‌زدایی و توسعه شهری) موجب افزایش معنادار ورودی رسوب به تالاب خواهد شد. این پدیده در بلندمدت حیات اکوسیستم تالاب را تهدید کرده و خروج آن از کنوانسیون رامسر را محتمل می‌سازد (Mahdian et al., 2023). در مطالعه‌ای دیگر با ارائه یک چارچوب مدل‌سازی نوآورانه، اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تالاب انزلی کمی‌سازی شد. این چارچوب، مدل‌های مبتنی بر فرآیند (مانند SWAT) و مدل یادگیری عمیق (LSTM) را با استفاده از داده‌های ۱۲ مدل CMIP6 و تصاویر لندست تلفیق نموده است. نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهد که تالاب انزلی تحت تأثیر افزایش دما، کاهش بارش و رواناب ورودی، افزایش بار رسوبی و کاهش تراز آب دریای خزر، به سمت خشکی فصلی پیش خواهد رفت و در بدینانه‌ترین سناریو، این پدیده تا سال ۲۰۵۸ رخ خواهد داد. حتی در سناریوهای خوشبینانه‌تر (با فرض ثبات تراز دریای خزر)، تالاب تا سال ۲۱۰۰ به یک پهنه آبی فصلی تقلیل خواهد یافت (Mahdian et al., 2024). مطالعه دیگری با استفاده از داده‌های CMIP5 و سناریوهای RCP، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تالاب انزلی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد در پی افزایش دما (۲.۷-۱.۹ درجه سلسیوس) و کاهش بارش (۱۲.۲-۱۲.۸ درصد)، جریان ورودی رودخانه تا ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات منجر به کاهش ۳۴ درصدی حجم تالاب و هم‌زمان افزایش ۴۹ درصدی شوری آب (TDS) می‌شود (Naderi and Saatsaz, 2020).

نتایج مدل‌سازی پویایی سیستم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که کاهش ورودی آب‌های سطحی، احداث و بهره‌برداری سدها و توسعه کشاورزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افت تراز و خشک شدن دریاچه ارومیه به شمار می‌روند (Bafandeh Zنده et al., 2019). همچنین نتایج توسعه‌ی راهبردهای مدیریتی مدل شکار-شکارچی در مدل پویایی سیستم حوضه‌ی آبریز این دریاچه حاکی از آن است که در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۱ کاهش اراضی کشاورزی به میزان ۴۰ درصد، افزایش راندمان کشاورزی به میزان ۲۱ درصد و کاهش مساحت دریاچه به میزان ۲۰ درصد، به ترتیب باعث افزایش تراز آب دریاچه به میزان ۱/۷، ۰/۸ و ۰/۵ متر می‌شوند و با اجرای هم‌زمان سناریوها تراز آب دریاچه به میزان ۴/۳ افزایش خواهد یافت (Barhagh et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر جریان خالص ورودی به دریاچه ارومیه در دو دوره زمانی آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۱) با استفاده از داده‌های دما و بارش مدل جفت‌شده HadGEM2-ES از مرکز Hadley در شش سناریوی کاهش تخصیص آب کشاورزی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که اجرای سیاست‌ها و اقدامات سخت‌گیرانه، باعث افزایش میانگین سالانه حجم دریاچه برای دوره‌ی اول و دوم به ترتیب حدود ۵۰ و ۷۵ خواهد شد. اما با این حال، این حجم کمتر از میانگین بلندمدت خواهد بود (Bozorg-Haddad et al., 2022). شبیه‌سازی پویایی سیستم منابع آب حوضه آبخیز هیرمند تحت سناریوهای مدیریتی نشان داد که میزان کل تقاضا برای نیازهای کشاورزی، شرب و محیط‌زیست در سال ۱۴۱۰ افزایش خواهد یافت و با وجود کاهش منابع، سیستم قادر به تأمین نیازها نخواهد بود (Ali Ahmadi et al., 2021).

با توجه به قابلیت و عملکرد مناسب استفاده از پویایی سیستم‌ها در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب، در این پژوهش از نرم‌افزار Vensim PLE برای شبیه‌سازی پویایی سیستم منابع و مصارف حوضه‌های مرتبط با تالاب انزلی در شرایط حال و آینده و تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به تالاب استفاده شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

تالاب بین‌المللی انزلی به‌عنوان یکی از تالاب‌های مهم ایران، در جنوب غربی دریای خزر واقع شده است (Mahdian et al., 2024). این تالاب به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های بارز کشور شناخته می‌شود و نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی و ارائه خدمات اکولوژیکی دارد (Hodhodi & Rabiepour, 2022). تعداد ۹ رودخانه اصلی پس از مشروب نمودن دشت فومنات و بخش مرکزی گیلان به‌عنوان بخشی از شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود، به تالاب انزلی منتهی می‌شوند. این تالاب از طریق یک کانال دریایی به دریای خزر متصل می‌شود (Mahdian et al., 2023). شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود با وسعت ۱۱۷۰۰۰ هکتار شامل ۱۷ واحد عمرانی است که کشت غالب آن به برنج اختصاص یافته است. آب موردنیاز شبکه از طریق سد سفیدرود و سایر رودخانه‌ها و انهار موجود در داخل شبکه تأمین می‌شود. بخش فومنات و مرکزی مجموعاً به مساحت ۱۵۸۰۰۰ هکتار در حوضه تالاب انزلی واقع شده و بیش از ۷۰ درصد آن شالیزار است (Modaberi & Shokoohi, 2021). در شکل (۱) موقعیت تالاب انزلی و واحدهای عمرانی واقع در حوضه آن نشان داده شده است.

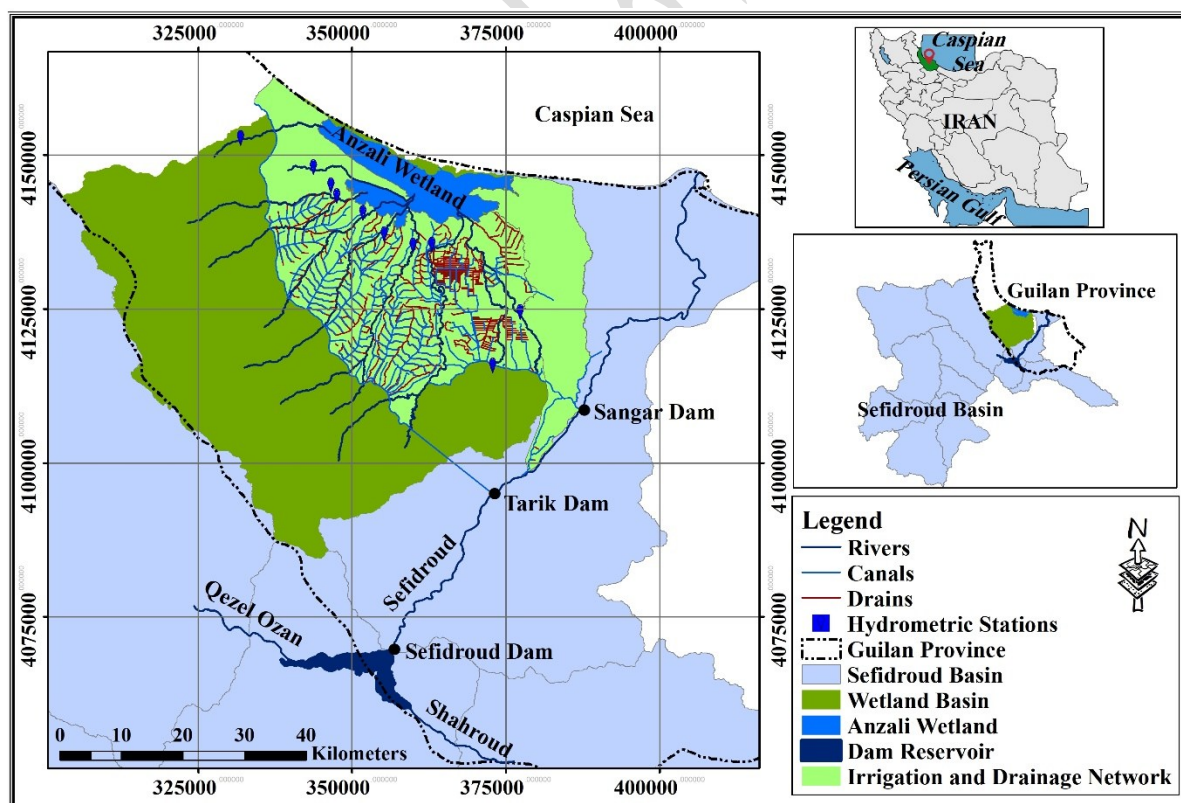


Figure 1. Location of Anzali wetland and a part of construction units of Sefidroud irrigation-drainage network located in the wetland basin

۲-۲. پویایی سیستم‌ها

مدل پویایی تالاب انزلی و حوضه بالادست آن شامل سه زیرسیستم حوضه آبریز سد سفیدرود، حوضه تالاب انزلی و بخشی از شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود در حوضه تالاب انزلی است. حوضه آبریز سد سفیدرود (رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود) و همچنین حوضه

تالاب انزلی (شامل نه رودخانه در بخش فومنات و مرکزی شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود) است. با توجه به نمودار جریان مدل پویایی در شکل (۲)، در زیرسیستم حوضه آبریز سد سفیدرود رواناب ناشی از بارندگی با توجه به ضریب رواناب و مساحت حوضه، در دوره‌ی زمانی پایه و سناریوهای اقلیمی به مخزن سد سفیدرود منتهی و ذخیره می‌شود. مؤلفه‌های خروجی از سد شامل تبخیر از سطح مخزن، مجموع جریان پایه برای پایین‌دست حوضه و آب مازاد و آب تحویلی به شبکه بر اساس مقدار حداقل حجم مخزن است. در زیر سیستم شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود در حوضه‌ی تالاب، در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، نیاز آبی برنج تغییر کرده و به دنبال آن با فرض ثابت بودن مساحت زیر کشت و راندمان شبکه مقدار تقاضای آب نیز تغییر می‌کند. با تخصیص آب از سد سفیدرود به شبکه آبیاری زهکشی و سایر منابع (جریان بین‌راهی) بخشی از نیاز آبی آبیاری شبکه مرکزی و فومنات تأمین می‌شود و کمبود آن با برداشت آب از رودخانه‌های منتهی به تالاب انزلی جبران می‌شود. از طرف دیگر مقدار آب برگشتی نیز از طریق رودخانه‌ها وارد تالاب خواهد شد. در زیر سیستم حوضه آبریز تالاب انزلی نیز مقادیر رواناب حوضه از طریق نه رودخانه اصلی به تالاب منتهی می‌شود و با احتساب میزان برداشت آب از رودخانه‌ها و آب برگشتی، دبی ورودی به تالاب قابل محاسبه است.

با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی جریان ورودی به تالاب است، حجم آب تالاب که خود متأثر از جریانات خروجی از تالاب و تراز دریای خزر است مورد بررسی قرار نگرفته است. به منظور واسنجی مدل توسعه داده شده، از داده‌های مشاهده‌ای دبی ورودی به مخزن سد سفیدرود و دبی ورودی به تالاب انزلی مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری موجود طی دوره زمانی سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۷ استفاده شد. همچنین حساسیت دبی جریان شبیه‌سازی شده نسبت به ضریب رواناب و ضریب آب برگشتی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور میزان حساسیت دبی ورودی به تالاب انزلی نسبت به هر یک از موارد مذکور با ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$S = \left| \frac{M - O}{O} \right| \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، S میزان حساسیت (درصد)، M مقدار دبی جریان مدل‌سازی شده به ازای تغییر پارامترهای مورد نظر (مترمکعب بر ثانیه)، O مقدار دبی جریان مدل‌سازی شده در شرایط مبنا (مترمکعب بر ثانیه).

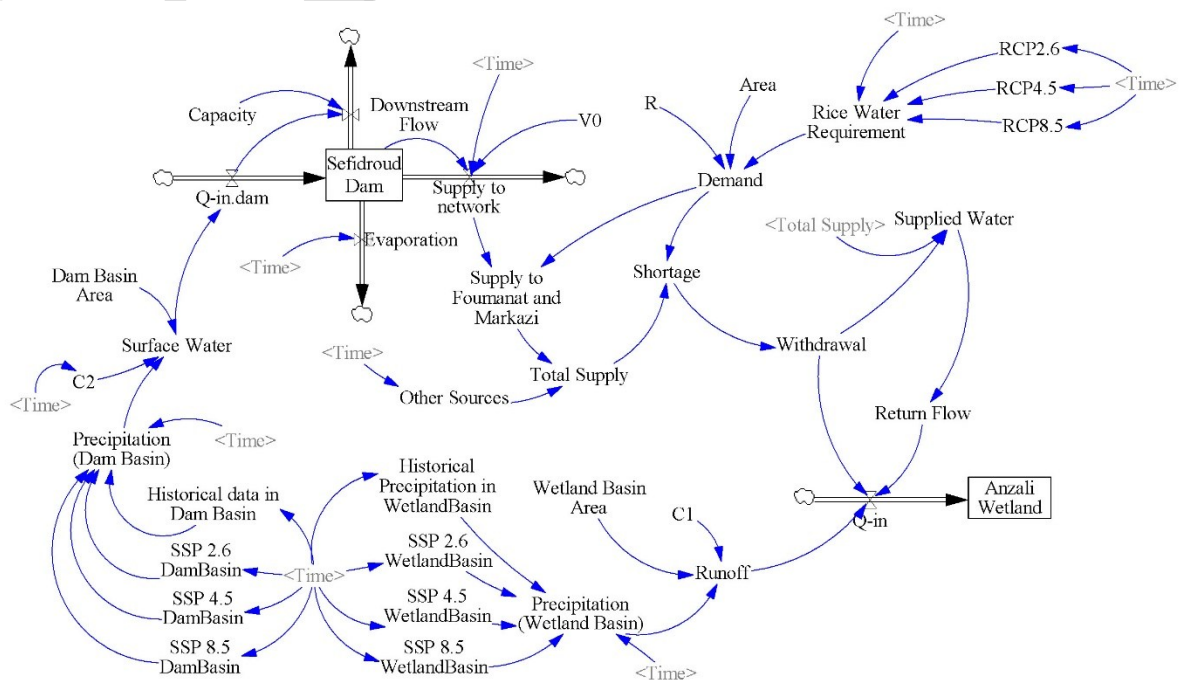


Figure 2. Stock and flow diagram for Anzali Wetland basin and Sefidroud Dam basin SD model

۲-۱-۱. سناریوهای تغییر اقلیم

تغییرات آینده گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان مؤلفه اصلی تغییر اقلیم، توسط IPCC (مهم‌ترین مرکز مرتبط با مطالعات تغییر اقلیم در دنیا) در قالب چهار سناریو پیش‌بینی شده است. این سناریوها بر اساس نتایج حاصل از برخی فراسنج‌های اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و همچنین میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده تحت عنوان سناریوهای خط سیر طراحی شده‌اند که در هر شرایطی می‌توانند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردد (IPCC, 2021). در مطالعه حاضر جهت بررسی وضعیت سیستم در آینده، از نتایج شبیه‌سازی بارندگی در فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده (CMIP6) استفاده شد که در آن از تلفیق خطوط سیر غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای (RCPs) و خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs) جهت انتشار سناریوها در قالب پنج زیرگروه اصلی استفاده شده است در هر نسخه از این سناریو، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس نقش آن بر سطح واداشت‌های تابشی به چهار دسته ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ وات بر مترمربع تا پایان قرن ۲۱، طبقه‌بندی شده‌اند؛ بنابراین سناریوی SSP 8.5 معرف شرایط سخت‌گیرانه برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، سناریوی SSP 4.5 بر اساس شرایط متعادل و سناریوی RCP 2.6 نیز نشان‌دهنده‌ی ادامه‌ی وضع موجود با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای است (Palmer et al., 2023). در این مطالعه از سه سناریوی SSP 2.6، SSP 4.5 و SSP 8.5 به‌منظور بررسی بارندگی در سطوح مختلف تغییر اقلیم در دوره آتی استفاده شد.

۲-۱-۲. زیر سیستم حوضه آبریز سد سفیدرود

مقادیر ماهانه و سالانه بارندگی در سطح حوضه‌ی آبریز سد سفیدرود بر اساس داده‌های بارندگی مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در حوضه آبریز رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود طی دوره شاخص به‌عنوان ورودی بارش در نظر گرفته شدند. Yazdandoost et al. (2021) در مطالعه خود عملکرد مدل‌های مختلف CMIP6 در شبیه‌سازی بارندگی در اقلیم‌های مختلف ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در اقلیم‌های نیمه‌خشک همچون حوضه بالادست سد سفیدرود مدل CNRM-CM6-1 عملکرد مناسب‌تری دارد. لذا با انتخاب این مدل و پس از دریافت داده‌ها از پایگاه Copernicus، اصلاح اریبی داده‌ها بر اساس داده‌های تاریخی و با استفاده از روش عامل تغییر (Change Factor) انجام شده و مدل‌سازی برای سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۰ به ازای بارندگی‌های پیش‌بینی شده در سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 صورت گرفت. در روش عامل تغییر برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل، مقادیر «نسبت» برای بارندگی طبق رابطه (۲) بین میانگین ۲۳ ساله دوره‌های آتی (۲۰۱۸-۲۰۴۰) و دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۷) شبیه‌سازی شده توسط همان مدل محاسبه می‌شود. سپس سری زمانی بارندگی حاصل از تغییر اقلیم در دوره آتی مطابق رابطه (۳) به دست خواهد آمد.

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$P_i = P_{obs, i} \times \Delta P_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن ΔP_i نسبت بارندگی در سناریوی تغییر اقلیم در هر ماه ($1 \leq i \leq 12$) میانگین بارندگی شبیه‌سازی شده در دوره آتی، $\bar{P}_{GCM, base, i}$ میانگین بارندگی شبیه‌سازی شده در دوره پایه، P_i بارندگی حاصل از تغییر اقلیم و $P_{obs, i}$ بارندگی مشاهداتی در دوره پایه است.

به‌منظور برآورد جریان آب سطحی ورودی به سد سفیدرود تحت تأثیر تغییرات بارندگی ناشی از تغییر اقلیم در دوره آینده، به دلیل محدودیت در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز از رابطه‌ی ساده‌ی بارش-رواناب در دوره پایه استفاده شد. بدین ترتیب با بررسی میانگین سالانه آبدهی در ایستگاه‌های هیدرومتری گیلوان و لوشان به ترتیب بر روی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در طی دوره

شاخص و مقایسه آن با میانگین سالانه بارندگی در سطح حوضه مجموعاً به مساحت ۵۳۸۱۴ کیلومتر مربع، مقادیر ضریب رواناب برآورد شد و نتایج آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. روند تغییرات ضریب رواناب در شکل (۳) نشان می‌دهد که در طی سالیان گذشته بهره‌برداری از طرح‌های توسعه و سدهای متعدد در بالادست سد سفیدرود به‌عنوان مهم‌ترین عامل، موجب کاهش سهم آب ورودی به سد سفیدرود یا همان ضریب رواناب در انتهای حوضه شده است. با توجه به اینکه عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و هیدرومورفولوژیکی مختلفی بر روی سهم آب ورودی به سد سفیدرود تأثیرگذار هستند و پیش‌بینی آن نیازمند مدلسازی و اطلاعات جامعی از وضعیت حوضه و عوامل ذکر شده است، در سناریوهای تغییر اقلیم فرض شده است که ضریب رواناب از سال ۲۰۱۷ به بعد مطابق خط روند شکل (۳) تغییر کند. مؤلفه‌های خروجی از سد شامل تبخیر از سطح مخزن بر اساس اطلاعات هواشناسی (حدود ۸۱ میلیون مترمکعب)، حجم آب تخصیص یافته به شبکه معادل نسبت تقاضا در بخش فومنتا به تقاضای کل شبکه (حدود ۵۴ درصد) و نیاز آبی زیست‌محیطی رودخانه سفیدرود (۱۰ درصد جریان سالانه) بر اساس برنامه‌های شبکه آبیاری از شرکت آب منطقه‌ای در نظر گرفته شد.

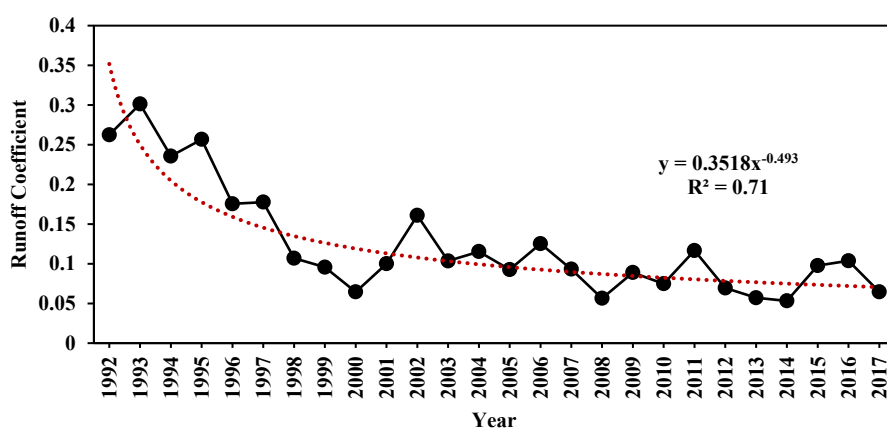


Figure 3. Runoff coefficient of the upstream basin of Sefidroud Dam

۳-۱-۲. زیر سیستم شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود (بخش فومنتا و مرکزی)

همان‌طور که اشاره شد، کشت غالب در شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود برنج است که نیاز خالص آبیاری آن ۵۲۴۰ مترمکعب در هر هکتار و سیستم آبیاری در این شبکه به صورت تلفیقی (مدرن-سنتی) با راندمان آبیاری ۴۵ درصد صورت می‌گیرد (Pandam, 2004). افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش ناشی از تغییر اقلیم، از طریق افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل، نیاز آبی گیاهان را تحت تأثیر مستقیم قرار می‌دهد. در همین راستا در مطالعه (Hoseini Tabesh and Aghashariatmadari (2020) نیاز آبی آبیاری برنج تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 در منطقه انزلی در استان گیلان با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES و ریزمقیاس-نمایی آن‌ها توسط مدل LARS-WG برآورد شد. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به تفاوت در مدل اقلیمی مورد استفاده برای برآورد نیاز آبی برنج و بارندگی در حوضه آبریز تالاب اشاره نمود. اگرچه این رویکرد به دلیل محدودیت‌های داده‌ای و با هدف بهره‌گیری از نتایج معتبر موجود اتخاذ شده است، می‌تواند منجر به عدم انسجام محدود بین منابع و مصارف آب شود. به دلیل عدم قطعیت در اعمال ضرایب اصلاحی بین مدل‌های اقلیمی، این اختلاف به‌عنوان بخشی از عدم قطعیت ساختاری مدل لحاظ شده است. با این وجود، چارچوب کلی مدل، قابلیت لازم برای به‌روزرسانی و یکپارچه‌سازی کامل مدل‌های اقلیمی در مطالعات آبی را دارا می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعه (Hoseini Tabesh and Aghashariatmadari (2020) نیاز آبی خالص برنج از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ تحت سه سناریوی مذکور به ترتیب سالانه حدود ۳۳/۳، ۳۵/۱ و ۳۸/۷ مترمکعب در هر هکتار افزایش خواهد یافت. لذا از نتایج این بررسی جهت

اعمال تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی برنج در مدل پویایی سیستم استفاده شد. علاوه بر تخصیص آب از سد سفیدرود به بخش فومنات و مرکزی، حدود ۸۰ میلیون مترمکعب از طریق برداشت از منابع آب زیرزمینی و آب‌بندان‌ها (Janatrostami and Salahi, 2021) در قالب مؤلفه‌ی سایر منابع در مدل در نظر گرفته شد. مؤلفه‌ی کمبود آب معادل با اختلاف بین مقدار مؤلفه‌ی عرضه (آب قابل تخصیص بر اساس شرایط هیدرولوژیکی حوضه) و مؤلفه‌ی تقاضا (نیاز آبی اراضی کشاورزی بر اساس نیاز آبی برنج و سطح زیرکشت) است که به صورت احداث بند انحرافی، سردهنه و برداشت‌های مجاز و غیرمجاز از رودخانه‌های منتهی به تالاب تأمین می‌گردد و در نهایت با توجه به کل آب تأمین شده در بخش کشاورزی، مقدار آب برگشتی ورودی به رودخانه‌ها محاسبه می‌شود. مقدار آب برگشتی ۳۰ درصد در نظر گرفته شد (Pandam, 2004).

۲-۱-۴. زیر سیستم حوضه‌ی تالاب انزلی

در این زیر سیستم بر اساس نتایج مطالعه‌ی Yazdandoost et al. (2021) مدل MRI-ESM2-0 از پروژه CMIP6 به دلیل دقت و عملکرد مناسب‌تر در اقلیم‌های مرطوب انتخاب شد. پس از دریافت داده‌های مدل منتخب از پایگاه Copernicus، اصلاح اریبی داده‌ها نیز طبق روش عامل تغییر و در دوره‌ی پایه در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم صورت گرفت. مقادیر ماهانه و سالانه بارندگی در سطح حوضه‌ی تالاب انزلی بر اساس داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در حوضه آبریز رودخانه‌های منتهی به تالاب طی دوره‌ی پایه استفاده شد. رواناب ناشی از بارندگی در سطح حوضه تالاب انزلی در دوره آینده بر اساس رابطه ساده‌ی بارش-رواناب محاسبه شد. با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان میانگین وزنی ضریب رواناب در ۹ زیرحوضه اصلی تالاب انزلی حدود ۰/۵۲ به عنوان ضریب رواناب کل حوضه تالاب انزلی در نظر گرفته شد. رواناب ناشی از بارندگی به همراه آب برگشتی ورودی از زیر سیستم شبکه آبیاری زهکشی و کسر مقدار برداشت آب از رودخانه‌ها جهت آبیاری اراضی در آن زیر سیستم (مطابق مؤلفه کمبود آب)، به سمت تالاب هدایت می‌شوند.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت مدل پویایی نسبت به تغییر صفر تا ۱۵۰ درصدی ضریب رواناب و ضریب آب برگشتی از کشاورزی در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل نسبت به ضریب رواناب بسیار حساس‌تر از ضریب آب برگشتی از کشاورزی است. به بیان دیگر، تغییرات ضریب رواناب اثر بسیار چشم‌گیرتری بر دبی ورودی به تالاب انزلی دارد؛ به طوری که با افزایش ۱۵۰ درصدی ضریب رواناب، جریان ورودی حدود ۱۶۱ درصد افزایش یافته است، در حالی که افزایش مشابه در ضریب آب برگشتی تنها موجب ۱۶/۵ درصد افزایش دبی شده است. بنابراین اثر رواناب سطحی بر ورودی آب به تالاب غالب‌تر است. اما اثرگذاری آب برگشتی از کشاورزی بر کیفیت آب تالاب می‌تواند بسیار قابل توجه باشد.

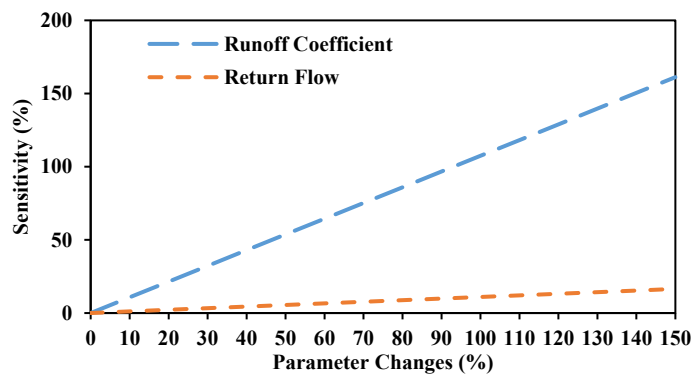


Figure 4. The sensitivity of the inflow to the Anzali Wetland

۳-۲. واسنجی مدل پویایی سیستم

در این پژوهش از مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان ورودی به تالاب انزلی و سد سفیدرود در دوره آماری ۲۵ ساله جهت واسنجی مدل پویایی سیستم استفاده شد. در شکل (۵) نمودار پراکنش تغییرات دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و سری زمانی دبی جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدل پویایی واسنجی شده، مقادیر دبی جریان ورودی به تالاب انزلی و سد سفیدرود را به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۸۹ و ۰/۹۱ و میانگین مطلق خطایی معادل ۴/۶ و ۱۳/۹ شبیه‌سازی نموده است. شاخص نش-ساتکلیف NSE نیز به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹ به دست آمد.

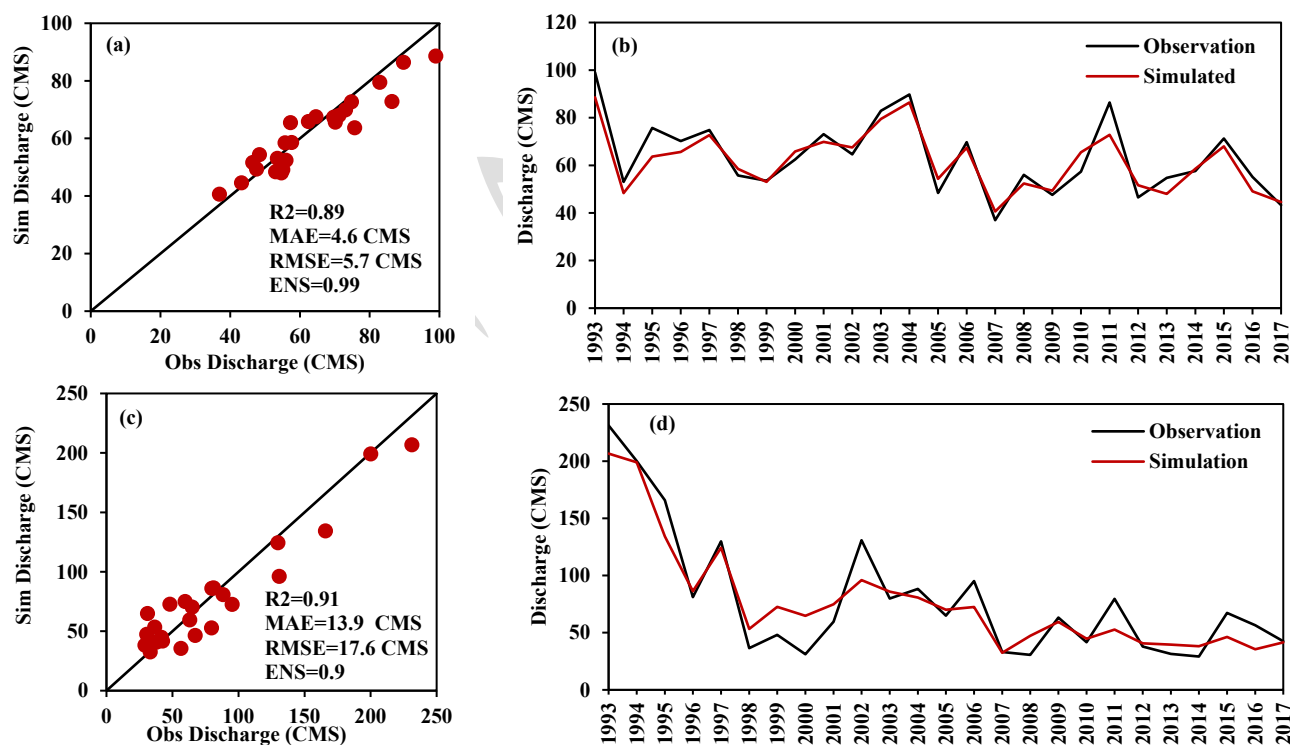


Figure 5. Scatter diagram and time series of simulated and observed discharge changes in Anzali Wetland (b and a) and Sefidroud Dam (d and c)

۳-۳. بررسی تغییرات بارندگی تحت تأثیر تغییر اقلیم

سری زمانی میانگین سالانه بارندگی در حوضه‌های سد سفیدرود و تالاب انزلی در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. در حوضه تالاب انزلی برخلاف حوضه سد سفیدرود، اختلاف بین مقدار بارندگی‌ها در طی دوره‌ی آبی در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

محسوس است. به طور کلی میانگین بارندگی سالانه در هر دو حوضه در هر سه سناریوی تغییر اقلیم نسبت به دوره‌ی پایه افزایش یافته است. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات بارندگی، میانگین بارندگی به دو بخش شش‌ماهه‌ی اول و دوم سال آبی تفکیک و مقایسه شدند (شکل‌های ۸ و ۹).

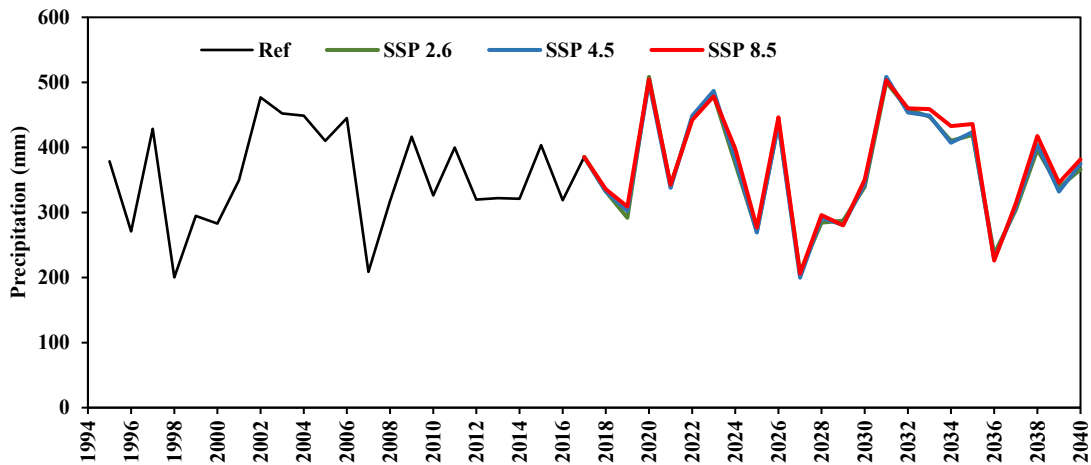


Figure 6. Annual time series of precipitation in the Sefidroud Dam basin during the reference period and the near future

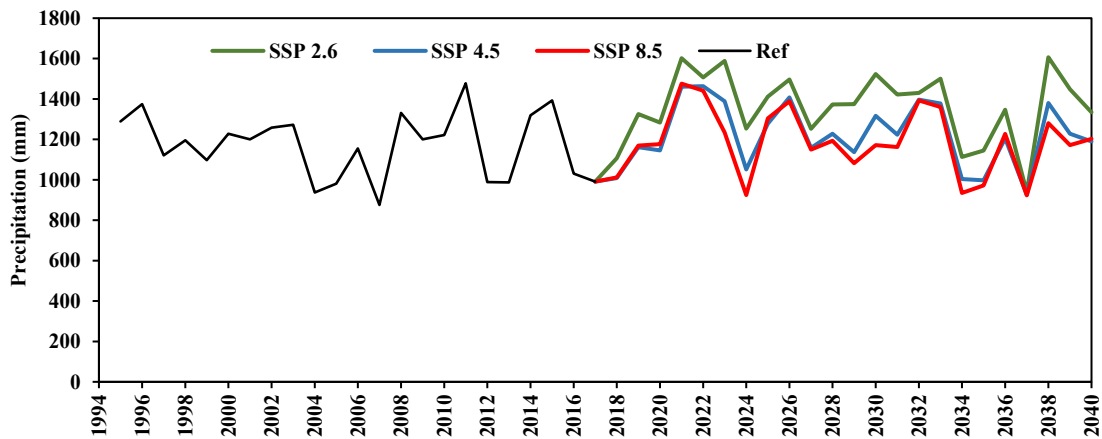


Figure 7. Annual time series of precipitation in the Anzali Wetland basin during the reference period and the near future

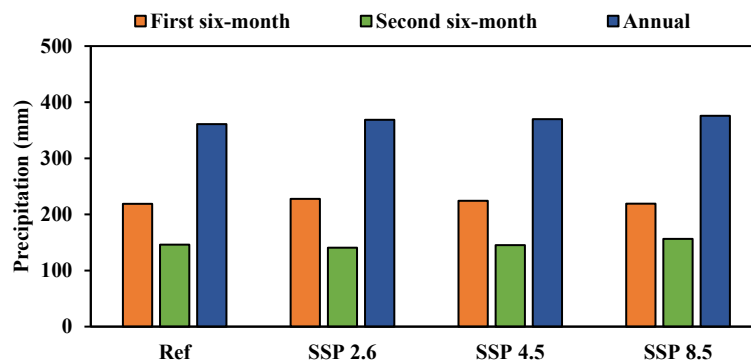


Figure 8. Average precipitation of the Sefidroud Dam basin in the different climate change scenarios in the near future

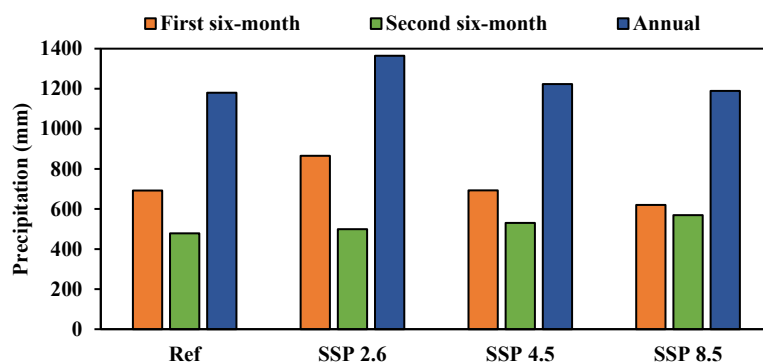


Figure 9. Average precipitation of the Anzali Wetland basin in the different climate change scenarios in the near future

نتایج نشان داد که میانگین بارندگی سالانه در حوضه سد سفیدرود در دوره‌ی ۲۰۱۷-۲۰۴۰ به مقدار جزئی افزایش می‌یابد به طوری که در سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به ترتیب ۲/۱، ۲/۴ و ۴/۱ درصد نسبت به دوره‌ی پایه افزایش خواهد یافت بنابراین بیشترین افزایش در سناریوی SSP8.5 اتفاق می‌یابد. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج مطالعات Zarezadeh et al. (2012) مطابقت دارد. در سناریوی SSP2.6 در شش ماهه اول سال آبی میانگین بارندگی ۴/۱ درصد افزایش و سپس در شش ماهه دوم ۳/۷ درصد کاهش می‌یابد. در سناریوی SSP4.5 نیز در شش ماهه اول ۲/۵ درصد افزایش و در شش ماهه‌ی دوم ۰/۵ درصد کاهش میانگین بارندگی را نشان می‌دهد؛ اما در سناریوی SSP8.5 درصد تغییرات میانگین بارندگی در شش ماهه‌ی دوم افزایشی (۷/۱ درصد) و بیشتر از شش ماهه‌ی اول (۰/۲ درصد) پیش‌بینی شده است (جدول ۱).

در حوضه تالاب انزلی به دلیل اقلیم مرطوب آن، شرایطی متفاوت با حوضه آبریز سد سفیدرود دارد. نتایج بررسی بارندگی در سناریوهای اقلیمی نشان داد که میانگین بارندگی سالانه در سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به ترتیب ۱۵/۶، ۳/۷ و ۰/۸ درصد افزایش می‌یابد؛ اما با بررسی تغییرات در شش ماهه‌ی اول و دوم سال آبی نتیجه شد که در شش ماهه‌ی اول تغییرات میانگین بارندگی از ۲۵ درصد در سناریوی SSP2.5 تا ۱۰/۴- درصد در سناریوی SSP8.5 روند نزولی دارد، در صورتی که مقادیر مذکور در شش ماهه‌ی دوم از ۴/۳ درصد تا ۱۹ درصد روند صعودی خواهد داشت (جدول ۱)؛ بنابراین در حوضه تالاب انزلی با شدید شدن پیامدهای تغییر اقلیم میانگین بارندگی در شش ماهه‌ی اول سال آبی کاهش و در شش ماهه‌ی دوم آن افزایش خواهد یافت به طوری که اختلاف بین میانگین بارندگی در این دو بازه‌ی زمانی کاهش یافته و به هم نزدیک‌تر می‌شوند؛ اما با این حال برآیند تغییرات در طول سال آبی به گونه‌ای خواهد بود که در سناریوی SSP8.5 تقریباً میانگین بارندگی سالانه تغییر چشمگیری نخواهد داشت.

Table 1. Precipitation changes in the different climate change scenarios compared to the reference period

Basin	Anzali Wetland Basin			Sefidroud Dam Basin			
	Scenario	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5
First six-month		25.0%	0.1%	-10.4%	4.1%	2.5%	0.2%
Second six-month		4.3%	10.9%	19.0%	-3.7%	-0.5%	7.1%
Annual		15.6%	3.7%	0.8%	2.1%	2.4%	4.1%

۳-۴. بررسی تغییرات حجم آب ورودی به سد سفیدرود

در زیر سیستم حوضه‌ی سد سفیدرود در مدل پویایی سیستم، با فرض ثابت ماندن ضریب رواناب، انتظار می‌رود که حجم آب ورودی به آن تحت تأثیر افزایش ۲/۱ تا ۴/۱ درصدی میانگین بارندگی سالانه در سطح حوضه آبریز در سناریوهای تغییر اقلیم، افزایش یابد. بر اساس داده‌های مشاهده‌ای موجود، حجم ورودی به سد سفیدرود با توجه به بهره‌برداری از طرح‌های توسعه از گذشته تا کنون،

کاهش یافته است. به طوری میانگین سالانه حجم آب ورودی به سد از ۲۰۸۶ میلیون مترمکعب در دوره‌ی پایه به ۱۵۸۶ میلیون مترمکعب در ۱۰ سال اخیر (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) کاهش یافته است (حدود ۲۴ درصد)؛ اما نتایج شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم نشان داد که میانگین بلندمدت حجم آب ورودی به مخزن سد در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۸ در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه با کاهش ۳۸ تا ۳۹/۲ درصدی مواجه خواهد شد؛ اما نسبت به میانگین ۱۰ سال اخیر حدود ۹ تا ۱۰/۷ کاهش خواهد یافت. در مطالعه Zarezadeh et al. (2012) نیز مقدار کاهش حجم ورودی به سد سفیدرود در دوره زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ در اثر تغییر اقلیم و بهره‌برداری از طرح‌های توسعه‌ای حدود ۴۳ درصد برآورد شده است بنابراین افزایش بهره‌برداری از طرح‌های توسعه منابع آب در بالادست حوضه از گذشته تا کنون موجب کاهش حجم آب ورودی به سد سفیدرود شده است به طوری که در سناریوهای تغییر اقلیم نیز با وجود پیش‌بینی افزایش بارندگی دو دوره‌ی زمانی آبی، حجم آب ورودی به سد در آینده کاهش خواهد یافت. در شکل (۱۱) و جدول (۲) تغییرات حجم آب ورودی به مخزن سد سفیدرود ارائه شده است. هرچند که میانگین بلندمدت حجم آب ورودی به سد در دوره آینده کاهش می‌یابد اما در برخی سال‌ها رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود به دلیل وقوع شرایط حدی با سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌های مختلف روبرو خواهند شد. همچنین نتایج نشان داد که در سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 کاهش حجم آب ورودی به سد در شش‌ماهه دوم سال آبی حدود ۱ تا ۵ درصد بیشتر از شش‌ماهه دوم سال آبی اتفاق می‌افتد، در حالی که در سناریوی بدبینانه SSP8.5 کاهش حجم آب ورودی در شش‌ماهه اول بیشتر است (حدود ۳ تا ۶ درصد).

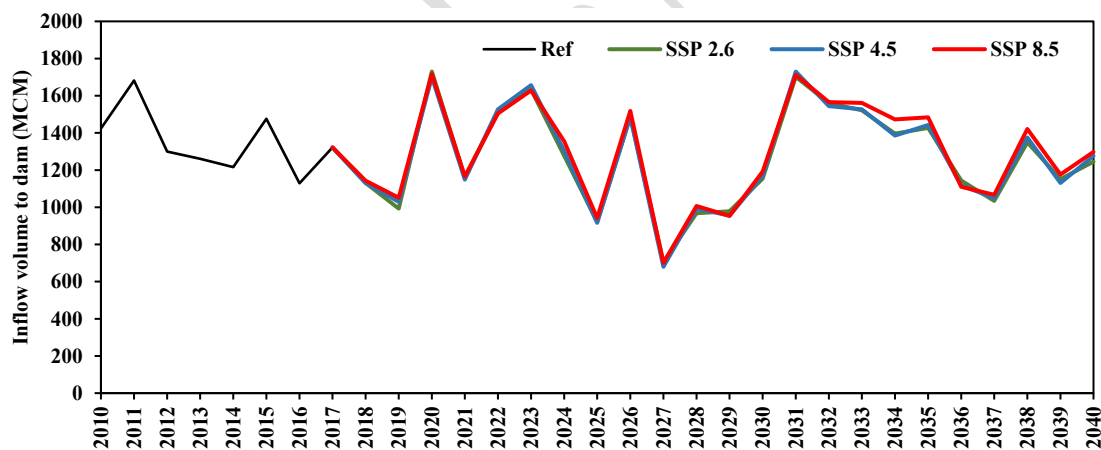


Figure 10. Annual inflow volume to the Sefidroud dam in the reference period and the different climate change scenarios

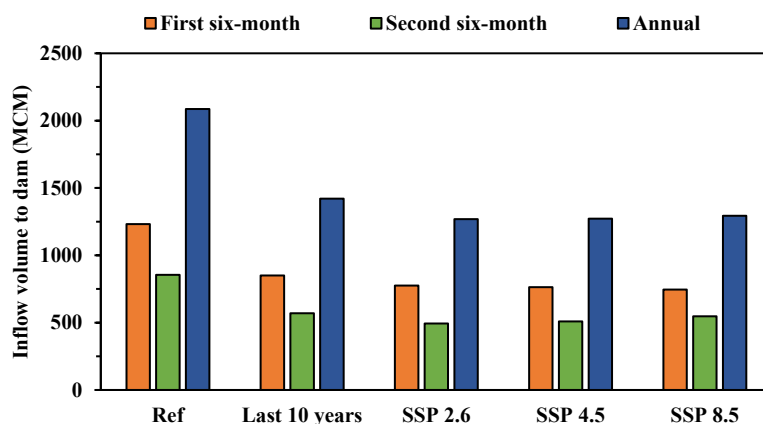


Figure 11. Average inflow volume to the Sefidroud Dam in the reference period and the different climate change scenarios

Table 2. Changes in inflow volume to the Sefidroud dam under different climate change scenarios

Scenarios	Compared to the reference time period (1995-2017)			Compared to the last 10 years (2008-2017)		
	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5
First six-month	-37.1%	-38.0%	-39.4%	-8.9%	-10.3%	-12.3%
Second six-month	-42.3%	-40.4%	-36.0%	-13.4%	-10.7%	-4.0%
Annual	-39.2%	-39.0%	-38.0%	-10.7%	-10.5%	-9.0%

۳-۵. بررسی تغییرات دبی جریان ورودی به تالاب انزلی

سری زمانی دبی جریان ورودی به تالاب انزلی در دوره زمانی آینده در طی سال‌های مختلف تغییرات متفاوتی را نشان می‌دهد (شکل ۱۲). به‌طورکلی میانگین بلندمدت دبی جریان در همه سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرده است. میانگین دبی جریان ورودی به تالاب در دوره‌ی آتی (۲۰۱۷ تا ۲۰۴۰) در سناریوی SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به ترتیب برابر با ۶۶/۸، ۵۹/۲ و ۵۷/۸ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شده است (شکل ۱۳) که نسبت به میانگین دبی در دوره‌ی پایه (۶۹ مترمکعب بر ثانیه) به ترتیب با ۳/۱، ۱۴/۲ و ۱۶/۳ درصد کاهش مواجه خواهد شد. مقایسه میانگین دبی در شش‌ماهه‌ی اول و دوم سال آبی نشان داد که در سناریوی SSP2.6 ضمن افزایش میانگین سالانه دبی، اختلاف میانگین دبی در دو نیمه‌ی سال آبی نیز افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در این سناریو میانگین دبی در شش‌ماهه اول ۲۵ درصد افزایش و در شش‌ماهه‌ی دوم ۳۲/۹ درصد کاهش خواهد یافت؛ اما در سناریوی SSP8.5 میانگین دبی در هر دو نیمه‌ی سال آبی کاهش می‌یابد (جدول ۳).

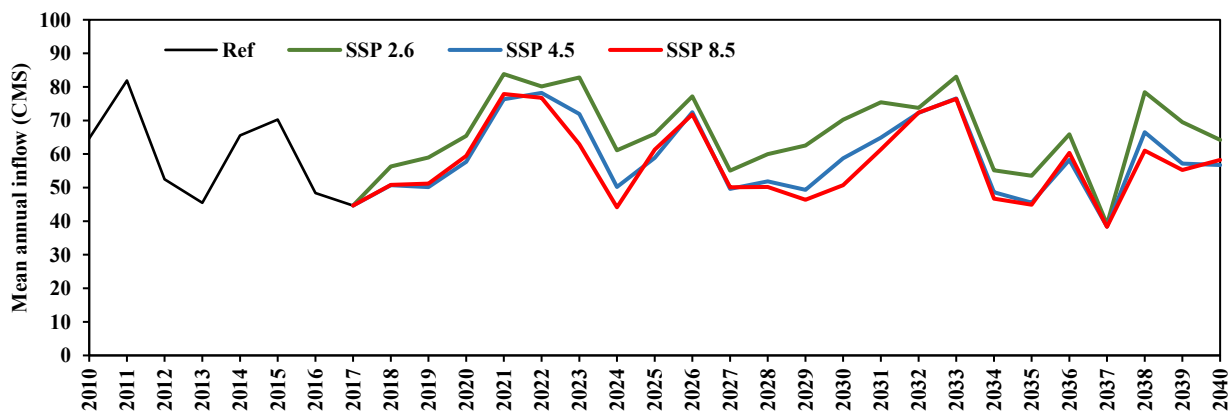


Figure 12. Annual inflow discharge to the Anzali wetland in the different climate change scenarios

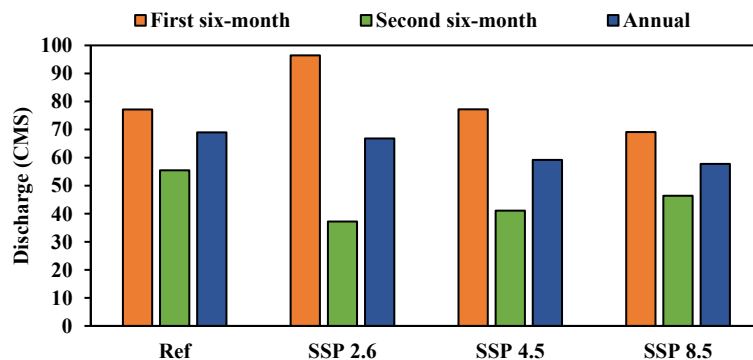


Figure 13. Average inflow discharge to the Anzali wetland in the reference period and the different climate change scenarios

Table 3. Changes in inflow discharge to the Anzali wetland under different climate change scenarios compared to the reference period

Scenarios	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5
First six-month	25.0%	0.1%	-10.5%
Second six-month	-32.9%	-25.9%	-16.3%

Scenarios	SSP 2.6	SSP 4.5	SSP 8.5
Annual	-3.1%	-14.2%	-16.3%

با توجه به نتایج بخش قبل نتیجه‌گیری شد که میانگین بارندگی در سناریوهای تغییر اقلیم بین ۰/۸ تا ۱۵/۶ درصد افزایش می‌یابد اما در نهایت با تأثیر سایر عوامل، دبی ورودی به تالاب با کاهش مواجه خواهد شد. مقادیر دبی جریان ورودی به تالاب علاوه بر رواناب سطحی ناشی از بارندگی، به آب بازگشتی که خود متأثر از نیاز آبی کشاورزی و مقدار آب تحویلی به شبکه است، بستگی دارد. لذا حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد سفیدرود و مقدار تحویلی آن به شبکه آبیاری تعیین‌کننده میزان کمبود آب در شبکه است که به دنبال آن با برداشت آب از رودخانه‌های ورودی به تالاب انزلی تا حدی مابقی نیاز آبی کشاورزی تأمین می‌شود و در نهایت دبی رودخانه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین هرچند که مقدار میانگین بلندمدت بارندگی در حوضه تالاب در همه سناریوها مقدار کمی افزایش یافته است، اما افزایش تبخیر تعرق و نیاز آبی آبیاری در شبکه از یک طرف و کاهش حجم آب سد سفیدرود از طرف دیگر باعث افزایش برداشت آب از رودخانه‌ها به‌منظور تأمین کمبود آب در بخش فومنا و مرکزی شده است. در شکل (۱۴) میانگین بلندمدت دبی برداشت آب از رودخانه‌های ورودی به تالاب نشان داده شده است. در هر سه سناریو مقدار برداشت آب افزایش یافته است به طوری که از مقدار میانگین بلندمدت ۱۸ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه به ۲۹/۶، ۲۹/۴ و ۲۸/۸ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب در سه سناریو رسیده است.

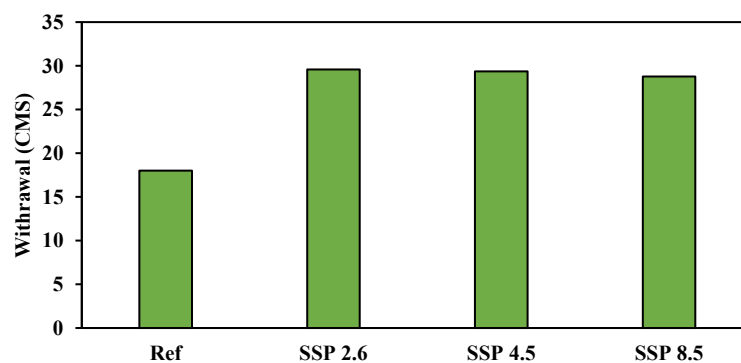


Figure 14. Average withdrawal discharge from the rivers feeding the Anzali wetland in the reference period and climate change scenarios

۴. نتیجه‌گیری

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میانگین بارندگی در حوضه‌های سد سفیدرود و تالاب انزلی نشان داد که به‌طور کلی در سناریوهای تغییر اقلیم میانگین بارندگی سالانه افزایش می‌یابد و یا حداقل ثابت می‌ماند. در حوضه سد سفیدرود در سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 تغییرات میانگین بارندگی در شش ماهه‌ی اول سال آبی افزایشی و در شش ماهه‌ی دوم کاهش‌ی است؛ اما در سناریوی SSP8.5 در هر دو نیمه‌ی سال به‌خصوص شش ماهه‌ی دوم میانگین بارندگی با افزایش روبرو خواهد شد. در حوضه تالاب انزلی نیز با افزایش شدت اثرات تغییر اقلیم از سناریوی SSP2.6 تا SSP8.5 تغییرات میانگین بارندگی در شش ماهه‌ی اول سال آبی به ترتیب افزایشی، ثابت و کاهش‌ی خواهد بود؛ اما در شش ماهه‌ی دوم سال آبی تغییرات میانگین بارندگی در هر سه سناریو افزایشی است به طوری که بیشترین افزایش در سناریوی SSP8.5 پیش‌بینی شده است.

با توجه به تغییرات مثبت میانگین بارندگی سالانه در سناریوهای تغییر اقلیم انتظار می‌رفت که مقدار جریان سالانه ورودی به سد سفیدرود و تالاب انزلی افزایش یابد اما نتایج نشان داد که در حوضه سد سفیدرود با وجود افزایش ۲/۱ تا ۴/۱ درصدی میانگین بارندگی

سالانه در طی شدیدتر شدن آثار تغییر اقلیم و افزایش میانگین ذخیره‌ی مقدار آب قابل‌عرضه به شبکه‌ی آبیاری، میانگین سالانه حجم آب ورودی به سد نسبت به دوره‌ی پایه و حتی نسبت به ۱۰ سال اخیر به دلیل بهره‌برداری از طرح‌های توسعه منابع آب در بالادست حوضه، مقدار کمتری خواهد داشت؛ بنابراین کاهش حجم ذخیره‌ی سد و آب تحویلی به شبکه باعث افزایش برداشت آب از رودخانه‌ها تا ۶۴ درصد نسبت به دوره‌ی پایه خواهد شد؛ اما حجم آب تحویلی به شبکه‌ی آبیاری در سناریوی SSP8.5 نسبت به سایر سناریوها بیشتر بوده و همین موضوع باعث کاهش کمبود آب در شبکه و به دنبال آن کاهش برداشت آب از رودخانه‌های حوضه‌ی تالاب انزلی در این سناریو نسبت به سایر سناریوها می‌شود. از طرف دیگر با افزایش تبخیر-تعرق و نیاز آبیاری شبکه با توجه به اینکه بیشترین مقدار برداشت آب از رودخانه‌های ورودی به تالاب انزلی در فصل کشت برنج (شش‌ماهه‌ی دوم سال آبی) است، لذا رودخانه‌ها در این دوره زمانی با بیش‌ترین تنش مواجه می‌شوند به‌طوری‌که نتایج نشان داد میانگین دبی در شش‌ماهه‌ی دوم سال آبی در دوره‌ی آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم بین ۱۶/۳ تا ۳۲/۹ درصد با کاهش مواجه خواهد شد و با توجه به رفتار سایر مؤلفه‌های مؤثر بر دبی ورودی به تالاب انزلی در اثر تغییر اقلیم و برآیند تغییرات در دو نیمه‌ی سال آبی، میانگین سالانه دبی ورودی به تالاب انزلی بین ۳/۱ تا ۱۶/۳ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین در اثر تغییر اقلیم، تالاب انزلی و رودخانه‌های منتهی به آن به لحاظ اکولوژیکی در معرض تهدید قرار می‌گیرند و چه‌بسا آثار زیان‌بار زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی که به این اکوسیستم‌های ارزشمند و ذینفعان آن‌ها وارد می‌شود. در نتیجه به‌منظور کاهش آثار منفی تغییر اقلیم ضرورت مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب در حوضه سد سفیدرود و پایین‌دست شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود و در نظر گرفتن تمهیداتی همچون برنامه‌ریزی مناسب در زمینه‌ی تحویل آب به شبکه، افزایش راندمان و افزایش نظارت و پایش شبکه آبیاری بیش‌ازپیش آشکار می‌شود. با توجه به محدودیت‌های مطالعه همچون عدم دسترسی به اطلاعات کافی و ساده‌سازی روابط هیدرولوژیکی و شرایط ژئومورفولوژیکی حوضه پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی از مدل‌های هیدرولوژیکی متناسب با شرایط حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم بهره گرفته شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
2. Representative Concentration Pathway
3. Vensim Personal Learning Edition
4. Global Climate Model
5. Hadley Centre Global Environment Model version 2 – Earth System
6. Hadley Centre
7. Shared Socioeconomic Pathways
8. Centre National de Recherches Météorologiques – Climate Model version 6, experiment 1
9. Copernicus
10. Change Factor
11. Long Ashton Research Station Weather Generator
12. Meteorological Research Institute – Earth System Model version 2.0

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Ahmadi, N. A., Moradi, E., Hosseini, S. M., & Sardar Shahraki, A. (2021). Simulation and dynamics of Hirmand Basin water resources system under management scenarios. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(1), 23–43. (In Persian)
- Aryal, A., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2019). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological

climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1), 193–209.

- Babolhakami, A., Gholami Sefidkouhi, M. A., & Emadi, A. (2023). Application of system dynamics model for reservoir performance under future climatic scenarios in Gelevard Dam, Iran. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(7), 1115–1129.
- Bafandeh Zende, A., Haji Hatamlou, L., & Danaye Nemat Abad, N. (2019). Modeling the causes of drying of Lake Uremia using system dynamics. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(21), 207–230.
- Barhagh, S. Ershad, Zarghami, M., Alizade Govarchin Ghale, Y., & Shahbazbegian, M. R. (2020). Investigating the impacts of restoration scenarios for Urmia Lake using predator-prey system dynamics model. *Iran-Water Resources Research*, 16(2), 1–17. (In Persian)
- Bozorg-Haddad, O., Dehghan, P., Zolghadr-Asli, B., Singh, V., Chu, X., & Loaiciga, H. (2022). System dynamics modeling of lake water management under climate change. *Scientific Reports*, 12, 1–15.
- Cerecedo Arroyo, M. E., & Martínez Austria, P. F. (2021). Dynamic water system modeling: A systematic review. *Water Practice and Technology*, 16(3), 744–755.
- Dahal, D., Bhattarai, N., Silwal, A., Shrestha, S., Shrestha, B., Poudel, B., & Kalra, A. (2025). A Review on Climate Change Impacts on Freshwater Systems and Ecosystem Resilience. *Water*, 17(21), 3052.
- Dehghani, S., Massah Bavani, A., Roozbahani, A., & Sahin, O. (2024). Assessment of climate change-induced water scarcity risk by using a coupled system dynamics and Bayesian network modeling approaches. *Water Resources Management*, 38(10), 3853–3874.
- Eslami, Z., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., & Pourmohamad, Y. (2020). Water, energy, food nexus approach impact on integrated water resources management in Sefid-Rud irrigation and drainage network. *Journal of Water and Soil*, 34(1), 11–25. (In Persian)
- Gain, A. K., Hossain, S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C., & Huq, N. (2020). Social-ecological system approaches for water resources management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), 109–124.
- Han, Z., Yin, D., Zhao, R., Liu, Z., Cheng, R., Lin, G., & Jia, H. (2024). The ecological effect of ship canals on wetlands. *Water*, 16(22), 1–21.
- Hashemi, M., Mazandarani Zadeh, H., Daneshkare Arasteh, P., & Zarghami, M. (2020). Evaluation of management policies to simultaneously maintain groundwater resources and farmers' livelihoods using system dynamics and game theory. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 1–17. (In Persian)
- Hodhodi, A., & Rabiepour, A. (2022). A review of the importance of Anzali Wetland as a considerable ecosystem and investigation of its environmental challenges.
- Hoseini Tabesh, S., & Aghashariatmadari, Z. (2020). The effect of climate change on rice irrigation requirement under SSP scenarios (case study: Anzali). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2607–2621. (In Persian)
- Hosseinpour, S., Sharafati, A., & Abghari, H. (2025). Evaluation of general circulation models in simulating spatial patterns of climate variables over various regions of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 16(5), 1782–1803.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Janatrostami, S. & Salahi, A. (2021). Equitable Allocation of Surface Water and Groundwater Resources in Foumanat Irrigation Area with Optimization Approach. *Journal of Water and Soil Science*, 25(2): 203-217.
- Karimi, M., Shokoohi, A. (2025). Development of a Quantitative–Qualitative Model for Determining the Environmental Water Requirement of Wetlands. *Wetlands* 45, 109.
- Kim, J. H., Sung, J. H., Chung, E. S., Kim, S. U., Son, M., & Shiru, M. S. (2021). Comparison of projection in meteorological and hydrological droughts in the Cheongmicheon watershed for SSP4.5 and SSP2-4.5. *Sustainability*, 13(4), 1–22.
- Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., Abolfathi, S., & Noori, R. (2023). Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: Case study of the Anzali wetland. *Scientific Reports*, 13(1), 5399.

- Mahdian, M., Noori, R., Salamattalab, M. M., Heggy, E., Bateni, S., Nohegar, A., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Fadaei, M., & Abolfathi, S. (2024). Anzali Wetland crisis: Unraveling the decline of Iran's ecological gem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*, e2023JD039538.
- Modaberi, H., & Shokoohi, A. (2020). Economic evaluation of the effects of reducing environmental water requirement of Anzali Wetland on the livelihood and income of the local communities. *Journal of Ecohydrology*, *7*(2), 481–496. (In Persian)
- Modaberi, H., & Shokoohi, A. (2021). Evaluation of the effects of exploitation of Sefidrood irrigation and drainage network on the life of Anzali Wetland. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *14*, 1939–1953. (In Persian)
- Naderi, M., & Saatsaz, M. (2020). Impact of climate change on the hydrology and water salinity in the Anzali Wetland, northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(4), 552–570.
- Nacem, K., Zghibi, A., Elomri, A., Mazzoni, A., & Triki, C. (2023). A literature review on system dynamics modeling for sustainable management of water supply and demand. *Sustainability*, *15*, 1–24.
- Palmer, T. E., McSweeney, C. F., Booth, B. B. B., Priestley, M. D. K., Davini, P., Brunner, L., Borchert, L., and Menary, M. B. (2023). Performance-based sub-selection of CMIP6 models for impact assessments in Europe, *Earth Syst. Dynam.*, *14*, 457–483.
- Pandam Consulting Engineers, 2004. Engineering Services for Improvement Studies of Guilan Sefidrood Irrigation and Drainage Network, Final report.
- Rahman, K. U., Shang, S., Balkhair, K. S., Gabriel, H. F., Jadoon, K. Z., & Zaman, K. (2024). Catchment-scale assessment of drought impact on environmental flow in the Indus Basin, Pakistan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *24*(6), 2191–2214.
- Sachindra, D. A., Ahmed, K., Rashid, M. M., Shahid, S., & Perera, B. J. C. (2018). Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. *Atmospheric Research*, *212*, 240–258.
- Vinten, A., Kuhfuss, L., Shortall, O., Stockan, J., Ibiyemi, A., Pohle, I., Gabriel, M., Gunn, I., & May, L. (2019). Water for all: Towards an integrated approach to wetland conservation and flood risk reduction in a lowland catchment in Scotland. *Journal of Environmental Management*, *246*, 881–896.
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, *250*, 105369.
- Zarezadeh, M., Morid, S., Salvitabar, A., & Madani, K. (2012). Evaluating the impacts of climate change and new developments on water scarcity in Iran's Qezelozan-Sefidrood River Basin. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *6*(2), 93–104.
- Zhang, M., & Chui, T. F. M. (2025). A multiagent socio-hydrologic framework for integrated green infrastructures and water resource management at various spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, *29*(12), 2655–2672.

Investigating The Effect Of Climate Change On Inflow To The Anzali Wetland Using Systems Dynamics

Hamed Mazandarani Zadeh¹✉ | Morteza Karimi²

1. Corresponding Author, Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir
2. Ph.D. Student, Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: morteza.karimi.91@gmail.com

Abstract

Climate change, along with extensive water development in upstream basins, has altered the balance of water allocation and intensified water scarcity and conflicts among stakeholders. Considering the close interlinkage of water resources with socio-economic and environmental systems, inadequate integrated water management can lead to significant implications across these sectors. This study investigates the impacts of climate change on surface water resources and demands in the Sefidrood basin and Anzali Wetland watershed, and subsequently examines potential changes in inflow discharge to Anzali Wetland using a system dynamics modeling approach. Precipitation projections from the CMIP6 framework under SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 scenarios for the period 2017–2040 were utilized, and the subsystems of the Sefidrood basin, Anzali Wetland catchment, and part of the irrigation–drainage network were simulated in VensimPLE. Results indicate that despite projected increases in mean precipitation, the rising upstream water withdrawals and future agricultural water demand may reduce the annual average inflow to Anzali Wetland by approximately 3.1% to 16.3%. Moreover, given the critical importance of the second half of the water year for irrigation supply, average river inflow during this period is expected to decline by 16.3% to 32.9% across scenarios.

Keywords: System Dynamics Modeling, Climate Change, River Discharge, CMIP6, Vensim.