

ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم و الگوی اقیانوسی

(منطقه مورد مطالعه: حوزه آبریز گاوخونی)

مازیار مسعودیان^۱ - حمید کاردان مقدم^{۲*} - سیده هدی رحمتی^۳

دانش آموخته مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران

استادیار گروه مهندسی محیط زیست - منابع آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده:

این مطالعه ارزیابی اثر تغییر اقلیم و پدیده انسو را بر منابع آب حوزه آبریز گاوخونی مورد تحلیل قرار گرفت. از دو مدل شبیه سازی اقلیمی CESM2 و IPSL-CM6A-LR برای شبیه سازی تغییر اقلیم و پدیده النینو و لانینو به عنوان دو پدیده اقیانوسی استفاده شد. نتایج شبیه سازی اقلیمی برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ نشان داد که متوسط بارش در کل حوزه در حد ۱۴ میلیمتر کاهش و متوسط دما ۰/۹۴ افزایش داشته است. بررسی شرایط آبی حوزه در شرایط توسعه حاکی از کسری MCM ۴۱۱ منابع آب زیرزمینی است که در شرایط تغییر اقلیم این کسری افزایش و تا MCM ۴۳۱ می رسد. نتایج شبیه سازی در پدیده انسو نیز نشان داد که در رخداد النینو وضعیت منابع آب بهبود یافته و میزان کسری به MCM ۳۱۱ و در رخداد لانینو به MCM ۴۸۱ می رسد. میزان تاثیر گذاری النینو به عنوان یک پدیده اقیانوسی بصورت مثبت و لانینو و سناریوهای تغییر اقلیم بصورت منفی مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان عدم قطعیت کسری منابع آب زیرزمینی در دو پدیده اقیانوسی جمعی بالغ بر ۱۶۳ میلیون مترمکعب در سال و در سه سناریوی تغییر اقلیم، MCM ۱۴ شبیه سازی شد. ۴ راهکار انتقال آب (S1)، کاهش بهره برداری از منابع آب زیرزمینی (S2)، افزایش بهره برداری آب در بخش کشاورزی (S3) و افزایش راندمان کشاورزی (S4) در این شرایط مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه انتقال آب و کاهش بهره برداری می تواند در بیلان منابع آب زیرزمینی تاثیر زیادی داشته باشد اما با توجه به ملاحظات محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی می توان از راهکارهای افزایش بهره برداری و راندمان نتایج مناسبی را بدست آورد.

کلمات کلیدی: حوزه آبریز گاوخونی، عدم قطعیت، افزایش بهره برداری آب، راندمان

۱- مقدمه

افزایش فعالیت های انسانی سبب افزایش غلظت گازهای گلخانه ای شده که افزایش غلظت این گازها درست مانند یک پتو جو زمین را احاطه کرده و مانع از بازتاب نور تابیده خورشید به زمین و خروج آن از جو می شود که محبوس شدن تابش خورشید در جو زمین لاجرم باعث گرم شدن کره زمین و نوسانات اقلیمی گردیده است. نگرانی های زیادی در مورد اثرات تغییر اقلیم بر سیستم های مختلف وجود دارد. بیشتر مباحثی که اکنون در خصوص گرمایش زمین وجود دارد بررسی رخداد و یا عدم رخداد آن نیست چراکه اکنون دیگر وجود آن محرز می باشد بلکه آن است که چگونه تغییرات و حساسیت های اقلیم خواه متأثر از طبیعت و خواه متأثر از فعالیت های انسانی موجب افزایش غلظت دی اکسید کربن می گردد چرا که شواهد مبین آن است که CO₂ جو نقش مهمی در تعیین اقلیم و احیاناً تکوین حیات خود دارد [۱]. گزارش های مختلف هیأت بین دول تغییر اقلیم^۱ (IPCC)، تغییر اقلیم را به عنوان تغییر در وضعیت اقلیم (تغییر در مقادیر میانگین و یا تغییرپذیری خصوصیات اقلیم) تعریف می نماید که هرگونه تغییر در اقلیم در طول زمان،

* نویسنده عهده دار مکاتبات : hkardan@wri.ac.ir

چه در اثر عوامل طبیعی و چه در اثر فعالیت‌های انسانی را شامل می‌گردد. در این میان تنها عاملی که به صورت غیرطبیعی بر سیستم اقلیم کره زمین تأثیر می‌گذارد، افزایش گازهای گلخانه‌ای است. گازهای گلخانه‌ای نقش بسزایی در بروز تغییرات دمای کره زمین ایفا می‌کنند. به عنوان مثال بر طبق گزارش (CDFW^۲) در پی تأثیرات مخرب و بروز نا به هنجاری‌های متأثر از گرم شدن زمین، انگلی تحت عنوان Ceratonova shasta در دریاچه Klamath واقع در کرانه غربی امریکا نمو پیدا کرده است که موجب مرگ سالمون های جوان این دریاچه شده و به تبع آن صنعت شیلات در این منطقه دستخوش تهدید قرار گرفته است [۲]. اثرات تغییر اقلیم به صورت مستقیم بر میزان آبدهی سطحی و به طور غیرمستقیم بر میزان ذخیره‌ی آبخوان‌ها تأثیرگذار است. ارتباط تنگاتنگی بین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی و سیستم اقلیمی وجود دارد که سبب می‌شود که اثرگذاری مستقیمی بر هم داشته باشند. میزان رواناب، آبدهی رودخانه، منابع آب زیرزمینی، شدت سیلاب و خشکی، همگی متأثر از مهم‌ترین عناصر اقلیمی (دما و بارش) هستند [۳]. در ایران نیز با بررسی وضعیت رودخانه‌ها و حوزه‌های آبریز طی ۲۵ سال اخیر، ۳ دوره نشست آب مشهود است [۴]. براساس این موضوع ۵۰٪ منابع آب کشور از دست رفته تلقی می‌شود که این میزان شامل منابع آب تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر می‌باشد. با توجه به آن که آب، یکی از گران‌بهارترین منابع ملی کشور است و از سوی دیگر در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارد، لذا بررسی تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب و به طور خاص بر رواناب، می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های آینده مدیریت منابع آب باشد. از طرف دیگر، علاوه بر اثرات تغییر اقلیم که ناشی از فعالیت‌های صنعتی انسان است، الگوهای دورپیوند نیز در سطح اقیانوس‌ها وجود دارد که این الگوها به تغییرات فشار و گردش عمومی جوی- اقیانوسی گفته می‌شود که بر روی سطح وسیعی از متغیرهای هواشناسی بر روی کره زمین (دورتر از هزاران کیلومتر) تأثیرگذار است [۵]. این پدیده‌ها در زمان رخداد بین چند هفته تا سال بر متغیرهای هواشناسی یک منطقه تأثیرگذار بوده و این الگوها باعث تغییرات مختلفی در چرخه کلان منابع آب یک منطقه می‌شوند [۶]. الگوهای دورپیوندی یکی از عوامل مؤثر هیدروکلیماتولوژیکی در پیش‌بینی بارش، دما و دبی در مقیاس بزرگ می‌باشند. از طرفی، مدیریت جامع و یکپارچه منابع آب ایجاب می‌کند که بتوان متغیرهای بارشی و در نتیجه دبی حاصل از رواناب آن را پیش‌بینی نمود. الگوهای دورپیوندی از دیدگاه دینامیکی و سینوپتیکی می‌توانند بر الگوی بارشی مناطق مختلف مؤثر باشند [۷]. با توجه به مطالعات انجام شده و تأیید اثر تغییر اقلیم و الگوهای دورپیوند بر وضعیت منابع آب، ارزیابی این دو پدیده در کنار هم نقش موثری در مدیریت منابع آب خواهد داشت [۸]. مثلاً طی بررسی اثر الگوهای دورپیوند بر خشکسالی‌های فراگیر سالانه و زمستانه استان سیستان و بلوچستان شاخص‌های دور پیوند فعال نیمکره شمالی در فصل زمستان و همچنین شاخص چند متغیره انسو (MEI) با شاخص (SPI) مقایسه گردید و در نهایت با استفاده از آزمون‌های همبستگی و مدل رگرسیونی نهایتاً مشخص گردید که این الگوها در مجموع ۵۵ درصد از تغییرات شاخص (SPI) را تبیین می‌نمایند و الگوی اسکندیناوی که معنی‌دارترین همبستگی را با شاخص (SPI) دارد، به عنوان مؤثرترین الگوی تبیین کننده خشکسالی تعیین شد [۹]. مطالعات متعددی روی موضوع اثر تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات (Delage and Power (2020), Santidrian Tomillo et al (2020), Osgood et al (2021), Wengel et al (2021), Hendrix et al (2022), Alizadeh (2022)، اشاره داشت که به ارزیابی و شناخت تأثیرگذاری این دو پدیده پرداخته شده و روی موضوع سازگاری آنالیز نشده است [۱۰-۱۵]. یکی از مناطق پرچالش از نظر تامین و تخصیص منابع آب، حوضه آبریز گاوخونی در بخش مرکزی کشور است. این حوضه با شرایط خاص از نظر کشاورزی و صنعتی و طرح‌های انتقال آب همواره با تنش‌های اقتصادی-اجتماعی مواجه بوده که مدیریت این موضوع نیاز به درک مناسب از میزان منابع آب موجود است. با توجه به حساسیت و آسیب‌پذیری منابع آب تحت تنش‌های اقلیمی اعم از تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی، این مطالعه با هدف شناخت میزان تأثیرگذاری و همچنین تدوین یک چارچوب پویا بدنبال شناخت ابعاد آسیب‌پذیر و بدنبال آن ارائه راهکارهای سازگاری در سیستم عرضه و تقاضای منابع آب است. این منطقه با حجم بالای بهره‌برداری بصورت کشاورزی سنتی و شبکه‌های آبیاری در کنار توسعه صنعتی در شهر اصفهان و اطراف آن قرار دارد. لذا برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب می‌بایست بگونه‌ای باشد تا کمترین تعارضات ایجاد گردد. یکی از جنبه‌های برهم خوردن سیستم تخصیص، عدم توزان مناسب بارش از نظر زمانی و

مکانی است که تحت تاثیر تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی می‌تواند تغییر یابد. لذا شناسایی این موضوع و تدوین راهکار می‌تواند نقش مهمی در تعدیل تنش‌های منطقه‌ای داشته باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- متدولوژی پژوهش

مطالعات جامع منابع آب و وضعیت آمایش حوضه آبریز گاوخونی نشان می‌دهد که تامین آب قریب به ۵ میلیون نفر از ساکنان این منطقه در استان‌های اصفهان، چهارمحال بختیاری، یزد و مرکزی و همچنین تامین آب صنایع بزرگی همچون کارخانه ذوب آهن، مجتمع فولاد مبارکه، پالایشگاه اصفهان، پلی اکریل و صنایع وابسته به آن و ده‌ها مجتمع صنعتی دیگر به عهده این رودخانه است. مهمترین منبع تامین آب در این منطقه رودخانه زاینده‌رود است که با توجه به طرح‌های متعدد انتقال آب، بخش اعظم نیازها را تامین می‌کند. از طرفی این رودخانه تامین آب کشاورزی دشت‌های بزرگی همچون نکوآباد، برخوار، مهیار و رودشین را در وسعتی بالغ بر ۲۰۰ هزار هکتار عهده‌دار می‌باشد. از طرفی نیز با توجه به روند گرمایش زمین و اثرات تغییر اقلیم، روند بیلان منابع آب می‌تواند تحت تاثیر سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار گرفته و در افزایش یا کاهش خسارات تاثیرگذار باشد. همچنین با توجه به الگوهای بزرگ‌مقیاس، پدیده‌های اقیانوسی نیز می‌تواند در تغییر رفتار هیدرولوژیکی این حوضه تاثیرگذار باشد لذا این مطالعه بدنبال ارزیابی و تدوین راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی است. براین اساس روش انجام پژوهش در ۶ گام بشرح زیر تعریف و روندنمای انجام در شکل (۱) ارائه شده است.

گام اول) ارزیابی وضعیت منابع و مصارف آب.

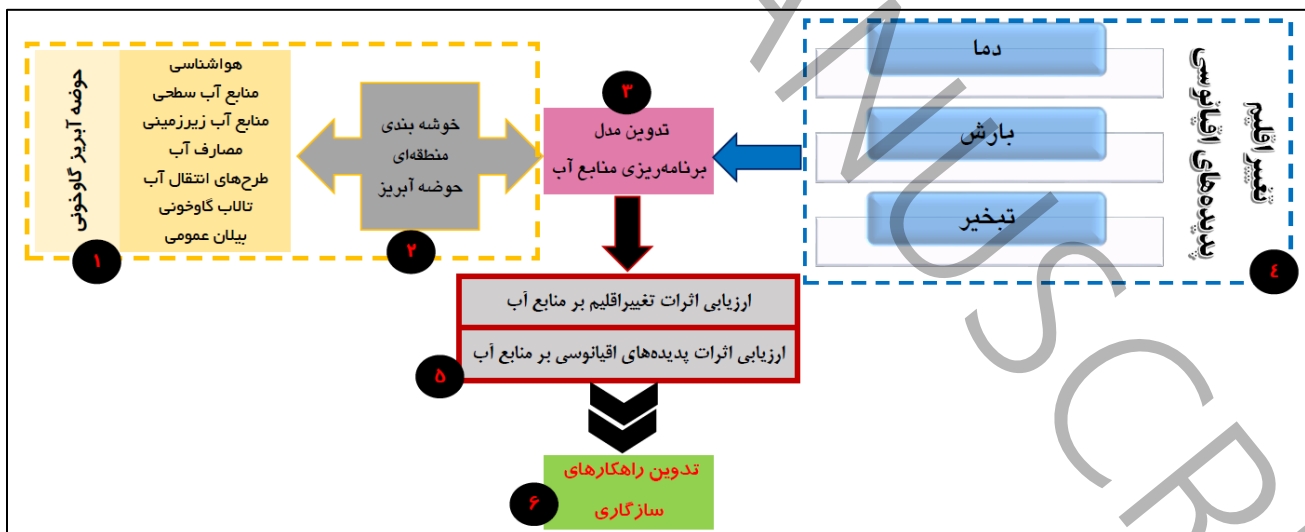
گام دوم) تقسیم‌بندی حوضه آبریز گاوخونی.

گام سوم) تدوین مدل بیلان منابع آب.

گام چهارم) شبیه‌سازی تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی.

گام پنجم) ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی بر وضعیت منابع آب.

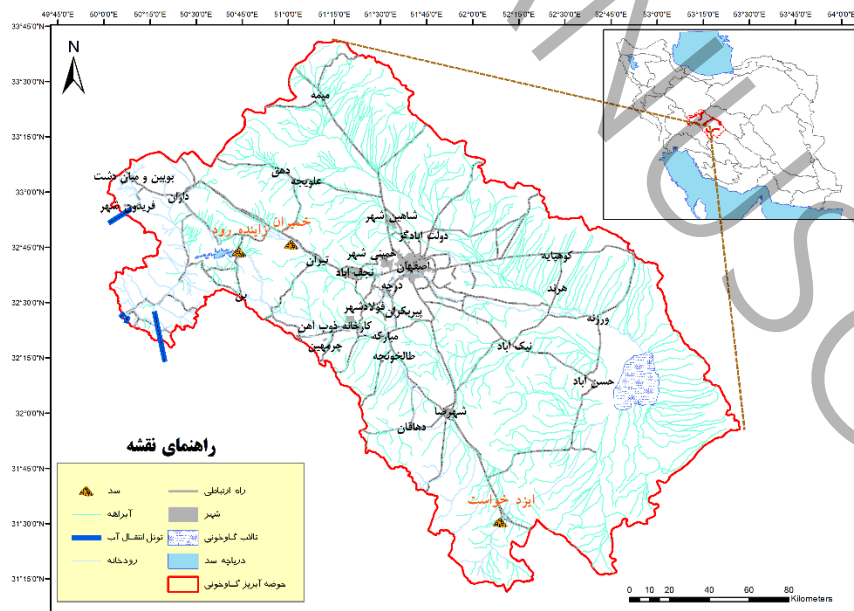
گام ششم) تدوین راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم و پدیده‌های اقیانوسی.



شکل (۱) - روندنمای انجام پژوهش
Figure 1. Flowchart of this research

۲-۲- حوضه آبریز گاوخونی

حوضه آبریز گاوخونی یکی از مهمترین حوضه آبریز درجه ۲ کشور با مساحت ۴۱۵۵۰ کیلومترمربع یکی از ۹ حوضه آبریز فلات مرکزی ایران است که مابین دو رشته کوه البرز و زاگرس در بخش مرکزی ایران واقع شده است. این حوضه آبریز از دو بخش اقلیمی متفاوت تشکیل شده است، قسمت غربی آن کوهستانی با ارتفاع زیاد و آب و هوای سردتر بوده و در بخش شرقی و جنوب شرقی با ارتفاع و میزان بارندگی کمتر، دارای آب و هوای گرمتری نیز می باشد. رودخانه اصلی و مهم این منطقه رودخانه زاینده رود است که شاخه اصلی آن از ارتفاعات کوهرنگ سرچشمه و از غرب به شرق این حوضه در جریان است. این رودخانه پس از طی مسافتی معادل ۳۵۰ کیلومتر و اتصال شاخه‌های متعدد به آن و با عبور از شهر اصفهان، سرانجام به باتلاق گاوخونی می‌ریزد. از مراکز عمده جمعیت در این حوضه آبریز، می‌توان شهرهای اصفهان، نجف آباد، شهرضا، زرین شهر، مبارکه، فولادشهر، فلاورجان، شاهین شهر، سپاهان شهر، بهارستان، خمینی شهر، داران، میمه و مورچه خورت را نام برد. راههای ارتباطی منطقه نیز بیشتر در شمال و شمال غربی حوضه آبریز قرار داشته و بخصوص در اطراف اصفهان طول راهها نسبتاً زیاد می‌باشد. بخشی از راه اصلی راه آهن تهران به کرمان نیز در این حوضه واقع شده است. رودخانه زاینده‌رود از بخش شرقی ارتفاعات زاگرس میانی رودخانه زاینده‌رود سرچشمه و در جهت شمال غرب به سمت جنوب شرق جریان دارد. منبع اصلی تامین آب این رودخانه جریان آن را چشمه سارها و جریانهای ناشی از ذوب برف می‌باشد و پس از طی مسافتی حدود ۵۰ کیلومتر، رودخانه پلاسجان از سمت چپ به آن اضافه می‌شود که دبی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود را تشکیل می‌دهند. همچنین جریان انتقالی از تونل‌ها از حوضه آبریز کارون نیز به مخزن این سد جهت تامین آب اضافه می‌شود. تونل‌های کوهرنگ و تونل خدنگستان اصلی ترین عوامل جریان سطحی ورودی به حوضه زاینده رود می باشند که در مجموع ۷۱۴ میلیون مترمکعب آب به طور متوسط وارد این رودخانه می کنند. این رودخانه پس از عبور از سد زاینده‌رود با الحاق رودخانه های دیگری بنامهای شور دهاقان، مرغاب و دستکن وارد شهر اصفهان می‌شود و در انتها به باتلاق گاوخونی وارد می‌شود. رودخانه پلاسجان یکی از سرشاخه‌های الحاقی به رودخانه زاینده‌رود در بالادست سد می‌باشد. این رودخانه از ارتفاعات داران سرچشمه گرفته که پس از الحاق شاخه بوئین به آن از ساحل چپ وارد دریاچه سد زاینده رود می‌شود. در شکل (۲) موقعیت محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی ارائه شده است.



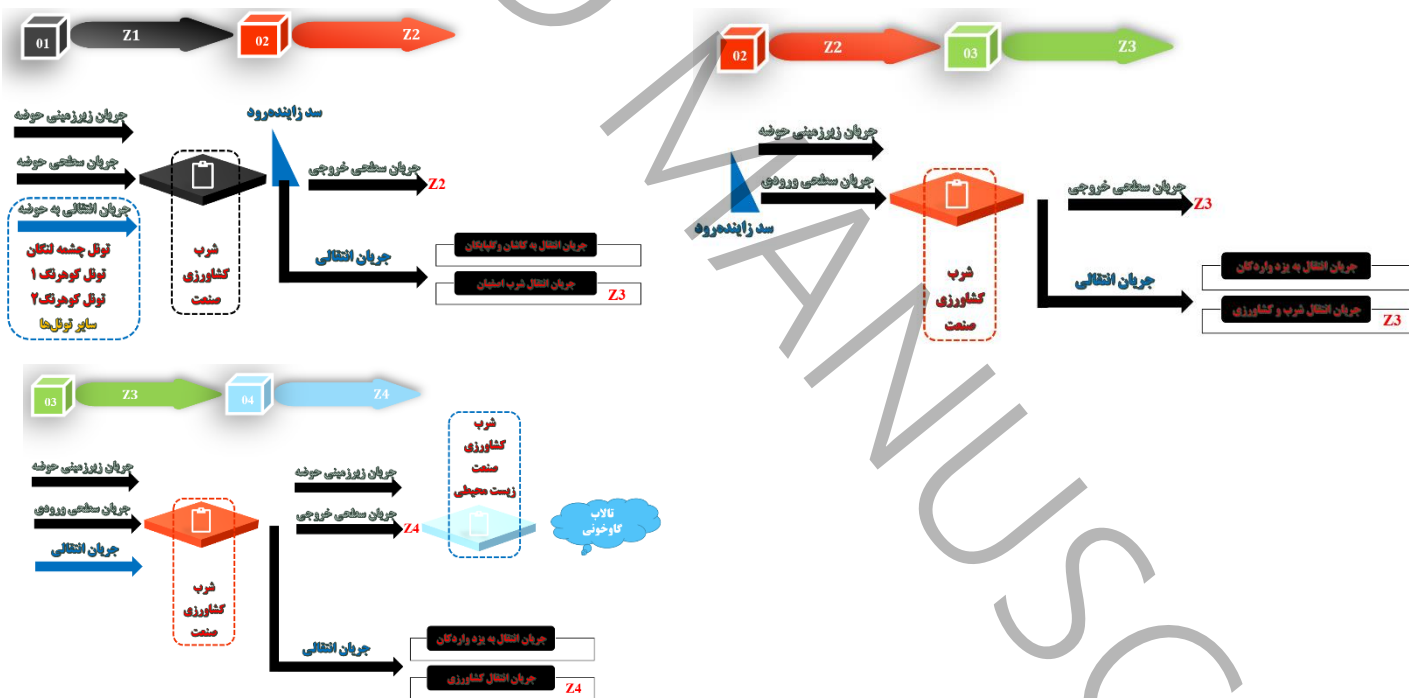
شکل (۲) - موقعیت حوضه آبریز گاوخونی

Figure 2. The location of the Gaukhoni watershed

با توجه به وضعیت حوضه آبریز گاوخونی، خوشه‌بندی حوضه در ۴ منطقه انجام می‌گیرد. خوشه اول در بالادست سد زاینده‌رود انتخاب می‌شود که ۶ محدوده مطالعاتی در آن واقع شده است. این خوشه دارای شرایط اقلیمی خاص نسبت به سایر بخش‌های حوضه گاوخونی است و علاوه بر متوسط بالای بارش، دارای جریان سطحی قابل توجه و جریان‌های انتقالی حوضه است. خوشه دوم در پایین‌دست سد زاینده‌رود و بخش میانی حوضه آبریز واقع شده است. این خوشه تحت تاثیر جریان ورودی و انتقالی از سد به سایر بخش‌های حوضه قرار داشته و در طی ۲ دهه اخیر حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نیز در این خوشه افزایش داشته است. خوشه سوم مربوط به بخش انتهایی حوضه قبل از تالاب بوده که از نظر سیاسی و صنعتی غنی است. بخش اعظم جریان انتقالی به این محدوده وارد می‌شود. خوشه چهارم بخش جنوبی تالاب گاوخونی است که جریان‌ات مربوط به ۵ محدوده مطالعاتی در نهایت وارد تالاب می‌گردد.

۲-۳- تدوین مدل بیلان منابع آب

با توجه به خوشه‌بندی حوضه آبریز گاوخونی به چهار خوشه، مدل بیلان منابع آب با استفاده از مدل کدنویسی شده طراحی گردید. در ابتدا براساس بیلان منابع و مصارف در ۴ خوشه، مطابق شکل (۳-۹) مدل مفهومی بیلان و چرخه آب با رویکرد محیط‌زیست و تامین آب برای مصارف مختلف تعریف شد. مبنای علمی مدل مفهومی براساس توازن هیدرولوژیکی و ارتباط هیدرولیکی بین ۴ خوشه تعریف شد.



شکل (۳) - مدل مفهومی بیلان منابع آب

Figure 3. Conceptual model of water resource

به منظور شبیه‌سازی مدل بیلان منابع آب در سطح حوزه آبریز گاوخونی از کدنویسی دینامیک در محیط Excel استفاده می‌شود. این مدل مبتنی بر بیلان هیدروکلیماتولوژی، آب زیرزمینی و عمومی تعریف شده است.

در مدل‌های جفت شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو (گردش کلی) ارائه شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، روابط توصیف‌کننده رفتار جو بر مبنای شبکه‌ای سه‌بعدی که نشان‌دهنده سطح افقی کره زمین و ارتفاع عمودی جو است، حل می‌شوند. به عبارتی مدل‌های AOGCM، حل معادلات حاکم بر جو، بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک هستند به طوری که قوانین نیوتن در سه محور X، Y و Z به همراه قوانین عمومی گازها و ترمودینامیک، اساس این مدل‌ها را تشکیل می‌دهند. در این مدل‌ها هر یک از اجزاء اقلیم کره زمین (جو، اقیانوس، سنگ کره، یخ کره و زیست کره) در شبکه‌های سه‌بعدی، به طور جداگانه در ۱۰ تا ۲۰ لایه در جو و ۳۰ لایه در اقیانوس حل می‌شوند و سپس تمام مدل‌های وابسته به جو و اقیانوس باهم جفت شده و مدل‌های AOGCM را تشکیل می‌دهند. دقت مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی‌های کره زمین حدود ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن برابر یک کیلومتر می‌باشد. در حالی که دقت مکانی قائم در اقیانوس‌ها ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و دقت مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. پیشنهاد اولیه برای طراحی مدل‌های مبتنی بر گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) در سال ۲۰۱۴ ارائه گردید که پس از دریافت بازخورد این نسخه اولیه، دو پنل CMIP^۲ و کارگروه مدل‌های جفت شده WGCM^۴ آن در اکتبر سال ۲۰۱۴ نهایی و از سال ۲۰۱۷ اجرای این مدل‌ها شروع شده و تاکنون ادامه دارد. نظر به محدودیت در میزان دسترسی به آمار و اطلاعات دوره پایه و آتی و با توجه به مطالعات انصاری و همکاران (۱۴۰۱) دو مدل IPSL-CM6A-LR و CESM2 برای تحلیل تغییر اقلیم در حوضه آبریز گاوخونی انتخاب می‌شود. مدل IPSL-CM6A-LR آخرین نسخه از مدل آب و هوای IPSL است که مبتنی بر مدل فیزیکی اتمسفر-زمین-اقیانوس-دریا یخ عمل می‌کند [۱۶]. این مدل مبتنی بر عملگرهای تشعشع، باد، دما و بارش شبیه‌سازی را مورد تحلیل قرار داده که نسبت به نسخه‌های قبلی بهبود دارد. از طرفی نیز عدم شناخت مناسب از همگرایی دوگانه مناطق گرمسیری، دینامیک بودن نوسانات النینوی جنوبی و عدم فراوانی مناسب در ارزیابی در زمستان در عرض‌های میانی از سایر محدودیت‌های این مدل است. پیکربندی استاندارد این مدل جفت شده در موسسه Pierre-Simon Laplace (IPSL) انجام گرفته که شامل مدل سطح زمین، مدل اقیانوس، مدل اتمسفر و مدل یخ دریا است. وضوح مدل اتمسفر ۱۴۴ × ۱۴۳ نقطه در طول و عرض جغرافیایی و ۷۹ لایه عمودی (با حداکثر ارتفاع حدود ۸۰ کیلومتر) است. این با وضوح افقی متوسط نسخه مدل قبلی (IPSL-CM5A-MR) مطابقت داشته اما تعداد لایه‌های عمودی تقریباً دو برابر شده است [۱۷]. سیستم زمین جامعه مدل ۲ (CESM2) جدیدترین مدل سیستم زمین است که توسط مرکز ملی تحقیقات جوی با همکاری جامعه دانشگاهی توسعه یافته است و در اکثر اجزا در مقایسه با نسل قبلی خود (CESM1) به طور قابل توجهی پیشرفت کرده است [۱۸]. این مدل مبتنی بر گردش اتمسفر در مقیاس بزرگ ارزیابی شده که زمینه بیشتر از طریق مقایسه با گروه بزرگ CESM1 و سایر مدل‌های پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP5) و CMIP6 است. در مقایسه با مدل CESM1، CESM2 به طور قابل توجهی در نمایش مسیرهای طوفان، امواج ثابت نیمکره شمالی (NH)، مسدود کردن زمستان NH و گردش جهانی واگرا بهبود یافته است. از طرفی در بسیاری از این ویژگی‌ها در بین ۱۰٪ مدل‌های کلاس CMIP قرار داشته و برخی از ویژگی‌های گردش نیمکره جنوبی (SH) در آن کاهش دارد مانند قدرت جت SH، امواج ساکن و مسدود شدن. این تحلیل همچنین کاستی‌های سیستماتیک دیگر را نیز شامل می‌شود که مانند تمایل مداوم برای قرار گرفتن جریان جت SH به سمت استوا، غرب اقیانوس اطلس شمالی بیش از حد قوی بر روی اروپا، مسیرهای طوفان با اندازه‌گیری کم -سطح واریانس باد نصف النهاری بسیار ضعیف است و فقدان انسداد در بخش اقیانوس اطلس شمالی [۱۹]. از طرفی نیز بررسی نتایج انصاری و همکاران حاکی از این موضوع است که این دو مدل در این حوضه آبریز نسبت به سایر مدل‌ها دارای دقت بالاتری است [۲۰]. برای اساس پارامترهای اقلیمی برای دوره پایه در بازه زمانی سالهای ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ میلادی شبیه‌سازی می‌شود. به منظور یکسان‌سازی بازه زمانی دوره پایه مدل‌های اقلیمی با دوره مشاهداتی، اطلاعات دوره پایه مدل‌های اقلیمی از سال ۱۹۹۵ میلادی تا سال ۲۰۱۴ از ۲ مدل به صورت ماهانه استخراج گردید.

به منظور ارزیابی و شبیه‌سازی تغییر اقلیم در هریک از ۴ خوشه در نظر گرفته شده، یک ایستگاه مبنا که دارای طول دوره آماری مناسب است انتخاب گردید. ایستگاه داران فریدن در خوشه Z1، نجف‌آباد در خوشه Z2، ایستگاه اصفهان در خوشه Z3 و ایستگاه یزدخواست در خوشه Z4 انتخاب شد. در انتخاب ایستگاه‌ها علاوه بر طول دوره آماری، نوع ایستگاه و مرکزیت آنها در هر خوشه نیز در نظر گرفته شده است. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، شبیه‌سازی دوره پایه برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ انجام و نتایج براساس شاخص‌های آماری مورد سنجش قرار می‌گیرد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده شد. در این روش برای عامل دما، تغییر براساس تفاضل و برای بارش براساس نسبت داده‌های GCM استفاده شد. این روز ابتدا در دوره پایه ارزیابی و پی از تأیید برای دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبه عامل تغییر، برای دما عامل تغییر به مقدار دمای دوره پایه اضافه و برای بارش عامل تغییر در مقدار بارش دوره پایه ضرب می‌شود تا مقادیر تصحیح شده دما و بارش برای دوره پیش‌بینی بدست آید. نحوه محاسبه بصورت روابط زیر ارائه شده است.

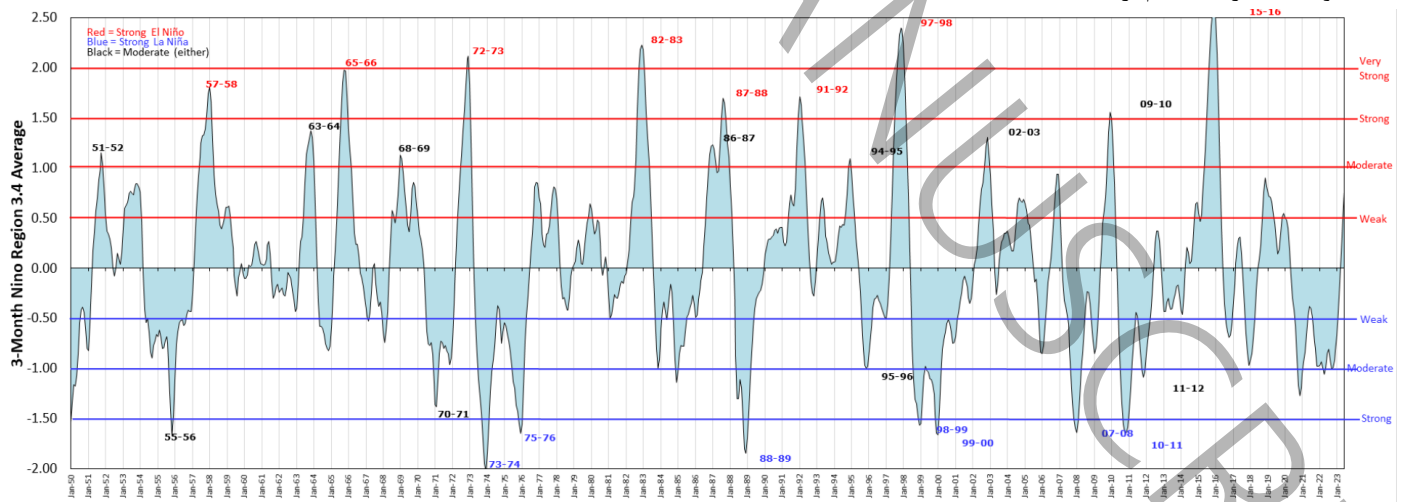
$$T_0^f = T_0 + (\mu_m^f - \mu_m^c) \quad (1)$$

$$P_0^f = P_0 * \frac{\mu_m^f}{\mu_m^c} \quad (2)$$

در این روابط T دما برحسب درجه سانتیگراد، P مقدار بارش برحسب میلیمتر، f دوره آینده، c دوره پایه، m داده‌های مدل و 0 داده‌های مشاهداتی است.

۲-۵- ارزیابی اثر پدیده‌های اقیانوسی النینو

بررسی‌های آماری نشان می‌دهند که وقوع پدیده ال‌نینو می‌تواند باعث افزایش بارش‌های موسمی و بارش‌ها در فصول سرد در ایران شود. به منظور ارزیابی اثرات این پدیده، از دوره آماری و رفتار نزولات آسمانی در گذشته برای شرایط آتی استفاده گردید. براین اساس سالهای وقوع النینو مشخص و براساس آن تغییرات بارش و دما که باعث تغییرات در بهره‌برداری و شرایط منابع آب می‌شود مشخص می‌شود. در شکل (۴) نوسانات اقلیمی این پدیده اقیانوسی که از سایت (<http://origin.cpc.ncep.noaa.gov>) استخراج شده است نمایش داده شده است. مطابق شکل پدیده انسو در سه کلاس رخداد ضعیف، متوسط و قوی برای دو پدیده النینو و لانینا با توجه به شرایط اقلیم ارائه شده است.



شکل (۴) - نوسانات اقلیمی النینو

Figure (4) - El Niño climatic fluctuations

به منظور تحلیل شاخص النینو و لانینا بر منابع آب حوزه گاوخونی و اثرات آن سال آبی ۱۶-۲۰۱۵ برای النینو و ۱۱-۲۰۱۰ برای لانینا انتخاب و در مدل‌سازی استفاده می‌شود.

۲-۶- ارزیابی شرایط توسعه در حوضه آبریز گاوخونی

یکی از مهمترین ابعاد در ارزیابی شرایط آینده در بررسی منابع و مصارف آب تحت هر شرایط اقلیمی، در نظر گرفتن پتانسیل توسعه براساس اسناد آمایش منطقه است. براین اساس با در نظر گرفتن افق طرح برای سال ۱۴۲۰، حجم آب قابل دسترس از منابع آب سطحی و زیرزمینی، تغییر وضعیت کشاورزی و نیاز خالص و ناخالص آبیاری و میزان بهره‌وری آب در هر محدوده مطالعاتی محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت.

۲-۷- تدوین راهکارهای مدیریت منابع آب

یکی از رویکردهای مطالعات تغییر اقلیم، دستیابی به راهکارهایی به منظور سازگاری یا مدیریت منابع آب با شرایط احتمالی ایجاد شده در آینده است. براین اساس با توجه به هدف این مطالعه که ارزیابی از وضعیت منابع و مصارف آب در حوضه آبریز گاوخونی است مجموعه‌ای از راهکارهای مدیریت منابع آب با هدف تامین حبابه زیست محیطی، تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی تعریف می‌شود. این راهکارها عبارتند از:

الف) افزایش انتقال آب از حوزه سد کارون با فعالیت تونل شماره ۳ کوهرنگ و تونل بهشت‌آباد (S1): اجرای این راهکار در راستای اجرای تونل‌ها و عدم بهره‌برداری تاکنون می‌تواند در منابع آب حوزه گاوخونی تاثیر مثبت داشته باشد اما اثرگذاری این راهکار بر حوزه مبدا باید تحلیل گردد.

ب) کاهش بهره‌برداری از منابع آب حوزه (S2): این راهکار می‌تواند در راستای طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی که در یک دهه اخیر مورد اجرا است با همکاری کشاورزان منطقه تعریف و اجرا شود. در سالهای اخیر پتانسیل بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی کاهش داشته که عملاً باعث شده تا بهره‌برداران همکاری خوبی با شرکت‌های آب منطقه‌ای داشته باشند.

ج) افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به میزان ۱ و ۲/۵ درصد (S3): یکی از مهمترین اهداف در برنامه‌های توسعه افزایش بهره‌وری آب و زمین است که عملاً با استفاده از راهبردهای مختلفی از جمله الگوی کشت قابلیت پیاده‌سازی را دارد. از طرفی نیز اصلاح عملیات کشاورزی و بهره‌برداری از محصول و استفاده از ابزارهای توسعه اقتصادی می‌تواند در ارزشمندی بهره‌برداری از آب که عملاً افزایش بهره‌وری است تاثیرگذار باشد.

د) افزایش راندمان بخش کشاورزی (S4): افزایش راندمان بخش کشاورزی با توجه به کشاورزی سنتی از محل تامین آب تا مصرف می‌تواند در کاهش مصرف آب بخصوص در بخش کشاورزی تاثیر داشته باشد.

نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی وضعیت فعلی منابع آب حوضه

ارزیابی وضعیت فعلی منابع آب در ۴ منطقه خوشه‌بندی شده براساس آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده مورد آنالیز قرار گرفت. براین اساس بیلان منابع آب، بیانگر وضعیت بهره‌برداری و امکان توسعه در یک محدوده است. بطور کلی بیلان آب در یک محدوده شامل بخش‌های اصلی بیلان هیدروکلیماتولوژی در دشت و ارتفاعات، بیلان آب‌های سطحی، بخش مصارف آب سطحی و زیرزمینی و همچنین بیلان آب زیرزمینی در محدوده دشت و ارتفاعات می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در تهیه بیلان بصورت‌های مختلف تهیه و مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به خوشه‌بندی حوضه آبریز گاوخونی، پارامترهای بیلان در هر خوشه بصورت مجزا مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرد.

جدول (۱) - بیلان هیدروکلیماتولوژی محدوده‌های مورد مطالعه - MCM

Table (1) - Hydroclimatological balance of the studied areas - MCM

نام خوشه منطقه‌ای	ناحیه	حجم بارندگی	تبخیر و تعرق حقیقی	بارندگی مفید	
				رواناب	نفوذ
Z1	دشت	۵۹۱	۴۲۱/۵	۴۶	۱۲۲

نام خوشه منطقه‌ای	ناحیه	حجم بارندگی	تبخیر و تعرق حقیقی	بارندگی مفید	
				رواناب	نفوذ
Z2	ارتفاعات	۱۶۰۴	۷۳۸/۸	۶۴۷	۲۱۸
	مجموع	۲۱۹۵	۱۱۶۰/۳	۶۹۳	۳۴۰
Z3	دشت	۶۳۷/۸	۵۰۶/۲	۳۰/۳	۱۰۱/۴
	ارتفاعات	۹۵۹/۹	۵۹۳	۱۹۱/۷	۱۷۵/۱
Z4	مجموع	۱۵۹۷/۷	۱۰۹۹/۲	۲۲۲	۲۷۶/۵
	دشت	۱۱۶۱	۵۶۵/۳	۲۲	۱۷۳/۶
Z3	ارتفاعات	۱۰۱۸/۱	۷۶۷/۲	۱۳۵/۳	۱۱۵/۴
	مجموع	۲۱۷۹/۱	۱۷۳۲/۵	۱۵۷/۳	۲۸۹
Z4	دشت	۸۰۳/۳	۷۳۳/۵	۱۳/۵	۵۶/۲
	ارتفاعات	۱۰۰۹/۶	۸۴۵/۶	۱۱۲/۴	۵۱/۶
	مجموع	۱۸۱۲/۹	۱۵۷۹/۱	۱۲۵/۹	۱۰۷/۸

جدول (۲) - بیلان آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی - MCM
Table (2) - Groundwater balance in the study areas - MCM

نام خوشه منطقه‌ای	عوامل تغذیه				عوامل تخلیه					
	نمود از بارندگی	نمود از جریان سطحی	نمود از آب برگشتی	جمع تغذیه	تخلیه از چاه، چشمه و قنات	تبخیر از آب زیرزمینی	خروجی زیرزمینی	جمع تخلیه	تغییرات حجم ذخیره	
Z1	۹۸/۲	۷۴/۲	۳۸/۱	۷۵/۱	۲۸۵/۶	۳۹۸/۷	۳۵/۵	۷/۱	۳۴۱/۷	-۵۶/۱
Z2	۱۲۱/۱	۶۳/۲	۲۱۴	۶۴۳	۱۰۴۱/۲	۱۱۸۴/۹	۱۵/۸	۱۴/۷	۱۲۱۷/۱	-۱۷۵/۹
Z3	۳۳۹	۱۰۸/۷	۱۶۶	۶۷۰/۱	۱۲۸۳/۸	۱۲۷۳	۶/۹	۳۰/۳	۱۴۷۴/۵	-۱۹۰/۷
Z4	۶۰/۷	۳۲/۱	۳۲/۷	۵۶	۱۸۱/۵	۱۹۴/۹	۰	۱۳/۵	۲۲۶/۶	-۴۵/۱

جدول (۳) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط فعلی
Table (3) - General water balance in the studied areas in current conditions

نام خوشه منطقه‌ای	ارتفاعات	دشت	بارندگی		جریان سطحی ورودی	جریان زیرزمینی ورودی	تبخیر و تعرق				آبهای انتقالی به محدوده	
			جریان انتقالی به محدوده	آبهای انتقالی به خارج			مصرف خاص	از سفره	از آب آزاد	از بارندگی		
Z1	۱۶۰۳/۹	۵۹۰/۸	۶۹۳	۰	۰	۷۱۱/۶	۱۱۶۰/۲	۶۳/۱	۰/۴	۳۳۵/۸	۱۳۸۶/۸	-۵۶/۱
Z2	۹۵۹/۹	۶۳۷/۸	۱۴۰۷	۱۶	۰	۱۰۹۹/۴	۱۰۹۹/۴	۱۰/۴	۱/۷	۱۳۱۹/۹	۳۸۰/۵	-۱۷۵/۹
Z3	۱۰۱۸/۱	۱۱۶۱	۳۸۰/۵	۹/۵	۳۶۷	۱۷۳۲/۴	۱۷۳۲/۴	۱۲/۹	۳۰/۳	۱۲۳۰/۴	۱۸/۶	-۱۹۰/۷
Z4	۱۰۰۹/۶	۸۰۳/۳	۱۶/۷	۲/۷	۱۱/۵	۱۵۷۹/۱	۱۵۷۹/۱	۱۲۹/۲	۱۳/۷	۱۸۴/۲	۲۵/۷	-۴۵/۱

نتایج بدست آمده از وضعیت فعلی منابع آب در حوضه آبریز گاوخونی نشان می‌دهد که منطقه Z1 با توجه به متوسط ارتفاع و اقلیم دارای بیشترین میزان نزولات آسمانی و تغذیه منابع آب است. این منطقه همچنین تحت تاثیر جریان ورودی به حجم ۶۹۳ میلیون مترمکعب در سال از حوضه آبریز کارون است که باعث افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف حوضه شده است و این موضوع توسعه شبکه‌های آبیاری و صنعت را داشته است. از طرفی نیز توسعه‌های انجام شده بدون لحاظ مدیریت منابع آب باعث شده تا ۴۶۸ میلیون مترمکعب کسری منابع آب زیرزمینی بطور سالانه ایجاد شود. این کسری ناشی از اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی است که بررسی منطقه‌ای نشان می‌دهد که سه محدوده نجف‌آباد در منطقه Z2 و دو محدود اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری در منطقه Z3 بیش از ۵۰٪ کسری را شامل می‌شود. از طرفی بیلان منابع آب سطحی با توجه به جریان سری در شبکه رودخانه‌ها که در نهایت منتهی به تالاب گاوخونی می‌شود تنها کسری حدود ۲۵ میلیون مترمکعب را که عملاً کمبود حقایبه این تالاب است را نشان می‌دهد. این کسری بیانگر اضافه برداشت و برداشت کل پتانسیل منابع آب سطحی در این حوضه آبریز است.

۲-۳- ارزیابی وضعیت منابع آب در شرایط توسعه

شرایط توسعه در حوضه آبریز گاوخونی به تفکیک ۴ خوشه تعیین شده با در نظر گرفتن شرایط تنظیم شده در آمایش این منطقه بشرح زیر تعریف و ارزیابی وضعیت کلی منابع آب مورد تفسیر قرار گرفت.

الف) میزان منابع آب قابل دسترس و برنامه‌ریزی به میزان ۳۷ MCM در خوشه Z1 توسعه، ۱۵ MCM در خوشه Z2 کاهش، ۲۴۰ MCM در خوشه Z3 کاهش و مقدار ۱۲ MCM نیز در خوشه Z4 کاهش داشته باشد.

ب) میزان راندمان کشاورزی به طور متوسط یک درصد افزایش داشته باشد بالتبع آن میزان بهره‌برداری آب در بخش کشاورزی فرآیند کاهشی را خواهد داشت.

ج) توسعه صنعتی و رشد جمعیت بصورت ثابت فرض شده است.

د) شرایط اقلیمی مشابه شرایط قبل در نظر گرفته می‌شود.

ه) جریانات انتقالی در حوضه هیچ تغییری نسبت به شرایط فعلی ندارد.

با توجه به مفروضات در نظر گرفته شده، در شرایط توسعه مطابق جدول (۴) بیلان عمومی منابع آب در ۴ خوشه تعیین گردید.

جدول (۴) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه

Table (4) - General water balance in the studied areas under development conditions

نام خوشه منطقه‌ای	جریان سطحی ورودی	جریان زیرزمینی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	ازبندگی	تبخیر و تعرق			ازبندگی	جریان سطحی خروجی	جریان زیرزمینی خروجی	آبهای انتقالی به خارج	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
					از سفره	از آب آزاد	مصرف خالص						
Z1	۶۹۳	۰	۷۱۱/۶	۱۱۶۰/۳	۶۳/۱	۰/۴	۳۳۲/۲	۱۳۴۴/۸	۰	۰	۰	۰	-۵۰/۴
Z2	۱۳۵۰	۱۶	۰	۱۰۹۹/۴	۱۰/۴	۱/۷	۱۳۱۷	۳۲۳/۵	۰	۰	۳۵۶/۹	۰	-۱۶۴
Z3	۳۲۳/۵	۹/۵	۳۶۷	۱۷۳۲/۴	۱۲/۹	۳۰/۳	۱۲۲۵/۲	۱۶۱/۸	۲/۹	۰	۸۰/۵	۰	-۱۶۰/۸
Z4	۱۶/۷	۲/۷	۱۱/۵	۱۵۷۹/۱	۱۲۹/۲	۱۳/۷	۱۸۱/۵	۲۵/۷	۱۳/۱	۰	۰	-۲۴/۸	-۳۶/۱

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد برنامه‌ریزی انجام شده برای توسعه در این حوضه سعی در کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در کل حوضه با تمرکز بر خوشه Z3 دارد. میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در مجموع ۷۲/۸ MCM کاهش خواهد داشت که این موضوع عملاً در بیلان منابع آب زیرزمینی و کسری مخازن بخوبی مشخص شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد

که میزان کسری آبخوان در خوشه Z1 از مقدار MCM ۵۶/۱ به MCM ۵۰/۴، در خوشه Z2 از مقدار MCM ۱۷۵/۹ به مقدار ۱۶۴ MCMT، در خوشه Z3 از مقدار MCM ۱۹۰/۷ به MCM ۱۶۰/۸ و در خوشه Z4 از مقدار MCM ۴۵/۱ به MCM ۳۶/۱ کاهش داشته است. بیشترین میزان کاهش بهره‌برداری در خوشه Z3 خواهد بود که بجز کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، حجم MCM ۲۰۰ نیز بهره‌برداری از منابع آب سطحی را کاهش خواهد داد. لذا بررسی بیلان عمومی منطقه Z3 نشان می‌دهد که با این کاهش بهره‌برداری از منابع آب سطحی پتانسیل جریان خروجی سطحی منطقه که عملاً وارد تالاب گاوخونی خواهد شد افزایش و به میزان MCM ۱۶۱/۸ خواهد رسید. این حجم در واقع تامین‌کننده نصف حبابه زیست‌محیطی تالاب خواهد بود. باتوجه به نتایج بدست آمده در خوشه Z3، پتانسیل کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با شرایط کاهش جریان خروجی نیز وجود دارد. بطوریکه از حجم جریان خروجی کاسته و جایگزین آب زیرزمینی در منطقه شود.

۳-۳- ارزیابی اثر تغییر اقلیم

به منظور شبیه‌سازی اقلیمی دو مدل IPSL-CM6A-LR و CESM2 ابتدا برای دوره پایه ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ داده‌های شبیه‌سازی از دو مدل با داده‌های تاریخی در چهار منطقه Z1 تا Z4 با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از ارزیابی دوره تاریخی، شبیه‌سازی دوره آتی برای سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ تحت سناریوهای انتشار انجام می‌گیرد. به منظور ارزیابی صحت نتایج دو مدل انتخابی، ارزیابی دوره پایه در دو شرایط تاریخی و شبیه‌سازی با سه شاخص آماری مطابق جدول (۵) برای پارامتر بارش و جدول (۶) برای پارامتر دما انجام شد.

جدول (۶) - ارزیابی آماری نتایج دوره پایه برای پارامتر دما
Table (6) - Statistical evaluation of the results of the base period for the temperature parameter

منطقه	مدل IPSL-CM6A-LR			مدل CESM2		
	KGE	R2	RMSE	KGE	R2	RMSE
Z1	۰/۲۴۸	۰/۹۴	۰/۱۲	۰/۳۴۱	۰/۹۲	۰/۱۴
Z2	۰/۳۶۱	۰/۹۲	۰/۱۳	۰/۴۱۲	۰/۹	۰/۱۵
Z3	۰/۳۵۸	۰/۹۶	۰/۱	۰/۴۰۲	۰/۸۸	۰/۰۸
Z4	۰/۲۱	۰/۹	۰/۰۶	۰/۱۵۷	۰/۸۹	۰/۰۶

جدول (۵) - ارزیابی آماری نتایج دوره پایه برای پارامتر بارش
Table (5) - Statistical evaluation of the results of the base period for the precipitation parameter

منطقه	مدل IPSL-CM6A-LR			مدل CESM2		
	KGE	R ²	RMSE	KGE	R ²	RMSE
Z1	۰/۱۴۲	۰/۸۲	۱۶	۰/۲۳۱	۰/۸۴	۱۴
Z2	۰/۰۲۳	۰/۷۷	۲۱	۰/۱۴۸	۰/۸۱	۱۷
Z3	-۰/۲۱۳	۰/۷۷	۲۰	۰/۱۰۳	۰/۷۷	۱۵
Z4	-۰/۱۱	۰/۸۲	۱۹	-۰/۰۸	۰/۸۶	۱۲

نتایج بدست آمده از دو مدل مورد شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل CESM2 نتایج مناسب‌تری را ارائه داده و برای ارزیابی شرایط آتی و تحلیل سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای براساس گزارش ششم مناسب‌تر است. براین اساس شبیه‌سازی دوره آتی تا سال ۲۰۳۹ میلادی براساس نتایج مدل CESM2 تحت سه سناریوی Ssp 126، Ssp 245 و Ssp 585 برای شرایط خوش‌بینانه، نرمال و بدبینانه آتی انجام گرفت. در جدول (۷) و (۸) نتایج میزان تغییرات بارش و دما در سه سناریوی انتشار برای چهار منطقه آنالیز شده است.

جدول (۷) - ارزیابی آماری تغییرات بارش در چهار منطقه

Table (7) - Statistical evaluation of precipitation changes in four regions

منطقه	مقدار تغییرات بارش-میلیمتر		
	Ssp 585	Ssp 245	Ssp 126
Z1	-۲۱	-۱۸	-۱۵
Z2	-۱۵	-۱۲	-۸
Z3	-۱۵	-۱۳	-۱۱

منطقه	Ssp 585	Ssp 245	Ssp 126	متوسط تغییرات
Z1	۱/۲	۰/۸	۰/۵	۰/۸۳
Z2	۱/۲۸	۰/۹۲	۰/۶۵	۰/۹۵
Z3	۱/۳	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۹۷
Z4	۱/۳۵	۱	۰/۷۵	۱/۰۳

نتایج بدست آمده از دو جدول نشان می‌دهد که تغییرات بارش و دما در منطقه Z1 بیشتر است. این منطقه با توجه به شرایط اقلیمی و ارتفاعی و بالابودن میزان بارندگی، عملاً میزان عدم قطعیت نتایج نیز بالاتر بدست آمده است. با توجه به دقت مناسب مدل CESM2، ارزیابی نتایج مستخرج از سه سناریوی انتشار برای دو پارامتر دما و بارش دارای عدم قطعیت پایین‌تری است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات بارش و دما دارای تغییرات نسبتاً کمتری نسبت به بررسی تعداد زیاد مدلها است. بطور کلی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی حاکی از کاهش بارش در منطقه است که این کاهش بین ۱۱/۶ تا ۱۸ میلی‌متر در سناریوهای مختلف انتشار بدست آمد. از طرفی نیز افزایش دما در منطقه نیز محرز بوده و بین ۰/۸۳ تا ۱/۰۳ درجه سانتیگراد شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نیز نشان می‌دهد که منطقه Z1 با توجه به بالابودن بارش دارای بیشترین میزان کاهش بارش بوده و منطقه Z4 نیز با توجه به نزدیکی به کویر مرکزی ایران دارای بیشترین افزایش دما است. این نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی اقلیمی در فرآیند بارش در مناطق کوهستانی بیشترین تاثیر و فرآیند دما در مناطق خشک بیشترین تغییرات را دارد. این موضوع عملاً نشان می‌دهد که دوره‌های آبی میزان بارش که بالتبع آن رواناب حوضه کاهش یافته و در بخش خروجی میزان دما و بالتبع آن تبخیر از پیکره‌های آبی افزایش خواهد داشت. افزایش نیاز آبی در بخش کشاورزی و سایر مصارف باعث افزایش کمبود منابع آب شده و اوضاع تالاب گاخونی وخیم‌تر خواهد شد.

۳-۴- ارزیابی اثر پدیده انسو

با توجه به انتخاب سال آبی ۱۶-۲۰۱۵ برای ارزیابی پدیده النینو و سال آبی ۱۱-۲۰۱۰ برای ارزیابی پدیده لانینا، تغییرات بارش و دما در ۴ ایستگاه ۴ خوشه انتخاب شده مورد تحلیل قرار گرفته و تغییرات آن نسبت به میانگین درازمدت ارائه شده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وقوع پدیده انسو در شرایط النینو یا لانینا نوسانات خاصی در دمای ۴ خوشه منطقه ایجاد نمی‌کند. تغییرات دما حداکثر ۰/۵ درجه سانتیگراد خواهد بود که این موضوع نیز در ۵ ماه آوریل تا اگوست مشهودتر است. تنها در منطقه Z1 با توجه به شرایط اقلیمی و ارتفاعی در ماه‌های سرد دمای کمتر از صفر وجود دارد. بررسی نتایج مورد تفسیر نشان می‌دهد که دما دارای حساسیت بالایی در پدیده‌های اقیانوسی نیست. بررسی نتایج بارندگی نشان می‌دهد که نوسانات بارش در پدیده النینو مثبت و در پدیده لانینا منفی است. این موضوع نشان می‌دهد که میزان بارش در ۵ ماه آوریل تا اگوست در دوره‌هایی که پدیده النینو بوقوع می‌پیوندد افزایش چشم‌گیری داشته و بیشترین میزان افزایش در خوشه Z1 و کمترین افزایش در خوشه Z4 ثبت شده است. افزایش میزان بارش در بازه ۵ ماهه با توجه به فعالیت‌های کشاورزی و رطوبت اولیه خاک سبب می‌شود که میزان رواناب در منطقه افزایش داشته باشد که بالتبع آن تغذیه جریان‌های زیرزمینی افزایش یابد. از طرفی نیز با وقوع النینو با توجه به بالابودن میزان رطوبت خاک، تعداد وقایع سیلاب در منطقه افزایش یافته که می‌تواند در وضعیت منابع آب تاثیر مثبت داشته باشد.

۳-۵- ارزیابی وضعیت منابع آب در شرایط توسعه با تغییر اقلیم و پدیده انسو

باتوجه به هدف این پژوهش که ارزیابی وضعیت بیلان منابع آب در حوضه گاوخونی تحت شرایط تغییر اقلیم و پدیده انسو به عنوان یک پدیده اقیانوسی است، ارزیابی توامان این دو رویکرد و توسعه منطقه برای افق ۱۴۲۰ یا سال ۲۰۳۹ در منطقه انجام می‌گیرد. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که با رخداد النینو در منطقه میزان بارندگی و نزولات آسمانی افزایش داشته و بالعکس در سالهایی که پدیده لانینا بوقوع می‌پیوندد میزان بارندگی کاهش دارد. روند تغییرات بارش در پدیده انسو نسبت به سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بسیار با شدت بالاتری است. لذا ارزیابی شرایط آبی با دو رویکرد مجزا شامل وضعیت منابع آب در شرایط توسعه منطقه با تغییر اقلیم در سه سناریوی انتشار Ssp و وضعیت منابع آب در شرایط توسعه منطقه در حالت وقوع پدیده انسو انجام می‌گیرد. در جدول (۹) تا (۱۱) بیلان عمومی ۴ خوشه در سه سناریوی انتشار و در جدول (۱۲) و (۱۳) بیلان عمومی ۴ خوشه منطقه‌ای برای دو حالت پدیده انسو محاسبه و ارائه شده است.

جدول (۹) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه و سناریوی Ssp126

Table (9) - General water balance in the studied areas under development conditions and Ssp126 scenario

نام خوشه منطقه‌ای	بارندگی		جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	جریان زیرزمینی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	تبخیر و تعرق				آبهای انتقالی به محدوده	جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	آبهای انتقالی به خارج	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
	ارتفاعات	دشت					از سفره	از آب آزاد	از بارندگی	مصرف خالص						
Z1	۱۵۳۳	۵۷۷	۰	۶۶۳/۱	۰	۷۱۱/۶	۱۱۶۰/۳	۶۳/۶	۰/۴	۳۴۰/۶	۱۳۰/۸	۰	۰	۰	۰	-۵۰/۵
Z2	۹۴۶	۶۳۰	۱۶	۱۳۱۰	۱۶	۰	۱۰۹۹/۲	۱۰/۶	۱/۷	۱۳۲۲/۸	۲۷۹/۳	۰	۳۵۶/۹	۰	-۱۶۶/۵	
Z3	۹۸۶	۱۱۳۳	۹/۵	۲۷۹/۳	۹/۵	۳۶۷	۱۷۳۲/۵	۱۳/۲	۳۰/۳	۱۲۳۰/۶	۱۱۰	۲/۹	۸۰/۵	۰	-۱۶۳/۳	
Z4	۱۰۰۰	۷۹۶	۲/۷	۱۶/۶	۲/۷	۱۱/۵	۱۵۷۹/۱	۱۲۸/۷	۱۳/۷	۱۸۱/۵	۲۵/۷	۱۳/۱	۰	-۲۴/۹	-۳۷/۲	

جدول (۱۰) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه و سناریوی Ssp245

Table (10) - General water balance in the studied areas under development conditions and Ssp245 scenario

نام خوشه منطقه‌ای	بارندگی		جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	جریان زیرزمینی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	تبخیر و تعرق				آبهای انتقالی به محدوده	جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	آبهای انتقالی به خارج	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
	ارتفاعات	دشت					از سفره	از آب آزاد	از بارندگی	مصرف خالص						
Z1	۱۵۴۷/۸	۵۸۳/۲	۰	۶۶۹/۷	۰	۷۱۱/۶	۱۱۲۹	۶۴/۵	۰/۴	۳۴۲/۲	۱۳۱۵/۳	۰	۰	۰	-۴۸/۴	
Z2	۹۴۲	۶۱۹/۳	۱۶	۱۳۱۶	۱۶	۰	۱۰۷۳	۱۰/۵	۱/۷	۱۳۲۵/۶	۲۸۲/۲	۰	۳۵۶/۹	۰	-۱۶۸	
Z3	۹۷۵/۸	۱۱۱۶	۹/۵	۲۸۲/۲	۹/۵	۳۶۷	۱۶۶۳	۱۲/۹	۳۰/۳	۱۲۳۱/۴	۱۰۹/۱	۲/۹	۸۰/۵	۰	-۱۶۴/۹	
Z4	۹۸۰/۳	۷۶۳/۵	۲/۷	۱۶/۵	۲/۷	۱۱/۵	۱۵۱۸/۲	۱۲۹/۳	۱۳/۷	۱۸۳/۶	۲۵/۷	۱۳/۱	۰	-۲۵/۳	-۴۱/۱	

جدول (۱۱) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه و سناریوی Ssp585

Table (11) - General water balance in the studied areas under development conditions and Ssp585 scenario

نام خوشه منطقه‌ای	بارندگی		جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	تبخیر و تعرق			جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
	دشت	ارتفاعات				مصرف خالص	از سفره	از آب آزاد				
Z1	۱۵۴۳	۵۷۵/۵	۰	۶۶۶	۷۱۱/۶	۱۱۱۲/۸	۶۵/۹	۰/۴	۳۴۴/۷	۱۳۰۱/۷	۰	-۵۱/۲
Z2	۹۲۷	۶۱۰	۱۶	۱۳۰۲	۰	۱۰۵۷/۵	۱۰/۴	۱/۷	۱۳۲۲/۸	۲۶۳/۶	۰	-۱۷۰/۷
Z3	۹۷۵/۸	۱۰۹۹	۹/۵	۲۶۳/۶	۳۶۷	۱۶۳۳	۱۳	۳۰/۳	۱۲۳۵/۶	۸۵/۶	۲/۹	-۱۶۶/۵
Z4	۹۶۶	۷۵۲	۲/۷	۱۶/۴	۱۱/۵	۱۴۹۶	۱۲۹/۵	۱۳/۷	۱۸۵/۳	۲۵/۷	۱۳/۱	-۲۵/۳

جدول (۱۲) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه و رخداد النینو

Table (12) - General water balance in the studied areas under the conditions of development and El Niño event

نام خوشه منطقه‌ای	بارندگی		جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	تبخیر و تعرق			جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
	دشت	ارتفاعات				مصرف خالص	از سفره	از آب آزاد				
Z1	۱۷۶۰	۶۶۵	۰	۷۶۱/۵	۷۱۱/۶	۱۲۸۴/۶	۶۳/۱	۰/۴	۳۳۲/۲	۱۴۳۰/۹	۰	-۱۹/۹
Z2	۱۱۲۹	۷۰۷	۱۶	۱۴۳۰	۰	۱۲۵۸/۷	۱۰/۴	۱/۷	۱۳۱۷	۴۴۹/۶	۰	-۱۳۵/۸
Z3	۱۲۱۷	۱۳۳۶	۹/۵	۴۴۹/۶	۳۶۷	۲۰۲۷/۷	۱۲/۶	۳۰/۳	۱۲۳۸	۳۳۶/۷	۲/۹	-۱۴۴/۴
Z4	۱۱۴۸	۹۲۴	۲/۷	۱۷/۷	۱۱/۵	۱۸۰۵/۷	۱۲۹/۲	۱۳/۷	۱۸۱/۵	۲۵/۷	۱۳/۱	-۲۳/۸

جدول (۱۳) - بیلان عمومی آب در محدوده‌های مورد مطالعه در شرایط توسعه و رخداد لانیئا

Table (13) - General water balance in the studied areas under the conditions of La Nina development and occurrence

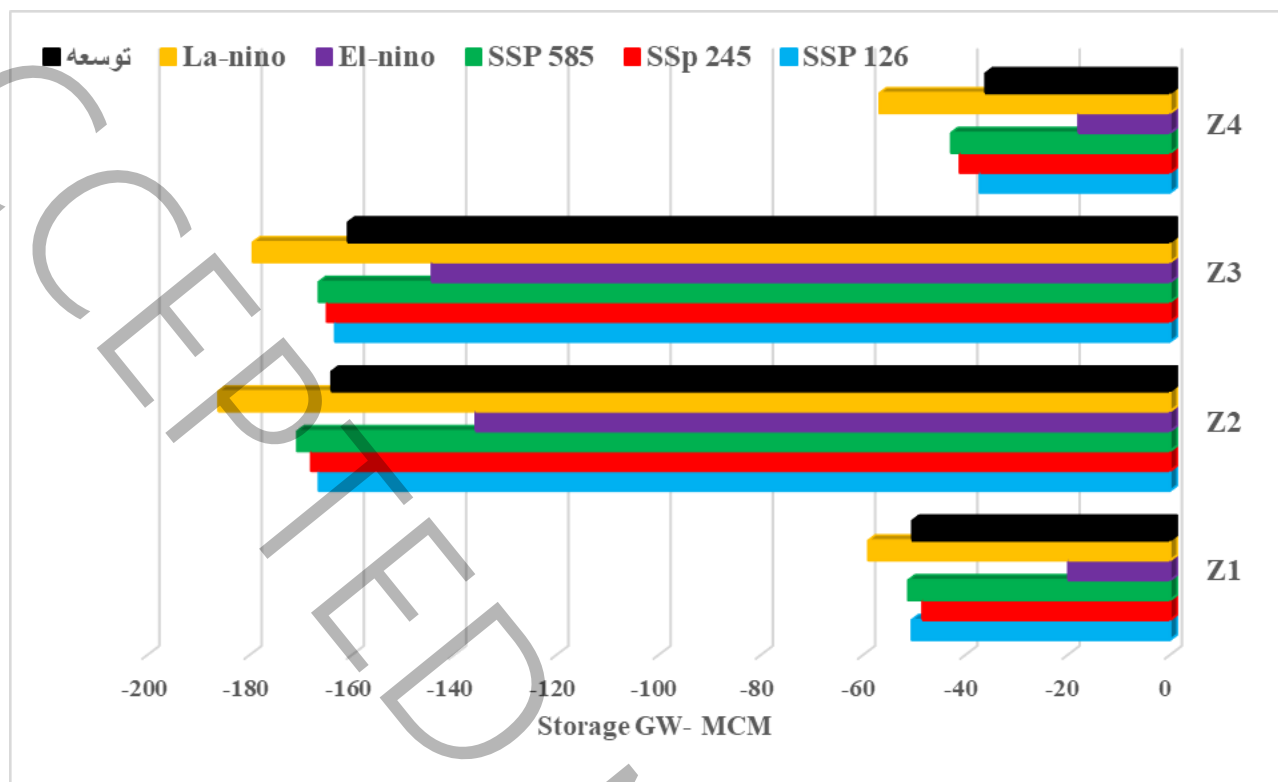
نام خوشه منطقه‌ای	بارندگی		جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	آبهای انتقالی به محدوده	تبخیر و تعرق			جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	ذخیره مخازن آب سطحی	ذخیره مخازن آب زیرزمینی
	دشت	ارتفاعات				مصرف خالص	از سفره	از آب آزاد				
Z1	۱۴۹۴	۵۴۵	۰	۶۴۵/۲	۷۱۱/۶	۱۰۷۶/۸	۶۳/۱	۰/۴	۳۳۲/۲	۱۲۸۵	۰	-۵۹

Z2	۸۷۷	۵۲۰	۱۲۸۵	۱۶	۰	۹۴۵/۵	۱۱/۱	۱/۷	۱۳۱۷	۲۱۷/۶	۰	۳۵۶/۹	۰	-۱۸۶/۱
Z3	۸۵۸	۹۶۱	۲۱۷/۶	۹/۵	۳۶۷	۱۴۴۵/۶	۱۲/۹	۳۰/۳	۱۲۴۱	۸	۲/۹	۸۰/۵	۰	-۱۷۹/۴
Z4	۸۴۵	۶۶۹	۱۶/۷	۲/۷	۱۱/۵	۱۳۱۸/۵	۱۲۹/۲	۱۳/۷	۱۸۱/۵	۲۵/۷	۱۳/۱	۰	-۲۵/۹	-۵۶/۸

بررسی عدم قطعیت نتایج بدست آمده در بیلان منابع آب در ۴ خوشه در شرایط تغییر اقلیم حاکی از نوسانات در محاسبات بیلان است که بیشترین میزان عدم قطعیت نتایج بیلان در منطقه Z4 با توجه به تحت تاثیر قرار داشتن منطقه از نظر افزایش دما و کاهش بارش مشاهده گردید. همچنین تاثیر میزان عدم قطعیت نتایج تبخیر با توجه به اثرگذاری دما در این حوزه نسبت به بارش با توجه به بازه عدم قطعیت نتایج بیشتر تعیین می گردد. از طرفی نتایج بدست آمده از اثر پدیده‌های اقیانوسی و تغییر اقلیم بر وضعیت پارامترهای اقلیمی و منابع آب در حوزه آبریز زاینده رود نشان داد که با وضعیت تاثیرگذاری پدیده النینو در برخی مناطق از نظر افزایش میزان نزولات آسمانی همخوانی داشته که می توان به مطالعات (2022) Le and Bae (2022) و (2022) Matunhu et al و (2021) Taye et al اشاره داشت [۲۱-۲۳]. همچنین وقوع تغییر اقلیم نیز با توجه به قرارداد داشتن این منطقه در کمربند خشک کاملاً با مطالعات (2022) Li et al، (2022) Anupong et al و (2022) Clarke et al همخوانی دارد [۲۴-۲۶].

۳-۶- ارزیابی راهکارهای سازگاری بر وضعیت منابع آب

بررسی نتایج بدست آمده در شرایط وقوع تغییر اقلیم و پدیده انسو نشان می دهد که فشار بهره برداری از منابع آب تمرکز بر منابع آب زیرزمینی دارد. در شکل (۵) کسری بیلان منابع آب زیرزمینی در شرایط آتی بر اثر وقوع هریک از پدیده‌ها ارائه شده است. نتایج ارائه شده نشان می دهد که بیشترین کسری در دو خوشه Z2 و Z3 با توجه به حجم بالای بهره برداری و سطح زیرکشت است. نتایج مورد تحلیل نشان می دهد که پدیده النینو نقش مهمی در افزایش حجم بارش و بالتبع آن جریانات سطحی داخل حوضه داشته و از روند بهره برداری از منابع آب زیرزمینی می کاهد. این موضوع سبب شده تا در دو خوشه Z1 و Z4 تا بیش از ۵۰٪ از کسری منابع آب زیرزمینی کاهش یافته و در دو خوشه Z2 و Z3 نیز روند کاهشی ملموسی بوجود آید. از طرفی نیز جریانات انتقالی به حوضه نیز در کاهش تنش آبی و اختلاف بین عرضه و تقاضای آب تاثیر زیادی داشته است که با افزایش حجم آب انتقالی بخشی از این کمبودها و فشار به منابع آب زیرزمینی می تواند کاسته شود. لذا براین اساس به منظور سازگاری با شرایط آتی ۵ راهکار بصورت اجمالی مورد تحلیل قرار می گیرد. هدف از ارزیابی این راهکارها، کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و کسری منابع آب است.



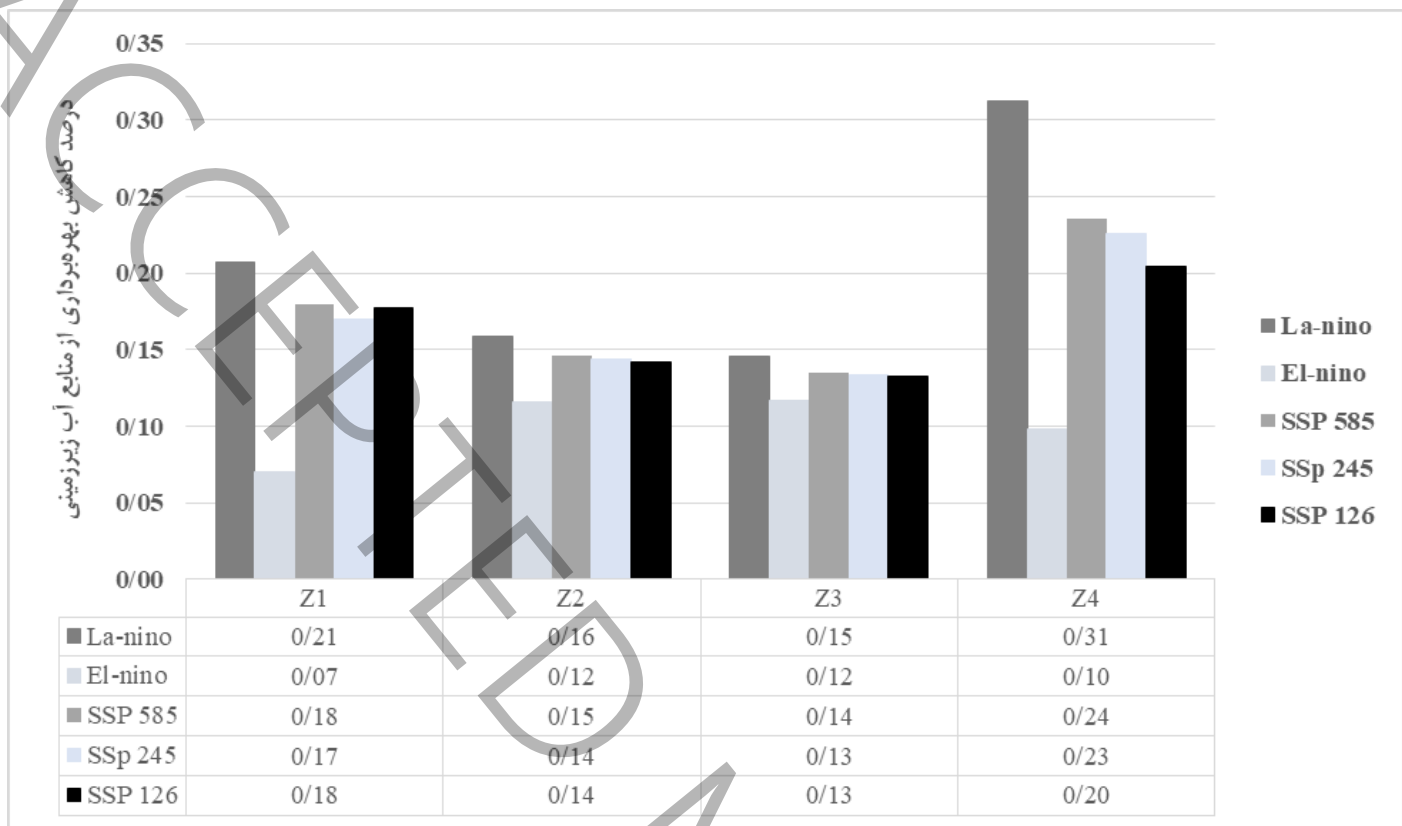
شکل (۵) - کسری بیلان آب زیرزمینی در اثر وقوع پدیده‌های مورد تحلیل

Figure (5) - The deficit of the groundwater balance due to the occurrence of the analyzed phenomena

الف) افزایش انتقال آب از حوزه سد کارون با فعالیت تونل شماره ۳ کوهرنگ و تونل بهشت‌آباد (S1): بررسی میزان کسری منابع آب زیرزمینی در دوره آبی نشان می‌دهد در بدبینانه‌ترین شرایط ۴۸۱ میلیون مترمکعب و در خوشبینانه‌ترین حالت ۳۱۸ میلیون مترمکعب کسری وجود خواهد داشت. لذا در صورت انتقال آب از تونل‌های شماره ۳ کوهرنگ و بهشت‌آباد با حجمی معادل شرایط و جایگزینی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با آب سطحی انتقالی عملاً می‌توان کسری منابع آب زیرزمینی را بصورت کامل مهار کرد.

نکته حائز اهمیت در این بخش این موضوع است که این حجم جریان می‌بایست از حوزه آبریز کارون تامین گردد که این حوزه نیز در تنش آبی قرار داشته و مدیریت در آن منطقه نیز بسیار حائز اهمیت است. که با توجه به شرایط موجود و حادث شدن شرایط آبی از نظر اقلیمی و نیاز آبی، اجرای این راهکار تبعات اقتصادی و اجتماعی سنگینی را خواهد داشت.

ب) کاهش بهره‌برداری از منابع آب حوزه به میزان کسری منابع آب زیرزمینی (S2): با توجه به حجم بهره‌برداری و کسری منابع آب زیرزمینی یکی از راهکارها در جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی، کاهش بهره‌برداری با تاکید بر بخش کشاورزی است که به عنوان یکی از پروژه‌های طرح تعادل بخشی نیز محسوب می‌گردد. با توجه به حجمی بهره‌برداری بالغ بر ۲/۸ BCM عملاً در شرایط بدبینانه کاهش ۱۷ درصد و در شرایط خوشبینانه کاهش ۱۱ درصد در بخش کشاورزی قابلیت جبران کسری منابع آب زیرزمینی را خواهد داشت. این حجم کاهش بهره‌برداری در دو خوشه Z1 و Z4 در شرایط بدبینانه و دو خوشه Z2 و Z3 در شرایط خوشبینانه بیشتر خواهد بود. براساس محاسبات انجام گرفته در مدل، میزان درصد کاهش در ۴ خوشه در شرایط بدبینانه به ترتیب ۱۶٪، ۱۵٪ و ۳۱٪ و در شرایط خوشبینانه به ترتیب ۷٪، ۱۲٪، ۱۲٪ و ۱۰٪ خواهد بود.



شکل (۶) - میزان کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در راهکار S2

Figure (6) - The amount of reduction in the use of underground water resources in the S2 solution

ج) افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به میزان ۱ و ۲/۵ درصد (S3): با توجه به نتایج مورد تحلیل در جدول (۱۴) با افزایش میزان بهره‌وری آب و ثابت بودن میزان عملکرد، میزان آب مصرفی می‌تواند کاهش چشم‌گیری داشته باشد.

جدول (۱۴) - تحلیل افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی راهکار S3

Table (14) - Analysis of increasing water productivity in the agricultural sector of solution S3

خوشه	مجموع مصارف آب - MCM	مجموع تولید آبی در محدوده‌های مطالعاتی (تن)	کارایی مصرف آب در محدوده‌های مطالعاتی (کیلوگرم بر متر مکعب)	افزایش کارایی (%)	افزایش کارایی (%)	مصارف آب با افزایش ۱٪ بهره‌وری - MCM	
						مصارف آب با افزایش ۲/۵٪ بهره‌وری - MCM	مصارف آب با افزایش ۱٪ بهره‌وری - MCM
Z1	۷۵۱/۲	۴۲۲۳۵۲	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۵۹	۷۳۸/۱	۷۱۹/۳
Z2	۱۹۵۱/۹	۸۷۸۱۸۲	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۱۹۰۹/۵	۱۸۴۹/۱
Z3	۲۰۲۵/۱	۱۱۱۵۸۸۸	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۵۸	۱۹۸۹	۱۹۳۷/۲
Z4	۲۹۶/۵	۱۰۹۳۷۴	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۳۹	۲۸۸/۷	۲۷۷/۷
حوزه آبریز	۵۰۲۴/۷	۲۵۲۶۷۹۶	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۲۵	۴۹۲۵/۲	۴۷۸۳/۳

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ۱٪ بهره‌وری آب در سطح کل حوزه آبریز حجمی بالغ بر ۹۹ MCM و با افزایش ۲/۵٪ بهره‌وری آب حجمی بالغ بر ۲۴۰ MCM کاهش بهره‌برداری از منابع آب ایجاد می‌شود. این کاهش می‌تواند در بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه در شرایط آبی تاثیرگذار باشد.

د) افزایش راندمان بخش کشاورزی (S4): با توجه به تحلیل جدول (۱۴) در صورت افزایش راندمان آبیاری بخش کشاورزی عملاً میزان آب مصرفی کاهش خواهد داشت. بیشترین میزان افزایش راندمان در منطقه Z2 و بطور متوسط ۳/۱۶٪ و کمترین میزان در منطقه Z3 به میزان ۱/۰۸٪ پیش‌بینی شده است. براین اساس به منظور تعدیل فشار بر منابع آب زیرزمینی افزایش راندمان ۳/۵ درصد بطور متوسط باعث کاهش بهره‌برداری از منابع آب در منطقه و عملاً تلفات آب کاهش می‌یابد. این درصد معادل حجم ۱۷۵ MCM در حوزه آبریز خواهد بود که می‌تواند در بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه تاثیرگذار باشد.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین دغدغه‌های مدیران تصمیم‌گیرنده در بخش آب کشور، تدوین رویکردهای مدیریت منابع آب برای برنامه‌ریزی در شرایط آبی است. شرایط آبی تابع عوامل اقلیمی و توسعه‌های برنامه‌ریزی شده براساس سند آمایش در مناطق مختلف است. براین اساس این پژوهش با هدف ارزیابی وضعیت منابع آب در حوزه آبریز گاوخونی برای شرایط آبی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی شرایط آبی نشان می‌دهد که علاوه بر گرمایش زمین و عواقب آن که تغییر اقلیم است، پدیده‌های اقیانوسی نیز بر وضعیت منابع آب حوزه‌های آبریز تاثیرگذار است. لذا پدیده انسو به عنوان یک پدیده اقیانوسی و سناریوهای انتشار در گزارش ششم تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب حوزه آبریز گاوخونی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی شرایط موجود از دو مدل شبیه‌سازی اقلیمی CESM2 و IPSL-CM6A-LR که در مطالعات مربوط به حوزه آبریز گاوخونی دارای نتایج مناسبی است استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی دوره پایه با استفاده از شاخص‌های آماری نشان داد که مدل CESM2 دارای دقت مناسب‌تری بوده و از این مدل برای شبیه‌سازی دوره آبی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 استفاده شد. حوزه آبریز گاوخونی بدلیل تنوع اقلیم و بهره‌برداری براساس مرز محدوده‌های مطالعاتی به ۴ خوشه تقسیم گردید و تحلیل وضعیت منابع آب در این مناطق انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که متوسط تغییرات بارش در سه سناریوی انتشار در ۴ منطقه خوشه‌بندی به ترتیب کاهش ۱۸، ۱۱/۶، ۱۳ و ۱۳/۳ میلیمتر و افزایش دما به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۹۵، ۰/۹۷ و ۱/۰۳ درجه سانتیگراد را داشته است. نتایج بدست آمده نشان داد که در کل حوزه آبریز افزایش دما و کاهش بارش وجود داشته که بیشترین میزان کاهش بارش در مناطق غربی و ارتفاعات شبیه‌سازی شده است. بررسی وضعیت فعلی منابع آب در ۴ خوشه نشان داد که با توجه به توسعه‌های بدون برنامه‌ریزی بخش آب در سطح حوزه، کسری ۴۶۷ میلیون مترمکعب منابع آب زیرزمینی بدست آمد که این موضوع در شرایط توسعه با توجه به در نظر گرفتن افزایش راندمان و بهره‌وری آب به منظور کاهش بهره‌برداری، حجم کسری سالانه ۴۱۱ MCM خواهد بود. باتوجه به این شرایط شبیه‌سازی تغییر اقلیم در سه سناریوی انتشار و پدیده انسو در دو حالت رخداد النینو و لانینو انجام گرفت. بررسی نتایج شبیه‌سازی منابع آب در منطقه نشان داد که وقوع لانینو و سه سناریوی تغییر اقلیم باعث کاهش حجم بهره‌برداری و افزایش میزان کسری منابع آب زیرزمینی می‌گردد. در شرایط رخداد النینو با توجه به افزایش بارش در سطح کل حوزه آبریز، میزان کسری منابع آب زیرزمینی به ۳۱۱ MCM خواهد رسید. کسری منابع آب زیرزمینی در سه سناریوی تغییر اقلیم بین ۴۱۷ تا ۴۳۱ MCM در حالت خوشبینانه تا بدبینانه تغییر خواهد کرد. نتایج بدست آمده نشان داد که شدت تاثیر پدیده‌های اقیانوسی بر منابع آب بسیار شدیدتر از تغییر اقلیم است. از طرفی نیز وقوع پدیده‌های اقیانوسی با شدت بالا معمولاً در یک دوره بازگشت ۲۰ ساله بوقوع پیوسته و تاثیر یک تا سه ساله خواهد داشت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی وقایع اقیانوسی برای مدیریت بهره‌برداری منابع آب بسیار حائز اهمیت است.

باتوجه به نتایج بدست آمده از وضعیت بیلان منابع آب حوزه آبریز گاوخونی با تمرکز بر بیلان منابع آب زیرزمینی، ۴ راهکار سازگاری در این منطقه بصورت کلان تعریف و مورد ارزیابی قرار گرفت. راهکارهای انتقال آب از تونل بهشت‌آباد و شماره کوه‌رنگ (S1)، کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (S2)، افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی (S3) و افزایش راندمان کشاورزی (S4) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این بخش بدون در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی نشان داد که هر کدام از این راهکار در افزایش حجم آبخوان‌ها تاثیرگذار بوده و با توجه به محدودیت‌های احتمالی افزایش راندمان و بهره‌وری آب دارای نتایج

کمی مناسب‌تری خواهد بود. نتایج نشان داد که در شرایط بدبینانه کاهش ۱۷ درصد و در شرایط خوشبینانه کاهش ۱۱ درصد در بخش کشاورزی قابلیت جبران کسری منابع آب زیرزمینی را خواهد داشت. همچنین با افزایش ۱٪ بهره‌وری آب در سطح منطقه حجمی بالغ بر ۹۹ MCM و با افزایش ۲/۵٪ بهره‌وری آب حجمی بالغ بر ۲۴۰ MCM کاهش بهره‌برداری از منابع آب ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش راندمان بخش کشاورزی حجم ۱۷۵ MCM کاهش بهره‌برداری در سطح حوزه آبریز ایجاد می‌شود. از طرفی نیز این نکته حائز اهمیت است که عدم قطعیت نتایج بدست آمده با توجه به ذات داده‌های مورد استفاده در بیلان منابع آب و عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار می‌تواند در نتایج تصمیم‌گیری حائز اهمیت باشد. بررسی عدم قطعیت نتایج بدست آمده همان‌طور که در تحلیل شرایط اقلیمی تحت سناریوهای مختلف مورد تفسیر قرار گرفت می‌تواند دامنه‌ای از وضعیت بیلان را در بر داشته باشد که این عدم قطعیت در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به پدیده‌های اقیانوسی کمتر است.

- [1] E. Kriegler, J. Edmonds, S. Hallegatte, K.L. Ebi, T. Kram, K. Riahi, H. Winkler, D.P. Van Vuuren, A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions, *Climatic Change*, 122 (2014) 401-414.
- [2] A. Turecek, Q. Payton, J.D. Alexander, D. Goodman, A.F. Evans, N.A. Som, Reducing River Flows to Control a Parasitic Salmonid Disease in the Klamath River: Simulations Question the Efficacy of Desiccation as a Management Tool, *North American Journal of Fisheries Management*, 41(4) (2021) 1215-1224.
- [3] S. Najafi, A. Sharafati, H.K. Moghaddam, Impact of climate change adaptation strategies on groundwater resources: a case study of Sari-Neka coastal aquifer, Northern Iran, *Environmental Earth Sciences*, 82(23) (2023) 571.
- [4] G. Abdollahzadeh, M.S. Sharifzadeh, P. Sklenička, H. Azadi, Adaptive capacity of farming systems to climate change in Iran: Application of composite index approach, *Agricultural Systems*, 204 (2023) 103537.
- [5] L. Goddard, A. Gershunov, Impact of El Niño on weather and climate extremes, *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*, (2020) 361-375.
- [6] S.V. Hund, I. Grossmann, D.G. Steyn, D.M. Allen, M.S. Johnson, Changing water resources under El Niño, climate change, and growing water demands in seasonally dry tropical watersheds, *Water Resources Research*, 57(11) (2021) e2020WR028535.
- [7] T. De Silva M, G.M. Hornberger, Identifying El Niño–Southern Oscillation influences on rainfall with classification models: implications for water resource management of Sri Lanka, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(4) (2019) 1905-1929.
- [8] T. Le, K.-J. Ha, D.-H. Bae, Projected response of global runoff to El Niño-Southern oscillation, *Environmental Research Letters*, 16(8) (2021) 084037.
- [9] D.M. Khosravi, E. Mesgari, Spatial analysis of relationship between teleconnection patterns and monthly temperature of northwest of Iran, *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 6(21) (2016) 203-214.
- [10] O. Alizadeh, A review of the El Niño-Southern Oscillation in future, *Earth-Science Reviews*, 235 (2022) 104246.
- [11] F.P. Delage, S.B. Power, The impact of global warming and the El Niño-Southern Oscillation on seasonal precipitation extremes in Australia, *Climate Dynamics*, 54 (2020) 4367-4377.
- [12] C.S. Hendrix, S.M. Glaser, J.E. Lambert, P.M. Roberts, Global climate, El Nino, and militarized fisheries disputes in the East and South China Seas, *Marine Policy*, 143 (2022) 105137.
- [13] P. Santidrián Tomillo, L. Fonseca, M. Ward, N. Tankersley, N. Robinson, C. Orrego, F. Paladino, V. Saba, The impacts of extreme El Niño events on sea turtle nesting populations, *Climatic Change*, 159(2) (2020) 163-176.
- [14] C. Wengel, S.-S. Lee, M.F. Stuecker, A. Timmermann, J.-E. Chu, F. Schloesser, Future high-resolution El Niño/Southern oscillation dynamics, *Nature Climate Change*, 11(9) (2021) 758-765.
- [15] G.J. Osgood, E.R. White, J.K. Baum, Effects of climate-change-driven gradual and acute temperature changes on shark and ray species, *Journal of Animal Ecology*, 90(11) (2021) 2547-2559.
- [16] O. Boucher, J. Servonnat, A.L. Albright, O. Aumont, Y. Balkanski, V. Bastrikov, S. Bekki, R. Bonnet, S. Bony, L. Bopp, Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7) (2020) e2019MS002010.

- [17] R. Bonnet, O. Boucher, J. Deshayes, G. Gastineau, F. Hourdin, J. Mignot, J. Servonnat, D. Swingedouw, Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR ensemble of extended historical simulations, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(9) (2021) e2021MS002565.
- [18] G.A. Meehl, C. Shields, J.M. Arblaster, H. Annamalai, R. Neale, Intraseasonal, seasonal, and interannual characteristics of regional monsoon simulations in CESM2, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(6) (2020) e2019MS001962.
- [19] I.R. Simpson, J. Bacmeister, R.B. Neale, C. Hannay, A. Gettelman, R.R. Garcia, P.H. Lauritzen, D.R. Marsh, M.J. Mills, B. Medeiros, An evaluation of the large-scale atmospheric circulation and its variability in CESM2 and other CMIP models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13) (2020) e2020JD032835.
- [20] S. Ansari, H. Dehban, M. Zareian, A. Farokhnia, Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model, *Iranian Water Researches Journal*, 16(1) (2022) 11-24.
- [21] T. Le, D. Bae, Causal Impacts of El Niño–Southern Oscillation on Global Soil Moisture Over the Period 2015–2100. *Earths Future* 10, e2021EF002522, in, 2022.
- [22] J. Matunhu, S. Mago, V. Matunhu, Initiatives to boost resilience towards El Niño in Zimbabwe’s rural communities, *Jambá-Journal of Disaster Risk Studies*, 14(1) (2022) 1194.
- [23] M.T. Taye, E. Dyer, K.J. Charles, L.C. Hirons, Potential predictability of the Ethiopian summer rains: understanding local variations and their implications for water management decisions, *Science of the Total Environment*, 755 (2021) 142604.
- [24] W. Anupong, L. Yi-Chia, M. Jagdish, R. Kumar, P. Selvam, R. Saravanakumar, D. Dhabliya, Hybrid distributed energy sources providing climate security to the agriculture environment and enhancing the yield, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52 (2022) 102142.
- [25] B. Clarke, F. Otto, R. Stuart-Smith, L. Harrington, Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective, *Environmental Research: Climate*, 1(1) (2022) 012001.
- [26] X. Li, D. Long, B.R. Scanlon, M.E. Mann, X. Li, F. Tian, Z. Sun, G. Wang, Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau, *Nature Climate Change*, 12(9) (2022) 801-807.