

تحلیل عدم قطعیت تراز آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد)

امیرحسین رسائی^۱، احمد شرافتی^{۲*}، حمید کاردان مقدم^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

۳. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۶/۱۲)

چکیده

پژوهش حاضر به دلیل تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، با استفاده از سناریوهای انتشار گزارش پنجم تغییر اقلیم تحت پنج مدل HadGem2Es، Micro5، MPI-Esm-MR، EC-ERATH و GFDL-CM3 شبیه‌سازی بارش و دما انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای اقلیمی در مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW اعمال شد و برای سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۶۰-۲۰۸۰) پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی انجام گرفت. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان، بیانگر افت سالانه ۷۳ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی است که با ادامه این وضعیت، آبخوان از حالت بحرانی به حالت فوق بحرانی برای بهره‌برداری تبدیل می‌شود. با ادامه این روند در سالیان بعد پدیده نشست زمین دور از ذهن نباید باشد. نتایج ادامه شرایط موجود نشان می‌دهد این آبخوان در پایان سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ نسبت به مهر ۱۳۸۹ که ابتدای دوره شبیه‌سازی است، بیش از ۲۲ متر افت خواهد داشت که بیش از نصف این افت مربوط به ۸ سال انتهایی خواهد بود. بر این اساس، نتایج ۵ مدل اقلیمی و سه سناریوی انتشار، پیش‌بینی وضعیت آبخوان انجام و با توجه به هیدروگراف به‌دست‌آمده، میزان عدم قطعیت نتایج مدل‌های اقلیمی در هیدروگراف آبخوان ارزیابی شد. نتایج نشان داد سناریوی انتشار RCP 8.5 دارای بیشترین میزان اختلاف بین حداقل و حداکثر تراز آب زیرزمینی است.

کلیدواژگان: آبخوان هشتگرد، تغییر اقلیم، عدم قطعیت، مدل‌های RCP، مدل‌های CMIP5.

مقدمه

تغییر اقلیم، از افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی و صنعتی شدن کشورها به وجود آمده و به افزایش نسبی دمای زمین منجر شده است. گرمایش جهانی تأثیرات زیادی روی چرخه هیدرولوژی و سیستم‌های منابع آب داشته است، به گونه‌ای که می‌تواند به عنوان تهدیدی بزرگ بر سیستم‌های منابع آب در سراسر جهان قلمداد شود. این تهدیدها برای مناطق مختلف زمین متفاوت‌اند [۱]. فرایند تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش، مهم‌ترین بحث مطرح در قلمروی علوم محیطی است. این پدیده به دلیل ابعاد علمی و کاربردی (تأثیرات محیطی، اقتصادی-اجتماعی) آن اهمیت فزاینده‌ای دارد، چراکه سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی می‌شوند و عمل می‌کنند. تغییرات معنادار دمای کره زمین با گرمایش جهانی به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در قرن حاضر مورد توجه قرار گرفته است. متوسط دمای سطح زمین طی قرن گذشته بر اثر گرمایش زمین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است و انتظار می‌رود این افزایش منجر به افزایش میزان تبخیر-تعرق شود و اتمسفر را قادر سازد تا مقادیر بیشتری از بخار آب را جابه‌جا کند. بنابراین، گرم شدن جهانی زمین، ممکن است چرخه هیدرولوژی را تسریع کند و منابع آب جهانی دوباره توزیع بشود [۲]. توجه به پدیده تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب اهمیت زیادی دارد که در کشورمان کمتر به آن پرداخته شده است [۳]. تغییرات اقلیم سبب تغییر در مدت، شدت، فرم و زمان بارش در مناطق مختلف کره زمین می‌شود، که این مسئله تغییر در تغذیه منابع آب به‌خصوص منابع آب زیرزمینی را در پی دارد. بنابراین، این تغییر در تغذیه منابع آب زیرزمینی سبب تنش‌هایی در عرصه مدیریت منابع آب می‌شود. رشد فزاینده صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل‌زدایی و تخریب محیط زیست از طرف دیگر، طی دهه‌های اخیر افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین را به دنبال داشته است [۴].

از طرفی، با توجه به وجود روابط غیرخطی، عدم قطعیت و عدم صراحت زیاد و ویژگی متغیرهای زمانی و مکانی در سیستم‌های گردش آبی، هیچ‌یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهادشده به منظور الگوسازی دقیق بارش و رواناب نتوانسته‌اند به عنوان یک مدل برتر و توانا شناخته شوند [۵].

بنابراین، بررسی عدم قطعیت یکی از ابزارهای مهم برای تحلیل وضعیت منابع آب یک منطقه تحت شرایط تغییر اقلیمی است. نیستور (۲۰۱۹) ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر تغییرات آب زیرزمینی در جنوب شرق اروپا را انجام داده است. در تحقیق یادشده از روش‌های مختلفی برای ارزیابی تأثیر تغییرات آب‌وهوا روی منابع آب جنوب شرق اروپا استفاده شده است. مدل‌های آب‌وهوایی و داده‌های پوشش زمین در اینجا در دو زمان تغییر، در حال حاضر (۲۰۲۰-۲۰۴۰) و آینده (۲۰۴۱-۲۰۷۰)، برای ارزیابی اثر آب‌وهوا در منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. روش «اجرای جدید فضایی - زمانی بر مناطق - تأثیر آب‌وهوا روی آب زیرزمینی» (NISTOR) (CEGW) برای این مطالعه پیشنهاد شده است. یافته‌ها بیانگر تأثیر آب‌وهوایی بسیار زیاد در حوضه پانیون، در شرق و جنوب رومانی، در شمال و جنوب بلغارستان، در شرق و مناطق مرکزی مقدونیه، در شمال و شرق یونان و در بخش اروپایی ترکیه هستند. در آینده، مناطقی با تأثیر آب‌وهوایی بسیار زیاد در افزایش آب‌های زیرزمینی بیشتر در ضلع شمالی، شرقی و جنوب شرقی منطقه جنوب شرقی اروپا افزایش می‌یابند. دیناریک و کوه‌های آلپ مناطقی با تأثیر آب‌وهوای کم و بسیار کم بر آب‌های زیرزمینی هستند. این مناطق آب‌وهوای بسیار مرطوب دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد حدود نیمی از قلمروی اروپای جنوب شرقی با خشکسالی روبه‌رو است و محیط زیست، آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی برانگیخته می‌شوند [۶]. مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در سطح کشور انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انصاری و همکاران [۷]، مسماریان و همکاران [۸]، جلیلی و همکاران [۹]، عابدینی و همکاران [۱۰]، حمزه و همکاران [۱۱] اشاره کرد. این تحقیقات براساس مدل‌های گزارش چهارم IPCC به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی پرداختند. نتایج کلی این تحقیقات بیانگر کاهش میزان تغذیه از جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به آبخوان و افزایش نیاز آبی و در نتیجه، افزایش برداشت و افت آبخوان بوده است. مرتضوی‌زاده و گودرزی (۱۳۹۷) ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم را با استفاده از مدل HadGEM2 در محدوده مطالعاتی هشتگرد با استفاده از دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 بررسی کردند. نتایج ارائه‌شده در پژوهش آنها نشان داد افت این آبخوان تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم قرار داشته است و تا سال ۲۰۴۰ میزان افت

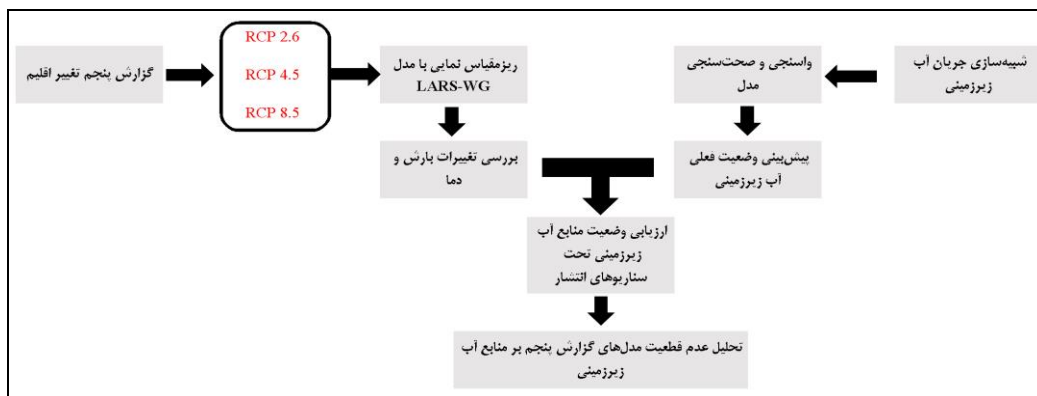
تصمیم‌سازی و بسترسازی به منظور تدوین راهکارهای علاج‌بخشی دهد. حجم زیاد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با توجه به گرمایش زمین، ضرورت تعادل‌بخشی این آبخوان را بیان می‌کند.

روش تحقیق

با توجه به هدف پژوهش حاضر که بررسی عدم قطعیت سناریوهای انتشار براساس گزارش پنجم تغییر اقلیم است، روش تحقیق به صورت شکل ۱ ارائه شده است. بر این اساس، پس از تحلیل پارامتر بارش و دما در منطقه، با استفاده از سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی بارش و دما در منطقه انجام گرفت. بر این اساس، با استفاده از بانک اطلاعاتی IPCC، مدل‌های EC-ERATH، MPI-Esm-MR، Micro5، HadGem2Es و GFDL-CM3 برای شبیه‌سازی استفاده شد. پس از شبیه‌سازی اقلیمی، ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل LARS-WG v6 انجام گرفت و داده‌های بارش و دما برای محدوده مطالعاتی هشتگرد فراهم شد. نتایج اقلیمی برای سه دوره پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی اقلیمی، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار v10 GMS انجام گرفت و با در نظر گرفتن شرایط کنونی توسعه منطقه، پیش‌بینی شرایط آبی آبخوان انجام گرفت. پس از پیش‌بینی وضعیت آبی، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان با استفاده از نتایج ریزمقیاس‌شده پنج مدل اقلیمی در سه سناریوی انتشار بررسی شد. در نهایت، براساس نتایج به‌دست‌آمده، تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف آبخوان هشتگرد آنالیز شد.

این آبخوان، ۱۸ متر خواهد بود [۱۲]. خلج و همکاران (۱۳۹۸) تأثیرات اقلیمی و انسانی بر تراز و کیفیت آب زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک را بررسی کردند. در تحقیق یادشده، به‌منظور شناخت و شبیه‌سازی ویژگی‌های آبخوان دشت مهاباد از مدل MODFLOW استفاده شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، عوامل تأثیرگذار بر تراز آب زیرزمینی بررسی شد و به این منظور، مدل با حذف کلیه عوامل انسانی تأثیرگذار اجرا شد که در این شرایط مدل، تراز آب زیرزمینی را به‌طور متوسط به اندازه ۳ متر بالاتر از مقدار کنونی پیش‌بینی کرد. برای بررسی تأثیر عوامل یادشده بر کیفیت آب زیرزمینی از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد. به این منظور، پارامتر شوری آب زیرزمینی به‌عنوان تابعی از تراز آب زیرزمینی پیش‌بینی شد. نتایج بررسی نشان داد تأثیر عوامل انسانی بر کیفیت و کمیت آن غالب بوده و موجب تغییر کلاس آب آبیاری شده است. نتایج تحقیق در اعمال سیاست‌های مدیریت تطبیقی در آینده قابل استفاده خواهد بود [۱۳].

بررسی مطالعات نشان می‌دهد ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب به‌خصوص منابع آب زیرزمینی بسیار اهمیت دارد و با توجه به رویکردهای احتمالاتی در پیش‌بینی وقایع آبی، لزوم بررسی عدم قطعیت بسیار زیاد است. این مطالعه به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی هشتگرد می‌پردازد. بررسی‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر این آبخوان در دوره‌های گذشته با استفاده از یک مدل انجام گرفته است، اما بررسی و تعیین عدم قطعیت تراز آب زیرزمینی ناشی از سناریوها و مدل‌های مختلف اقلیمی می‌تواند دیدگاه بهتری را در اختیار مدیران برای



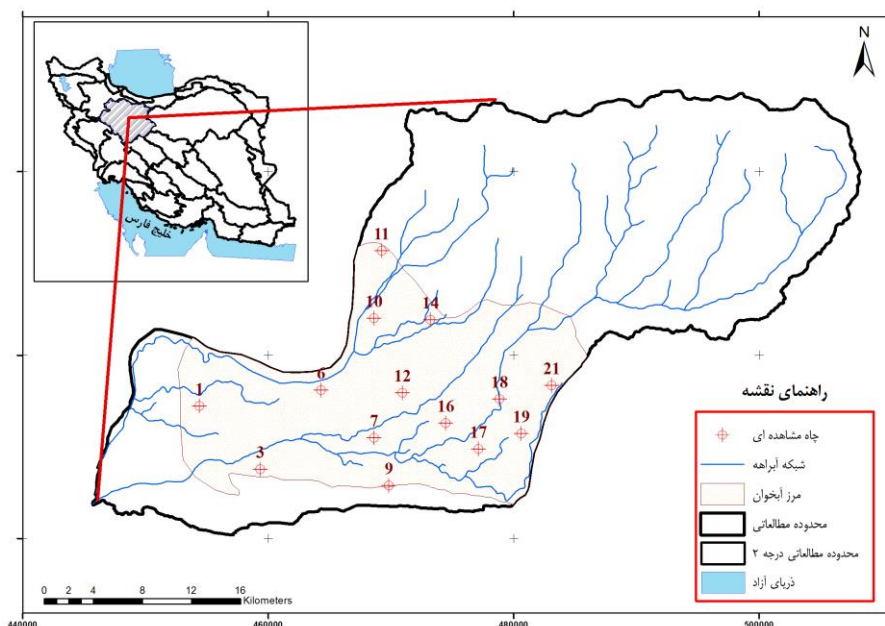
شکل ۱. روش تحقیق

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

محدوده مطالعاتی هشتگرد در نیمه شمالی حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۵۷۹ و ۵۹۱/۶ کیلومترمربع و حداکثر و حداقل ارتفاع به ترتیب ۴۰۵۸ و ۱۱۳۳ متر است. از مهم‌ترین سکونتگاه‌های منطقه می‌توان به شهر جدید هشتگرد و نظرآباد اشاره کرد. رودخانه کردان مهم‌ترین منبع آب سطحی این محدوده است که از ارتفاعات البرز

سرچشمه می‌گیرد. متوسط باران سالانه در دشت و ارتفاعات محدوده هشتگرد به ترتیب ۲۸۳/۲ و ۴۴۱/۸ میلی‌متر ثبت شده است. شبکه چاه‌های مشاهده‌ای منطقه با داشتن ۱۴ حلقه چاه سنجش رفتار سطح آب زیرزمینی را بررسی می‌کند. براساس آمار درازمدت سطح آب زیرزمینی بیانگر افت ۱۶/۵ متر سطح آب طی ۲۰ سال است. در شکل ۲ موقعیت منطقه مطالعه شده و در شکل ۳ هیدروگراف درازمدت آبخوان هشتگرد ارائه شده است.



شکل ۲. منطقه مطالعه شده



شکل ۳. هیدروگراف آبخوان هشتگرد

جدول ۱. بیلان آب زیرزمینی آبخوان هشترگرد - MCM

جریان زیرزمینی ورودی	نفوذ از بارندگی	نفوذ از جریان‌های سطحی	نفوذ آب برگشتی کشاورزی	نفوذ آب برگشتی صنعت	تخلیه از منابع آب زیرزمینی	زهکشی	تبخیر از آبخوان	خروجی آب زیرزمینی
۹۶/۶۱	۲۷/۳۸	۵۸/۸۷	۱۰۶/۶۴	۱۸/۳۴	۳۰۶/۸۴	۰	۰	۲۰/۴۷

روزانه بررسی شده برای تعیین خصوصیات آماری تحلیل می‌شوند. این اطلاعات ذخیره می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی با استفاده از مدل LARS-WG، ابتدا در مرحله کالیبره کردن اطلاعات جغرافیایی و داده‌های روزانه به مدل LARS-WG داده می‌شود. سپس در مرحله صحت‌سنجی با انتخاب یک مدل GCM و سناریو و تعیین دوره زمانی اقدام به تولید داده می‌شود. در نسخه ششم LARS-WG از مدل‌های GCM موجود در گروه مدل‌های جفت‌شده CMIP5 و سناریوهای RCP که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم سازمان ملل متحد (IPCC) در جدیدترین گزارش خود (گزارش پنجم) ارائه کرده است، استفاده می‌شود. پس از اطمینان از صحت و کارایی مدل LARS-WG 6 در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در محدوده مطالعاتی هشترگرد، داده‌های روزانه پارامترهای یادشده برای سه سناریوی انتشار در ۵ مدل محاسبه و شبیه‌سازی می‌شود.

مدل آب زیرزمینی

برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان از مدل MODFLOW در نرم‌افزار v10 GMS استفاده شد. براساس بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه، کلیه پارامترهای مؤثر در مدل وارد شد و برای یک دوره ۷ ساله شبیه‌سازی انجام گرفت. شرایط مرزی آبخوان دارای جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان، ساختار استراگرافی آبخوان شامل توپوگرافی، سطح آب و سنگ بستر، میزان تغذیه ناشی از نفوذ از بارندگی و رواناب سطحی، تخلیه منابع آب آبخوان، ضرایب هیدودینامیکی آبخوان و... پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل است [۱۴]. مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی برای مهرماه ۱۳۸۹ به‌عنوان نخستین گام شبیه‌سازی انتخاب و مدل بر این اساس واسنجی شد. مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی به‌عنوان نخستین گام برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شد. این شرایط با توجه به

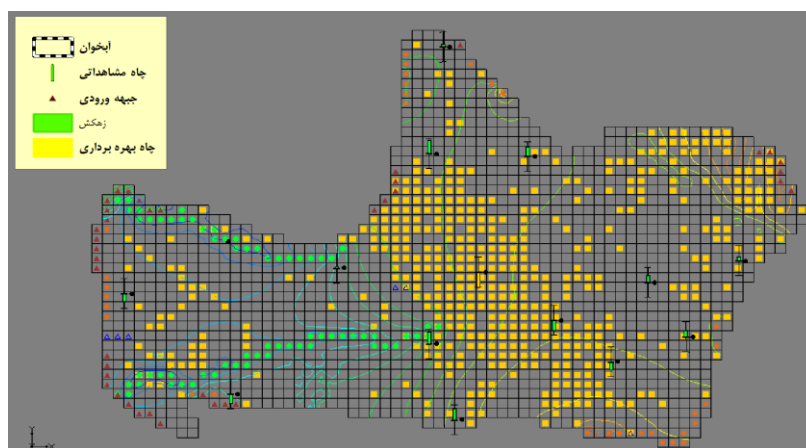
در محدوده آبخوان هشترگرد تعداد ۱۹۰۷ حلقه چاه عمیق با متوسط عمق ۹۸ متر و متوسط دبی ۱۲/۸ لیتر در ثانیه و ۴۷۵۴ حلقه چاه نیمه‌عمیق با متوسط عمق ۲۱/۵ متر با متوسط دبی ۱/۸۲ لیتر در ثانیه وجود دارد. ۱۸ رشته قنات با دبی متوسط ۵/۸ لیتر در ثانیه و ۲۰۴ چشمه با دبی متوسط ۰/۹۲ در ارتفاعات محدوده مطالعاتی قرار دارند. به طور کلی، حجم ۳۲۸/۰۶ میلیون مترمکعب به‌طور سالانه از محدوده آبخوان برداشت می‌شود. همچنین، برداشت آب از ۱۶۶ نهر سنتی منطقه با حجم ۴۰/۹۵ میلیون مترمکعب سالانه انجام شده و در بخش کشاورزی استفاده می‌شود. براساس آخرین آماربرداری سراسری منابع و مصارف، بیلان منابع آب زیرزمینی این آبخوان به صورت جدول ۱ ارائه می‌شود.

تغییر اقلیم

به‌منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم منطقه از مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سه دوره ۲۰۶۰-۲۰۸۰ (آینده دور)، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ (آینده میانه) و ۲۰۲۰-۲۰۴۰ (آینده نزدیک) شبیه‌سازی بارش و دما در منطقه انجام گرفت. به این منظور، براساس بانک اطلاعاتی IPCC، مدل‌های EC-ERATH، MPI-Esm-MR، Micro5، HadGem2Es و GFDL-CM3 برای شبیه‌سازی استفاده شدند. پس از دریافت اطلاعات با استفاده از مدل LARS-WG، ارزیابی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های هواشناسی انجام گرفت. LARS-WG مولد مصنوعی داده‌های آب‌وهوایی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار رود. خواص آماری داده‌های تولیدشده مشابه دوره آماری است. داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه برای یک سری متغیرهای اقلیمی مناسب مثل بارش، دمای کمینه، بیشینه و تابش (مگاژول بر مترمربع) ایجاد می‌شوند. ابتدا داده‌های آب‌وهوایی

مدل غیرماندگار جریان آب زیرزمینی، بیانگر ارزیابی رفتار آبخوان طی دوره شبیه‌سازی است و طی این دوره میزان تغذیه و تخلیه آبخوان در مدل وارد می‌شود. در شکل ۴ مدل مفهومی آبخوان هشتگرد ارائه شده است.

معادله جریان آب زیرزمینی انتخاب شد [۱۴]. پس از آن برای ۸۴ گام زمانی ماهانه، شبیه‌سازی غیرماندگار انجام گرفت که ۵ سال ابتدایی برای واسنجی مدل غیرماندگار و ۲ سال انتهایی برای صحت‌سنجی مدل به کار برده شد.



شکل ۴. مدل مفهومی آبخوان هشتگرد

که با تغییرات تنش‌های ورودی به آبخوان بیشترین حساسیت را نشان دادند. با توجه به روابط جریان آب زیرزمینی و نقش مهم هدایت هیدرولیکی، این پارامتر برای واسنجی مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی ارزیابی شد. به‌منظور واسنجی بهتر مدل در حالت ماندگار از روش‌های خودکار PEST در اجرای مدل استفاده شد و نتایج به‌دست آمده برای پارامتر هدایت هیدرولیکی نتایج مطلوبی را نشان داد. در حالت ناماندگار مدل کمی بیشترین حساسیت به ضریب ذخیره است.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل جریان آب زیرزمینی

با توجه به اجرای مدل کمی در محدوده آبخوان هشتگرد و واسنجی‌های صورت‌پذیرفته در منطقه، نتایج بیانگر حساسیت زیاد مدل کمی در حالت ماندگار به پارامتر هدایت هیدرولیکی است. براساس نتایج به‌دست آمده از بین ۱۴ چاه مشاهده‌ای در محدوده آبخوان، حساسیت چاه‌های ۳، ۶، ۱۰، ۱۱ و ۱۷ نسبت به سایر چاه‌های مشاهده‌ای بیشتر بوده است (جدول ۲). این زیاد بودن میزان حساسیت ناشی از تأثیر مقدار تغذیه و تخلیه آبخوان است

جدول ۲. اختلاف سطح آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در مدل‌سازی آبخوان هشتگرد-متر

چاه مشاهده‌ای	سطح آب مشاهده‌شده	سطح آب شبیه‌سازی‌شده	اختلاف
1	1139.61	1139.14	-0.46
3	1155.54	1154.11	-1.42
6	1161.18	1162.29	1.11
7	1179.29	1178.52	-0.76
9	1213.26	1213.84	0.58
10	1200.79	1199.08	-1.70
11	1188.65	1189.82	1.17
12	1209.03	1208.56	-0.46
14	1202.2	1202.13	-0.06
16	1217.74	1217.57	-0.16
17	1220.67	1219.18	-1.48
18	1208.26	1208.80	0.54
19	1209.53	1210.33	0.80
21	1198.85	1198.57	-0.27

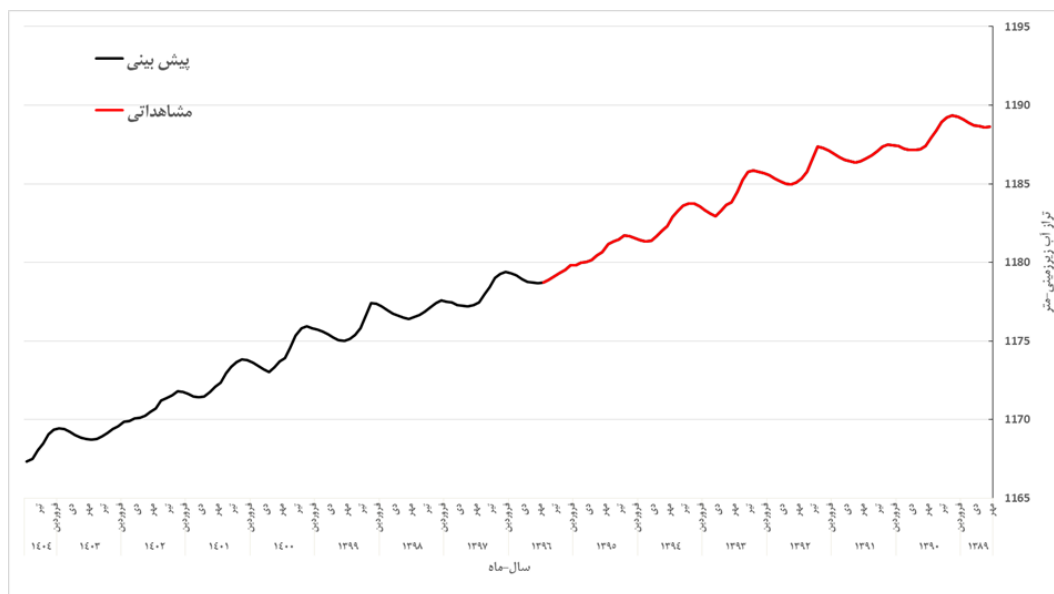
آبخوان در شرایط ادامه وضعیت موجود نشان داده شده است.

شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دما بر اثر تغییر اقلیم به‌منظور ارزیابی نتایج دوره پایه برای ارزیابی تغییر اقلیم از سه معیار میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات به منظور ارزیابی نتایج به‌صورت ماهانه برای سه پارامتر بارش، میانگین حداقل دما و میانگین حداکثر دما استفاده شد. در جدول‌های ۴-۶ ارزیابی براساس میانگین، در جدول‌های ۷-۹ ارزیابی براساس انحراف معیار و در جدول ۱۰-۱۲ ارزیابی براساس ضریب تغییرات انجام گرفته است.

در جدول ۳ میزان خطای مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ بیانگر دقت مناسب مدل پس از واسنجی برای پیش‌بینی است. پس از شبیه‌سازی و ارزیابی مناسب مدل کمی آبخوان، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان برای یک دوره ۸ ساله تا سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ با در نظر گرفتن ادامه روند موجود انجام گرفت. بر این اساس، نتایج ادامه شرایط موجود نشان می‌دهد این آبخوان در انتهای سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ نسبت به مهر ۱۳۸۹، بیش از ۲۲ متر افت خواهد داشت و این میزان افت طی ۸ سال پیش‌بینی، به بیش از ۱۱ متر خواهد رسید. در شکل ۵ هیدروگراف

جدول ۳. آنالیز خطای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

پارامتر خطا	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار
میانگین خطا	-۰/۱۸۵	-۰/۰۳۳
میانگین مطلق خطا	۰/۷۸۹	۱/۸۹۹
میانگین مجذور خطا	۰/۹۳۲	۲/۳۸۳



شکل ۵. هیدروگراف آبخوان هشتگرد در شرایط ادامه وضعیت موجود

جدول ۴. مقادیر میانگین ماهانه بارش در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (میلی‌متر)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
بارش مشاهداتی	29.55	26.92	40.03	43.07	16.08	2.32	4.46	3.59	2.02	19.68	27.12	34.33	20.76
بارش شبیه‌سازی	31.88	27.33	40.41	42.18	19.81	3.22	4.31	5.62	1.89	20.06	28.42	41.37	22.21
تفاوت	2.33	0.41	0.38	-0.89	3.73	0.9	-0.15	2.03	-0.13	0.38	1.3	7.04	1.44

جدول ۵. مقادیر میانگین دمای حداقل در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
دمای مشاهداتی	-1.9	-0.06	3.87	8.81	12.93	17.27	19.38	19.57	15.91	11.2	4.55	0.39	9.33
دمای شبیه‌سازی	-2.22	-0.05	3.97	8.8	12.97	16.75	19.28	19.4	15.7	11.06	5.04	0.4	9.26
تفاوت	-0.32	0.01	0.1	-0.01	0.04	-0.52	-0.1	-0.17	-0.21	-0.14	0.49	0.01	-0.07

جدول ۶. مقادیر میانگین دمای حداکثر در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
دمای مشاهداتی	6.93	10.03	15.28	21.08	27.06	33.25	35.56	34.96	30.8	23.97	14.46	9.2	21.88
دمای شبیه‌سازی	6.35	9.69	15.42	21.01	27.26	32.96	35.42	34.82	30.79	23.98	14.84	9.07	21.80
تفاوت	-0.58	-0.34	0.14	-0.07	0.2	-0.29	-0.14	-0.14	-0.01	0.01	0.38	-0.13	-0.08

جدول ۷. مقادیر انحراف معیار ماهانه بارش در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (میلی‌متر)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
بارش مشاهداتی	21.12	19.35	27.46	30.20	8.94	3.67	7.33	10.15	3.87	29.70	16.43	21.78	16.67
بارش شبیه‌سازی	21.83	16.18	22.05	27.98	11.66	3.21	6.39	10.66	3.37	25.04	16.78	29.81	16.25
تفاوت	0.71	-3.17	-5.41	-2.23	2.72	-0.46	-0.94	0.51	-0.50	-4.66	0.35	8.03	-0.42

جدول ۸. مقادیر انحراف معیار دمای حداقل در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
دمای مشاهداتی	2.58	1.97	1.83	1.26	0.95	1.32	1.01	1.11	0.82	1.28	1.33	1.72	1.43
دمای شبیه‌سازی	0.89	0.71	0.81	0.62	0.48	0.72	0.51	0.53	0.55	0.52	0.53	0.77	0.64
تفاوت	-1.70	-1.26	-1.02	-0.65	-0.47	-0.60	-0.49	-0.58	-0.27	-0.76	-0.79	-0.96	-0.80

جدول ۹. مقادیر انحراف معیار ماهانه دمای حداکثر در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
دمای مشاهداتی	3.08	2.40	2.65	2.07	1.38	1.20	1.14	0.70	1.06	1.54	2.05	2.41	1.81
دمای شبیه‌سازی	1.21	0.86	1.05	0.80	0.52	0.54	0.48	0.41	0.48	0.58	0.78	0.68	0.70
تفاوت	-1.87	-1.54	-1.60	-1.27	-0.87	-0.66	-0.67	-0.29	-0.58	-0.96	-1.27	-1.73	-1.11

جدول ۱۰. مقادیر ضریب تغییرات بارش در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (میلی‌متر)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
بارش مشاهداتی	0.71	0.72	0.69	0.70	0.56	1.58	1.64	2.83	1.92	1.51	0.61	0.63	0.80
بارش شبیه‌سازی	0.68	0.59	0.55	0.66	0.59	1.00	1.48	1.90	1.78	1.25	0.59	0.72	0.73
تفاوت	-0.03	-0.13	-0.14	-0.04	0.03	-0.59	-0.16	-0.93	-0.13	-0.26	-0.02	0.09	-0.07

جدول ۱۱. مقادیر ضریب تغییرات دمای حداقل در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
دمای مشاهداتی	-1.36	-32.83	0.47	0.14	0.07	0.08	0.05	0.06	0.05	0.11	0.29	4.41	0.15
دمای شبیه‌سازی	-0.40	-14.20	0.20	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.11	1.93	0.07
تفاوت	0.96	18.63	-0.27	-0.07	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.07	-0.19	-2.49	-0.08

جدول ۱۲. مقادیر ضریب تغییرات دمای حداکثر در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۶ (درجه سلسیوس)

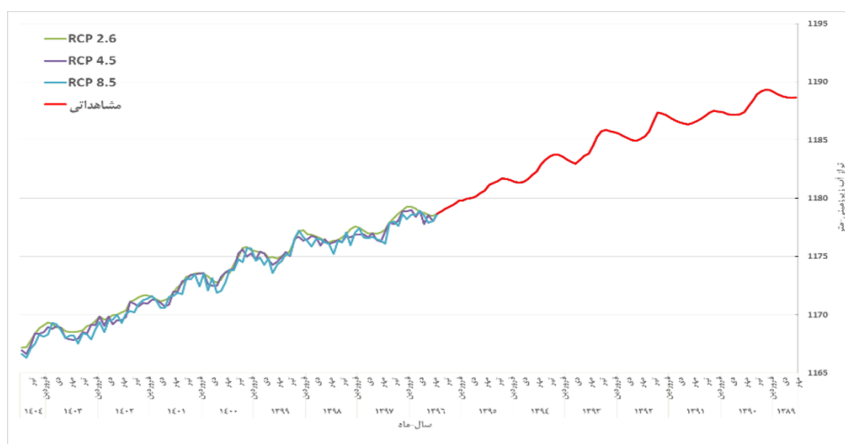
سالانه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	ژوئیه	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	ماه
0.08	0.26	0.14	0.06	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.10	0.17	0.24	0.44	دمای مشاهداتی
0.03	0.07	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.07	0.09	0.19	دمای شبیه‌سازی
-0.05	-0.19	-0.09	-0.04	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.06	-0.11	-0.15	-0.25	تفاوت

بررسی نتایج شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی بیانگر افزایش میزان میانگین بارش و کاهش دما در بیشتر ماه‌های سال است که بررسی تفاوت بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح ۹۵ درصد بیانگر معنادار بودن اختلاف و مناسب بودن نتایج شبیه‌سازی است. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد میانگین بارش در برخی مناطق بر اثر تغییر اقلیم افزایش داشته است و این موضوع سبب بروز سیلاب‌ها به‌خصوص با تغییر در زمان سیلاب می‌شود. این موضوع با افزایش دما در ماه مارس نیز همخوانی دارد و در این ماه با توجه به افزایش دما، میزان ذوب برف در مناطق برفگیر افزایش داشته و سبب افزایش رواناب می‌شود. به طور کلی، نتایج بیانگر دقت مناسب و ارزیابی خوب مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای بارش، حداقل دما و حداکثر دما در منطقه مطالعه شده است. بررسی نتایج نشان داد فقط در ماه‌های ژانویه، مه، آگوست و دسامبر بارش شبیه‌سازی شده بیشتر از بارش مشاهداتی است و در بقیه ماه‌ها می‌توان گفت که میزان بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با هم برابر هستند. در تحلیل وضعیت دمای حداقل نیز نتایج نشان داد اختلاف بین میانگین دمای حداقل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بسیار جزئی بوده و در برخی ماه‌ها هم برابر است به‌طوری که میزان دمای حداقل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، ژوئیه،

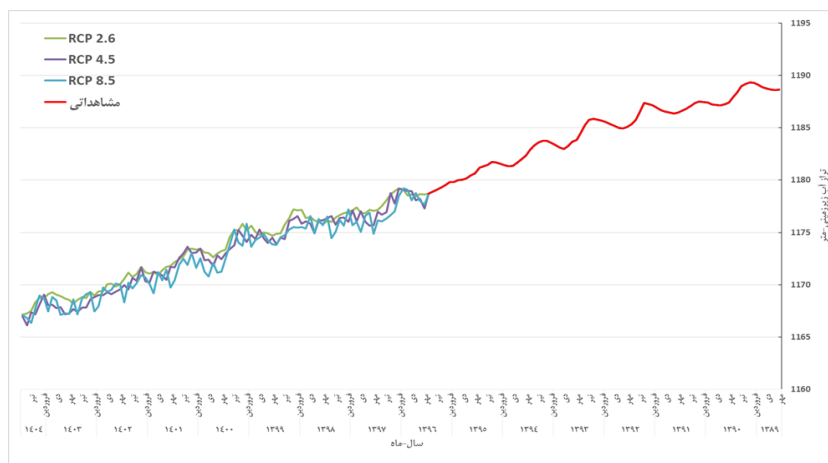
سپتامبر و اکتبر تقریباً برابر هستند. همچنین، تحلیل وضعیت دمای حداکثر از نظر شبیه‌سازی نیز نشان داد اختلاف بین میانگین دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بسیار جزئی است، به‌طوری که میزان دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تقریباً برابر است.

پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم

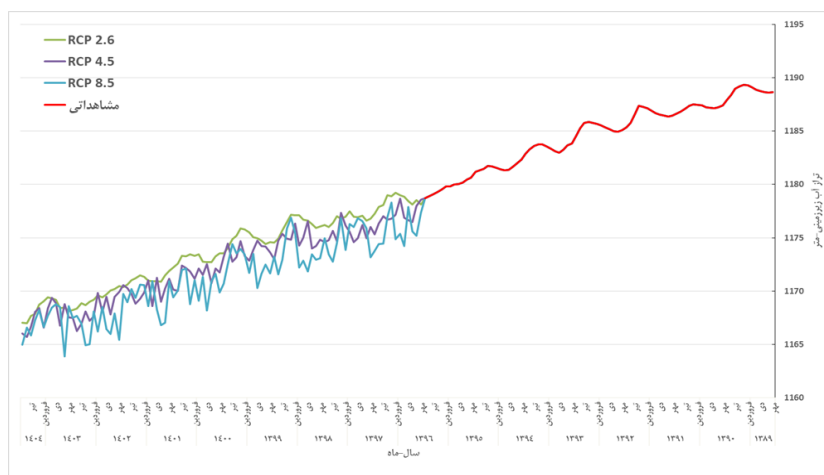
به‌منظور پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم در سه دوره زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت براساس گزارش‌هایی تأییدشده گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP5) از مدل‌های HadGem2Es، Micro5، MPI-EC-ERATH، Esm-MR و GFDL-CM3 استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی از مدل استخراج و در مدل آب زیرزمینی قرار داده شد. بر این اساس، هیدروگراف آبخوان برای هر یک از مدل‌های پنج‌گانه تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 برای سه دوره پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت تحلیل شده است. در شکل ۶ نتایج پیش‌بینی کوتاه‌مدت با مدل EC-EARTH، در شکل ۷ نتایج پیش‌بینی میان‌مدت با مدل MPI-ESM-MR و در شکل ۸ نتایج پیش‌بینی بلندمدت با مدل Miroc5 ارائه شده است.



شکل ۶. تحلیل هیدروگراف آبخوان هشتگرد تحت مدل EC-EARTH در دوره کوتاه‌مدت



شکل ۷. تحلیل هیدروگراف آبخوان هشتگرد تحت مدل MPI-ESM-MR در دوره میان مدت



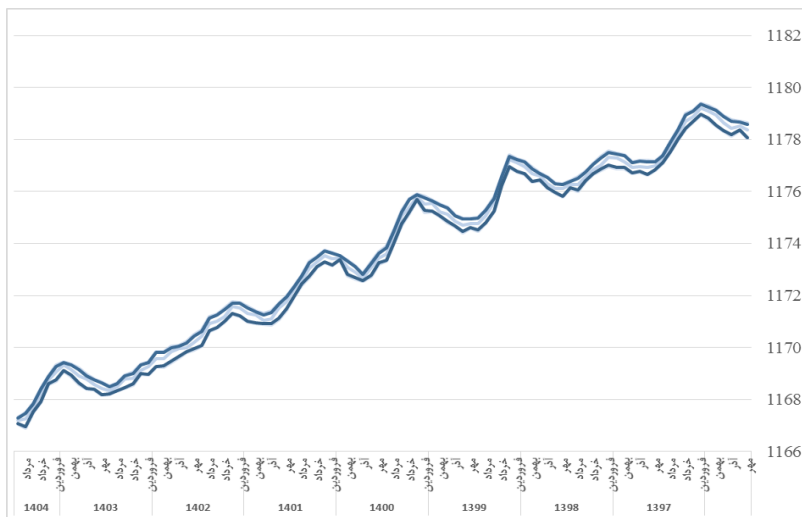
شکل ۸. تحلیل هیدروگراف آبخوان هشتگرد تحت مدل Miroc5 در دوره بلندمدت

نتایج نشان می‌دهد تراز آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد طی دوره پیش‌بینی در حال پایین آمدن است. در این نمودار داده‌های سه دوره زمانی ۵ مدل مد نظر در سناریوی RCP2.6 مرتب‌سازی شده همان‌طور که مشاهده می‌شود باند ۹۵ درصد عدم قطعیت نسبت به ۲ سناریوی دیگر نزدیک‌تر و مناسب‌تر است.

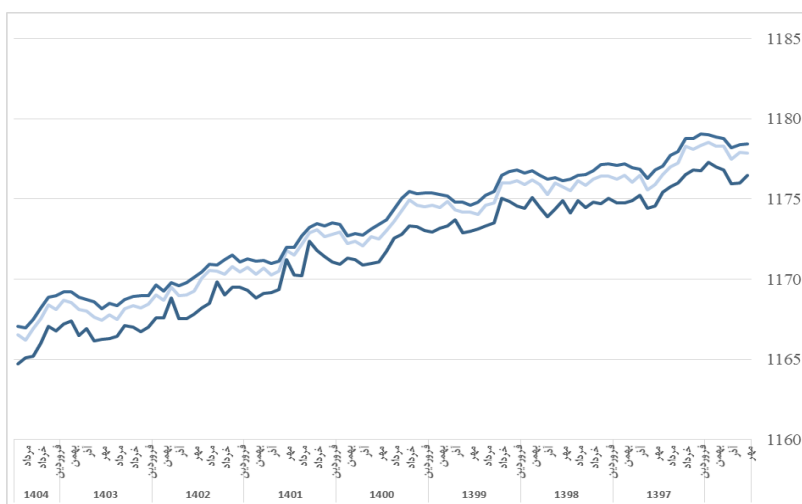
در این سناریوی انتشار نیز تراز آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد طی دوره پیش‌بینی در حال پایین آمدن است که در این نمودار داده‌های سه دوره زمانی ۵ مدل مد نظر در سناریوی RCP4.5 مرتب‌سازی شده است. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، باند ۹۵ درصد عدم قطعیت این سناریو نسبت به سناریوی RCP8.5 خطوط نموداری به هم نزدیک‌تر است.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر ادامه روند افت آبخوان است و اختلاف بین حداقل و حداکثر تراز آب زیرزمینی در انتخاب دوره افزایش دارد. همچنین، رفتار نوسانی سناریوی RCP 8.5 که به‌عنوان بدبینانه‌ترین سناریوی انتشار است، بر تراز آب زیرزمینی آبخوان تأثیر بیشتری دارد. بنابراین، تحلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان بسیار اهمیت دارد.

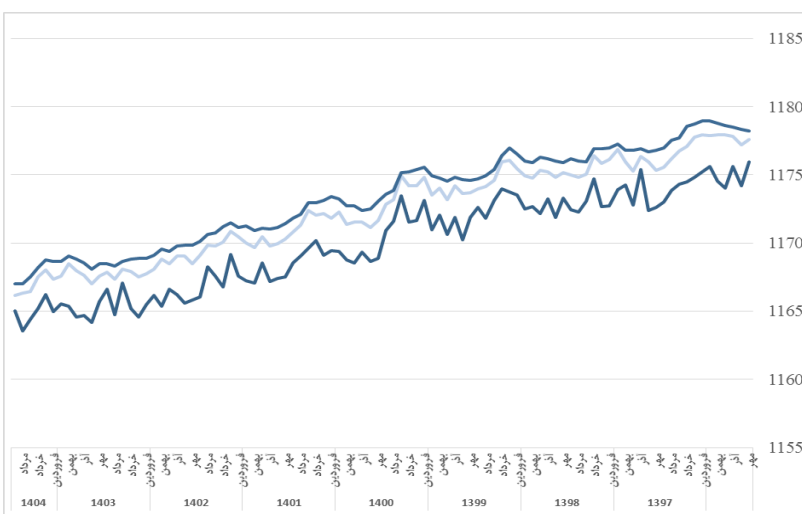
تحلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم
 هنگام مدل‌سازی، عدم قطعیت ناشی از داده‌ها و همچنین مدل‌سازی وجود دارد. بر این اساس، با توجه به ذات عدم قطعیت در پارامترهای مختلف در مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییر اقلیم میزان عدم قطعیت برای سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به صورت شکل‌های ۹-۱۱ ارائه شده است.



شکل ۹. تحلیل عدم قطعیت سناریوی RCP 2.6 در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان هشنگرد



شکل ۱۰. تحلیل عدم قطعیت سناریوی RCP 4.5 در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان هشنگرد



شکل ۱۱. تحلیل عدم قطعیت سناریوی RCP 8.5 در پیش‌بینی هیدروگراف آبخوان هشنگرد

زیرزمینی آبخوان وجود دارد. بنابراین، میزان عدم قطعیت در این سناریو نسبت به دو سناریوی دیگر بیشتر است. نتایج مطالعه حاضر در مقایسه با نتایج مطالعات انجام گرفته در این زمینه، بیانگر هم‌راستایی نتایج است، به گونه‌ای که در بیشتر مناطق اگرچه میزان بارش در شرایط تغییر اقلیم افزایش دارد، اما میزان تغذیه آبخوان و افزایش تراز آب زیرزمینی وجود ندارد. از سوی دیگر، در مطالعات بررسی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی به بحث عدم قطعیت نتایج سناریوهای اقلیمی برای پیش‌بینی پرداخته نشده بود که نتایج مطالعه حاضر باند عدم قطعیت نتایج را ارائه می‌دهد. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند برای تدوین راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت نتایج تغییر اقلیم به کار برده شود.

منابع

- [1]. Purkey DR, Joyce B, Vicuna S, Hanemann MW, Dale LL, Yates D, Dracup JA. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*. 2008 Mar 1;87(1):109-22.
- [2]. Kardan MH, Roozbahani, A. Evaluation of Bayesian networks model in monthly groundwater level prediction (Case study: Birjand aquifer). *Journal of water and irrigation management*. 2015, 5: 139-151 [Persian]
- [3]. Morid S, Bavani AR. Exploration of potential adaptation strategies to climate change in the Zayandeh Rud irrigation system, Iran. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 2010 Apr;59(2):226-38.
- [4]. IPCC-TGCI. 2007. General Guidelines on The use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, K. Alfsen, E. Barrow, B. Bass, X, 66p.
- [5]. Goudarzi M, Salahi B, Hoseini A. Study on Effects of Climate Changes on Surface Runoff Changes Case Study: Urmia Lake Basin. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2015; 2(2): 175-189. doi: 10.22059/ije.2015.56152. [Persian]
- [6]. Nistor, MM. Climate change effect on groundwater resources in South East Europe during 21st century. *Quaternary International*. 2019 Feb 10;504:171-80.

همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، تراز آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد طی دوره پیش‌بینی در حال پایین آمدن است. نتایج داده‌های سه دوره زمانی پنج مدل مد نظر در سناریوی RCP8.5 مرتب‌سازی شده و بر اساس آن، باند ۹۵ درصد عدم قطعیت این سناریو نسبت به ۲ سناریوی دیگر طبق خطوط نموداری از هم دورتر است.

نتیجه‌گیری

محدودیت منابع آب و توزیع نامتجانس آن در بخش‌های مختلف کشور سبب شده است که نسبت به بسیاری از کشورهای دیگر حساسیت به پدیده تغییر اقلیم حساس‌تر و آسیب‌پذیرتر باشد. بنابراین، شناخت وضعیت فعلی و به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آتی و تدوین راهکارهای سازگاری بسیار اهمیت دارد. با توجه به ضرورت بررسی این موضوع، ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد بررسی شد. بر این اساس، از پنج مدل CMIP برای شبیه‌سازی پارامتر بارش و دما و در نهایت، ریزمقیاس‌نمایی با بهره‌گیری از مدل LARS-WG استفاده شد. با استفاده از مدل‌های MPI-Micro5, HadGem2Es, Esm-MR, EC-ERATH و GFDL-CM3 تحت سه سناریوی RCP 8.5 و RCP 4.5, RCP2.8 شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی انجام شد. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده در مدل عددی آبخوان اعمال شد. به‌منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی از مدل عددی MODFLOW برای یک دوره هفت‌ساله استفاده شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان، شبیه‌سازی آتی بدون در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم و همچنین، با در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده برای دوره آتی نشان داد افت آبخوان ادامه‌دار است و اگرچه میزان بارش در سطح منطقه افزایش ناچیزی دارد، اما میزان بهره‌برداری زیاد و افزایش دما سبب کاهش تغذیه آبخوان می‌شود. به‌منظور بررسی شرایط آتی با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف موجود اعم از نتایج مدل‌سازی عددی و تغییر اقلیم، باند عدم قطعیت در سطح ۹۵ درصد برای هیدروگراف آبخوان در شرایط آتی بررسی شد. نتایج براساس سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه براساس پنج مدل اقلیمی ارزیابی شد که نتایج نشان داد در سناریوی RCP 8.5 بیشترین فاصله بین حداقل و حداکثر تراز آب

- [7]. Ansari s, Massah Bavani A, Roozbahani A. Effects of Climate Change on Groundwater Recharge (Case Study: Sefid Dasht Plain). *Journal of Water and Soil*, 30(2), 416-431. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39574>. [Persian]
- [8]. Mesmarian Z, Massahbavani A, Javadipirbazari S. Climatechange impact on Groundwater budgetof ShahreKord plain in the future periods. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2016; 3(2): 233-242. doi: 10.22059/ije.2016.59664. [Persian]..
- [9]. Jallili Kh, Moradi HR, Bozorg hadad O. Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Islam Abad Aquifer and Land Allocation Optimization. *Desert Ecosystem Engineering Journal*; 2016; 5 (11): 117-131. [Persian]
- [10]. Abedini M, Ziai A, Shafiei M, Ghahraman B, Ansari H, Meshkini J. Uncertainty Assessment of Groundwater Flow Modeling by Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimation Method (Case Study: Bojnourd Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 2017; 10(6): 755-769. [Persian]
- [11]. Hamzeh S, Bagherpour Z, Delghandi M, Kardan Moghaddam H. Risk assessment of climate change impacts on groundwater level (Case study: Gotvand Aghili aquifer). *Iranian journal of Ecohydrology*, 2018; 5(1): 111-122. doi: 10.22059/ije.2017.235715.645. [Persian]
- [12]. Mortazavi Zadeh F, Godarzi M. Evaluation of Climate Change Impacts on Surface Runoff and Groundwater Using HadGEM2 Climatological Model (Case Study: Hashtgerd). *Journal of Water and Soil*, 2018 32(2), 433-436. [Persian]
- [13]. Khalaj M, Kholghi M, Saghafian B, Bazrafshan J. Investigation about climate change and human activity effects on groundwater level and groundwater quality in semiarid region. *Iran Water Resources Research*, 2019; 15(2): 278-290. [Persian]
- [14]. Moghaddam HK, Moghaddam HK, Kivi Z.R, Bahreinimotlagh M, Alizadeh M.J. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, 9, p.100237.