Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۶/ شماره ۲/ پیاپی ۴۵/ تابستان ۱۴۰۱ (۱۵-۳۲)
https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10020.2340

مقاله پژوهشی

مطالعهٔ طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعهٔ موردی: محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد)

علی یوسفی[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۲*]، جهانگیر پرهمت[۳] و حسین بابازاده[۴]

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی راهکارهای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در راستای سازگاری با تغییراقلیم است. منطقهٔ مورد مطالعهٔ این پژوهش، منطقهٔ هشتگرد واقع در غرب استان البرز به وسعت ۱۱۷۰/۶ کیلومترمربع، و یک آبخوان آبرفتی با مساحت ۴۱۰/۷ کیلومترمربع است. براین‌اساس شبیه‌سازی دو پارامتر بارش و دما در منطقهٔ هشتگرد با سه مدل اقلیمی HadGEM2-ES ، EC-ERATH و GFDL-CM3، با استفاده از سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 انجام گرفت. پس از شبیه‌سازی اقلیمی، ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل LARS-WG v6 انجام گرفت. پس از ارزیابی اثر تغییراقلیم در منطقه، به‌منظور ارزیابی وضعیت کمّی آبخوان، با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی انجام گرفت و پیش‌بینی وضعیت آتی تحت شرایط تغییر اقلیم آنالیز شد. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی حاکی از افزایش میانگین بارش و کاهش دما در اکثر ماه‌های سال است که بررسی تفاوت بین مقادیر به‌دست‌آمده در سطح آماری ۹۵ درصد حاکی از معنی‌داربودن اختلاف و مناسب‌بودن نتایج شبیه‌سازی است. از طرفی نتایج شبیه‌سازی وضعیت کمّی آبخوان حاکی از ادامهٔ روند افت آبخوان بوده و نتایج استخراجی نشان می‌دهد که بیشترین میزان افت در سناریوی انتشار RCP 8.5 و کمترین میزان افت در سناریوی RCP 2.6 ثبت شده است. میزان افت آبخوان در سناریوی RCP 2.6 در سه مدل بین ۷/۸ تا ۸ متر، در سناریوی RCP 4.5 بین ۷/۹ تا ۸/۸ متر و در سناریوی RCP 8.5 بین ۸/۵ تا ۹/۷ متر به‌دست آمد. پس از ارزیابی وضعیت آتی، سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه با استفاده از ۵ راهکار ارزیابی با ارزیابی بهبود وضعیت نسبی آبخوان آنالیز شد. نتایج اِعمال راهکارهای تعادل‌بخشی نشان داد که در سناریوی تأمین آب شرب از طریق سد طالقان و جایگزینی آب چاه‌های منطقه، بایستی حجم ۲۰ میلیون مترمکعب آب به‌صورت انتقالی برای تأمین آب شرب شهر هشتگرد تخصیص یابد و جایگزین ۲۰ میلیون مترمکعب آب برداشت‌شده از چاه‌های منطقه شود. براین‌اساس در این سناریو ضمن انتقال آب و در نظر داشتن ضریب آب برگشتی مصارف شرب به میزان ۶۰ درصد، مشخص شد حجمی معادل ۳۲ میلیون مترمکعب آب کمتر از آبخوان برداشت می‌شود. در نتیجه تدوین راهکارهای اثربخش برای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در تمام محدوده‌های مطالعاتی کشور که در شرایط وقوع تغییرات اقلیمی نیز حادتر خواهد شد، بسیار حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان هشتگرد، سازگاری با تغییراقلیم، مدل MODFLOW.

ارجاع: یوسفی ع، سرائی تبریزی م، پرهمت ج، و بابازاده ح، ۱۴۰۱. مطالعهٔ طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعهٔ موردی: محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد). مجله پژوهش آب ایران، ۴۵: ۱۵-۳۲. https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10020.2340

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳- استاد پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
*** نویسنده مسئول**: **m.sarai@srbiau.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک است؛ به‌خصوص در نواحی که با کمبود آب سطحی مواجه‌اند. این کمبود در کنار تنش‌های اقلیمی سبب شده تا سیستم بهره‌برداری منابع آب با پیچیدگی همراه شود. پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب در کنار بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی از منابع آب زیرزمینی و وابستگی شدید بهره‌برداران به آن باعث شده تا تدوین یک رویکرد سیستمی در مدیریت عرضه و تقاضای آب به‌منظور توسعه روشن باشد. با توجه به افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی، مدیریت برداشت از این منابع و کنترل سطح برداشت بسیار مهم بوده و بسیاری از سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان برای تأمین این هدف مطرح شده‌اند. مدیریت آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان با تغییرات آب‌وهوا، رشد اقتصادی-اجتماعی و حکمرانی نامناسب آب، مختل شده است (فریجا و همکاران، ۲۰۱۵). ازآنجایی‌که مصرف آب بدون برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک که تنها منبع تأمین آن منابع زیرزمینی هستند، سبب افت شدید شده است، متولیان آب کشور را بر آن داشته تا طرح‌های تعادل‌بخشی و برون‌رفت از بحران آب زیرزمینی را ارائه دهند. ارائهٔ سناریوهای مختلف درجهت تعادل‌بخشی بدون توجه به میزان اثرگذاری و ارزیابی پایداری آبخوان نمی‌تواند موجب بهبود مدیریت آبخوان شود (زنگنه و همکاران، ۱۴۰۰).

فرایند تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش، مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی است. این پدیده به‌دلیل ابعاد علمی و کاربردی (اثرات محیطی و اقتصادی-اجتماعی) آن از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی، مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن، بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌کنند. تغییرات معنی‌دار دمای کرهٔ زمین با گرمایش جهانی به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در قرن حاضر مورد توجه قرار گرفته‌است (کاردان‌مقدّم و روزبهانی، ۱۳۹۴). تغییرات اقلیم باعث تغییر در مدت، شدت، فرم و زمان بارش در مناطق مختلف کره‌زمین می‌شود که این مسئله باعث تغییر در تغذیهٔ منابع آب، به‌خصوص منابع آب زیرزمینی می‌شود؛ بنابراین این تغییر در تغذیهٔ منابع آب زیرزمینی باعث تنش‌هایی در عرصهٔ مدیریت منابع آب می‌شود. رشد فزایندهٔ صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل‌زدایی و تخریب محیط‌زیست از طرف دیگر طی دهه‌های اخیر، افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در سطح کرهٔ زمین را به‌دنبال داشته‌است (IPCC-TGCIA, 2007). اثرات تغییر اقلیم به‌صورت مستقیم بر میزان آبدهی منابع آب سطحی و به‌طور غیرمستقیم بر میزان ذخیرهٔ آبخوان‌ها تأثیرگذار است. ارتباط تنگاتنگی بین اجزای چرخهٔ هیدرولوژیک و سیستم اقلیمی وجود دارد که سبب می‌شود 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. بررسی تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب و به‌طور خاص بر رواناب، می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های آیندهٔ مدیریت منابع آب باشد. نیستور (۲۰۱۹) ارزیابی اثرات تغییراقلیم بر تغییرات آب زیرزمینی در جنوب شرق اروپا را انجام داد. در این تحقیق روش‌های مختلفی برای ارزیابی تأثیر تغییرات آب‌وهوا بر روی منابع آب جنوب‌شرق اروپا استفاده شد. ازجمله مدل‌های آب‌وهوایی و داده‌های پوشش زمین در دو زمان، در حال حاضر (۲۰۱۱-۲۰۴۰) و آینده (۲۰۴۱-۲۰۷۰)، برای ارزیابی اثر آب‌وهوا بر منابع آب زیرزمینی استفاده شد. یافته‌ها حاکی از تأثیر آب‌وهوایی بسیار زیاد در حوضهٔ 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 است. دیناریک و کوه‌های آلپ مناطقی با تأثیر آب‌وهوای کم و بسیار کم بر آب‌های زیرزمینی هستند. این مناطق دارای آب‌وهوای بسیار مرطوب هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حدود نیمی از قلمرو اروپای جنوب‌شرقی با خشکسالی روبه‌رو است و محیط‌زیست، آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی برانگیخته می‌شوند. مطالعات گسترده‌ای در زمینهٔ اثر تغییراقلیم بر منابع آب زیرزمینی در سطح کشور انجام گرفته‌است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)، حمزه و همکاران (۱۳۹۷)، زیدعلی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹) و رسائی و همکاران (۱۳۹۹) اشاره داشت. نتایج کلی این تحقیقات حاکی از کاهش میزان تغذیه از جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به آبخوان و افزایش نیاز آبی و درنتیجه افزایش برداشت و افت آبخوان بوده‌است (بی‌نام، ۱۳۹۷؛

www.SID.ir

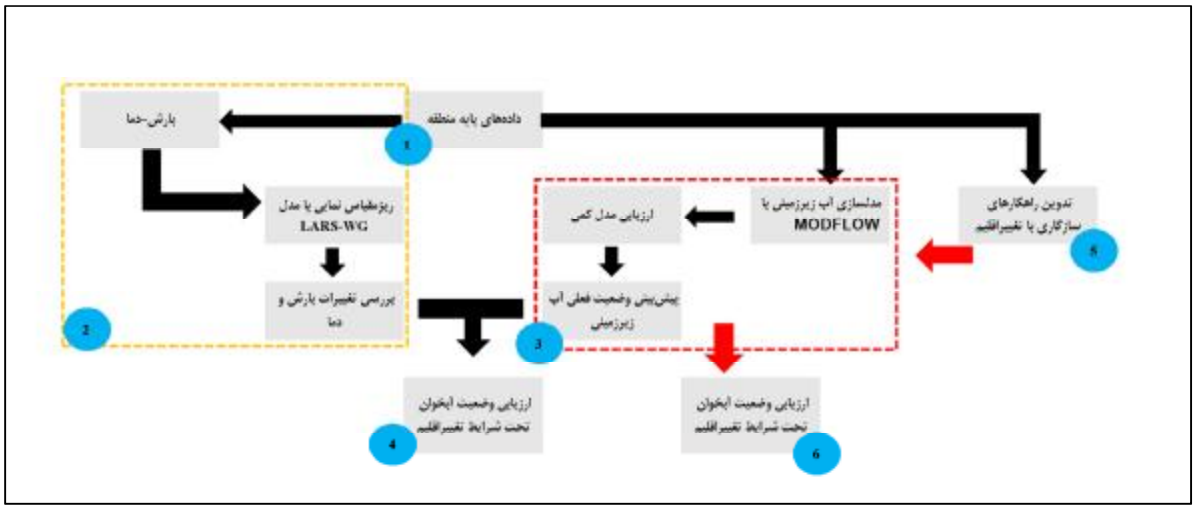
Archive of SID

رسائی و همکاران، ۱۳۹۹). پرهمت و همکاران (۱۳۹۷) مدلسازی را به‌عنوان ابزاری در پیش‌بینی شرایط آبخوان، تبادل بین منابع آب و اثرات تغییرات اقلیمی بر این منابع درجهت بهبود اهداف مدیریتی آبخوان مورد استفاه قرار دادند و سپس با استفاده از مدل MODFLOW در محیط GMS و مقایسهٔ سه سناریو نشان دادند که اگرچه عامل تغییرات اقلیمی در افت آبخوان دخالت داشته است، اما فاکتور اصلی افت شدید آبخوان، بهره‌برداری بیش از حد بوده‌است. مرتضوی‌زاده و گودرزی (۱۳۹۷)، ارزیابی اثرات تغییراقلیم را با استفاده از مدل HadGEM2 در محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد با استفاده از دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 مورد بررسی قرار دادند. نتایج ارائه‌شده نشان داد که افت این آبخوان تحت تأثیر پدیدهٔ تغییر اقلیم قرار داشته و تا سال ۲۰۴۰ میزان افت این آبخوان، ۱۸ متر خواهد بود. رسائی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی عدم‌قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم در شبیه‌سازی تراز آبخوان هشتگرد پرداختند و نتایج نشان داد که میزان عدم‌قطعیت در سناریوهای بدبینانه نسبت‌به سناریوهای خوش‌بینانه افزایش دارد. نتایج کلی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین با توجه به مطالعات گسترده، اثرات تغییر اقلیم بر آبخوان هشتگرد در راستای مدیریت بهره‌برداری، مطالعهٔ حاضر در راستای طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی انجام گرفته‌است؛ بنابراین هدف از این مطالعه ارزیابی راهکارهای تعادل‌بخشی در راستای تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب زیرزمینی این منطقه است. شناخت اثرات تغییر اقلیم بدون برنامه‌ریزی در راستای سازگاری با این واقعه نمی‌تواند در راستای مدیریت پایدار منابع آب مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

روش انجام کار

در گام اول شبیه‌سازی، دو پارامتر بارش و دما در منطقه، با استفاده از سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 براساس گزارش پنجم IPCC انجام گرفت. سپس سه مدل HadGem2Es، EC-ERATH و GFDL-CM3 انتخاب و پس از شبیه‌سازی اقلیمی، ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل LARS-WG v6 انجام گرفت. در گام بعدی پس از شبیه‌سازی اقلیمی، با استفاده از مدل MODFLOW تحلیل وضعیت فعلی و آتی آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارزیابی وضعیت آتی، سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان، شامل پنج سناریوی مدیریتی (S_1، S_2، S_3، S_4 و S_5) درجهت بهبود اطلس منابع آب زیرزمینی به‌ترتیب شامل کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، تغذیهٔ مصنوعی آبخوان و انتقال آب از سدهای مجاور درجهت تأمین آب شرب و جایگزینی آب زیرزمینی به‌منظور سازگاری با تغییراقلیم شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت میزان بهبود وضعیت نسبی آبخوان تحت اِعمال سناریوهای مختلف تعیین شد. شکل ۱ به‌طور شماتیک چارچوب و مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- روندنمای مراحل مختلف انجام پژوهش

www.SID.ir

Archive of SID

منطقهٔ طرح

محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد با کد ۴۱۰۵ در تقسیم‌بندی شرکت ملی مدیریت منابع آب- وزارت نیرو، واقع در غرب استان البرز به وسعت ۱۱۷۰/۶ کیلومترمربع و با آبخوان آبرفتی با مساحت ۴۱۰/۷ کیلومترمربع است (شکل ۲). این محدودهٔ مطالعاتی در نیمهٔ شمالی حوزهٔ آبریز دریاچهٔ نمک واقع شده است. رودخانهٔ کردان، مهم‌ترین منبع آب سطحی این منطقه، از بخش شمالی سرچشمه گرفته و پس از عبور از مناطق مرکزی دشت، از بخش جنوبی خارج می‌شود. اغلب بهره‌برداری از منابع آب این منطقه توسط چاه انجام می‌شود که سالانه ۳۲۸ میلیون مترمکعب آب از آبخوان برداشت شده و بیشتر مصارف آن در بخش کشاورزی است. آبخوان آبرفتی هشتگرد در اراضی مخروط‌افکنه‌ای از نوع آزاد بوده که به سمت جنوب آبخوان چند لایه شده و کیفیت آب زیرزمینی در لایه‌های محبوس زیرین، مناسب‌تر از لایهٔ آزاد است. از کل حجم آب مورد بهره‌برداری در این منطقه، از این منابع آبی سالانه، ۲۹۵/۷ میلیون مترمکعب برای مصارف کشاورزی، ۲۴/۳ میلیون مترمکعب برای شرب و ۸ میلیون مترمکعب برای بخش صنعت بهره‌برداری می‌شود (بی‌نام، ۱۳۹۷؛ رسائی و همکاران، ۱۳۹۹).

در آبخوان هشتگرد، رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی بین ۱۱۳۵ تا ۱۲۹۰ متر از سطح دریا در تغییر است. روند عمومی منحنی‌های تراز سطح آب زیرزمینی در این دشت، شمال‌غرب-جنوب‌شرقی بوده و رقوم آن‌ها از شمال‌شرقی به جنوب‌غربی کاهش دارد. حداکثر تراز آب زیرزمینی با رقم ۱۲۹۰ متر مربوط به اراضی کردان و حداقل تراز آب در اراضی نجم‌آباد به میزان ۱۱۳۵ متر است. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از شمال شرق به جنوب‌غرب بوده و شیب هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی در اراضی مخروط‌افکنه‌ای ۱۵ در هزار، در اراضی میاندشتی ۷ در هزار و در اراضی پایان دشتی ۱/۵ در هزار است. در اراضی مخروط‌افکنه‌ای رودخانهٔ کردان تحدب منحنی‌های تراز آب زیرزمینی به سمت اراضی پایین‌دست رودخانه بوده و خطوط جریان نسبت‌به محور رودخانهٔ کردان واگرا است که به سمت مرکز دشت تحدب منحنی‌ها به سمت بالادست رودخانه بوده و در پایاب دشت خطوط جریان نسبت‌به محور رودخانه همگرا است. بررسی وضعیت جریانات ورودی و خروجی در این آبخوان نشان می‌دهد که بیشترین حجم تخلیه مربوط به تخلیه از منابع آب زیرزمینی در این آبخوان است که حجمی بالغ بر ۳۰۰ میلیون مترمکعب است. از این حجم جریانات برگشتی شرب و کشاورزی حجمی بالغ بر ۱۲۵ میلیون مترمکعب تغذیه در آبخوان هشتگرد وجود دارد. براین‌اساس پارامترهای ورودی و خروجی به آبخوان حاکی از کسری حدود ۱۹/۵ میلیون مترمکعب در سال است. بیلان منابع آب زیرزمینی این آبخوان به‌صورت جدول ۱ ارائه شده است (بی‌نام، ۱۳۹۷؛ رسائی و همکاران، ۱۳۹۹؛ جمعدار و همکاران، ۱۴۰۰).

تغییر اقلیم

به‌منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دو پارامتر بارش و دما از مدل‌های HADGEM2Es، EC-ERATH و GFDL-CM3 استفاده شد. انتخاب این مدل‌ها، با توجه به مطالعات مختلف انجام‌شده توسط ارتورک و همکاران (۲۰۱۴)، کومار (۲۰۱۶)، بودربالا (۲۰۱۹)، احمدی‌فر و همکاران (۱۳۹۹) و عباس‌نوین‌پور و همکاران (۱۴۰۰) استفاده شده است. سناریوی اقلیمی نیز براساس حالت خوش‌بینانهٔ RCP2.6، حالت میانی RCP4.5 و بدبینانهٔ RCP8.5 انتخاب شد۸. پس از دریافت اطلاعات با استفاده از مدل LARS-WG، ارزیابی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های هواشناسی انجام گرفت. LARS-WG یک مولد آب‌وهوایی تصادفی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوّی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود (راکسکو و همکاران، ۱۹۹۱). به‌منظور شبیه‌سازی اقلیمی در یک ایستگاه براساس توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی، ارتباط بین آن‌ها ارزیابی می‌شود. این مجموعه از پارامترها برای تولید سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دلخواه، از طریق انتخاب تصادفی مقادیر از توزیع‌های مناسب، استفاده شد. از طریق دخالت پارامترهای توزیع‌ها برای یک ایستگاه به همراه تغییرات پیش‌بینی‌شدهٔ اقلیمی که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای نتیجه شده، سناریوی اقلیم روزانه برای این ایستگاه تولید و در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف ازجمله منابع آب و کشاورزی برای ارزیابی اثرات استفاده شد. مدل LARS-WG در اقلیم‌های مختلف امتحان شده و نتایج خوبی را در تولید آمارهای

www.SID.ir

Archive of SID

آب‌وهوای گوناگون شامل وقایع شدید آب‌وهوایی نشان داد (سمنو و همکاران، ۱۹۹۵؛ سمنو و همکاران، ۲۰۰۷). پس از شبیه‌سازی سری زمانی داده‌های تاریخی منطقه و ارزیابی دقت مدل، تولید سری زمانی برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف انتشار انجام گرفت. هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)[1] در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهای جدید RCP به‌عنوان نمایندهٔ چهار خط‌سیر کلیدی گازهای گلخانه‌ای به نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 استفاده کرده‌است. نام‌گذاری سناریوهای خانوادهٔ RCP براساس میزان سطح واداشت‌های تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ به‌ترتیب شامل مقادیر ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ (W/m^2) انجام شد. هریک از این سناریوها دارای خصوصیات خاصی بوده؛ به‌طوری‌که غلظت دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰ در سناریوی RCP4.5 مقدار ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر تخمین زده شد. در سناریوی RCP4.5 رشد جمعیت نسبت‌به سناریوی RCP2.6 کمتر بوده؛ اما در دیگر پارامترهای مؤثر اقلیمی (مثل نرخ استفاده از انرژی‌های نو، رشد تکنولوژی و ...) ضعیف‌تر در نظر گرفته شد. سناریوی RCP 8.5 در بدترین شرایط اقلیمی اخذ می‌شود. این سناریو بیان‌کنندهٔ عدم اتخاذ سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییرات اقلیمی و آب‌وهوایی کرهٔ زمین است. جمعیت در این سناریو در سال ۲۱۰۰ حدود ۱۲ میلیارد نفر تخمین زده می‌شود و غلظت دی‌اکسیدکربن به ۱۹۶۰ میلی‌گرم در لیتر خواهد رسید.

شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از مدل MODFLOW 2005 در نرم‌افزار GMS v10 استفاده شد. هدف از مدل‌سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به‌تعادل‌رساندن بیلان، پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیک، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله‌روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائهٔ واسنجی است (کاردان‌مقدّم و همکاران، ۲۰۱۹). اولین گام جهت شبیه‌سازی تعریف مدل مفهومی آبخوان براساس بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه است؛ بنابراین با توجه به حجم جریانات ورودی و خروجی به آبخوان، بیلان منابع آب برای منطقه محاسبه و پارامترهای مدل با حل معادلهٔ لاپلاس تعریف شد (کاردان‌مقدّم و همکاران، ۲۰۲۱). شرایط مرزی آبخوان شامل جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان، ساختار علم چینه‌شناسی (استراتیگرافی) آبخوان شامل توپوگرافی، سطح آب و سنگ‌بستر، میزان تغذیهٔ ناشی از نفوذ از بارندگی و رواناب سطحی، تخلیهٔ منابع آب آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و... پارامترهای تشکیل‌دهندهٔ مدل است. مهر ۱۳۹۳ به‌عنوان اولین گام شبیه‌سازی تعریف و براساس آن برای یک دورهٔ ۵ ساله که شامل ۳ سال واسنجی و ۲ سال صحت‌سنجی است، شبیه‌سازی انجام گرفت. به‌منظور شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی، شبکه‌بندی آبخوان به‌صورت شبکهٔ ۲۵۰×۲۵۰ مترمربع تعریف شد. در شکل ۳، پلان کلی ساختار و مدل آبخوان هشتگرد نمایش داده شده است.

پس از تعریف مدل مفهومی آبخوان، مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی و مورد واسنجی قرار گرفت. با توجه به دورهٔ آماری در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، یک دورهٔ ۳ ساله (مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۶) در حالت غیرماندگار مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی در مدل به روش دستی و PEST انجام گرفت. پس از ارزیابی دقت مناسب مدل در دورهٔ واسنجی، ۲ سال به‌عنوان دورهٔ صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی مدل صورت گرفت. هدف از صحت‌سنجی، ارزیابی دقت نتایج مدل در واسنجی است. معیار ارزیابی دقت مدل در دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی شاخص‌های آماری، خطای بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در هر دوره است. حداقل میزان خطا در این شبیه‌سازی مقدار میانگین مجذور خطای کمتر از ۱ متر در حالت ماندگار و ۲ متر در حالت غیرماندگار در نظر گرفته شد (رسائی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کاردان‌مقدّم و همکاران، ۲۰۲۱). ارزیابی نتایج مدل در دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی در حالت ماندگار و غیرماندگار جریان براساس شاخص‌های آماری خطای بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی محاسبه و ارزیابی می‌شود.

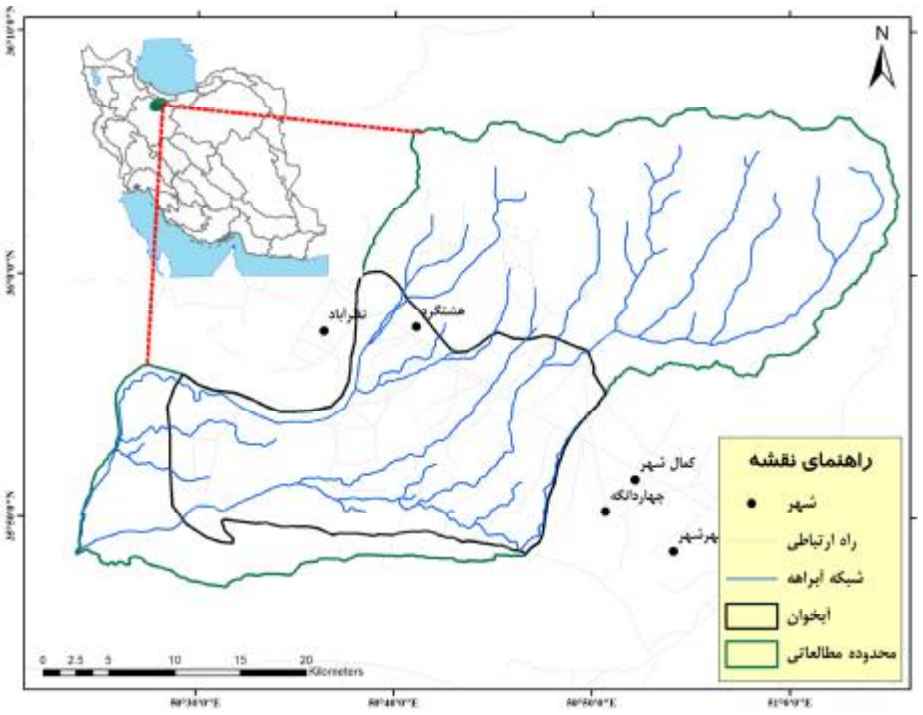
1- Intergovernmental Panel on Climate Change

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد- MCM (بی‌نام، ۱۳۹۷)

جریان ورودی				جریان خروجی				
جریان زیرزمینی ورودی	نفوذ از بارندگی	نفوذ از جریانات سطحی	نفوذ آب برگشتی کشاورزی	نفوذ آب برگشتی شرب و صنعت	تخلیه از منابع آب زیرزمینی	زهکشی	تبخیر از آبخوان	خروجی آب زیرزمینی	کسری مخزن آبخوان
۹۶/۶۱	۲۷/۳۸	۵۸/۸۷	۱۰۶/۶۴	۱۸/۳۴	۳۰۶/۸۴	۰	۰	۲۰/۴۷	-۱۹/۴۷



شکل ۲- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

راهکارهای تعادل‌بخشی

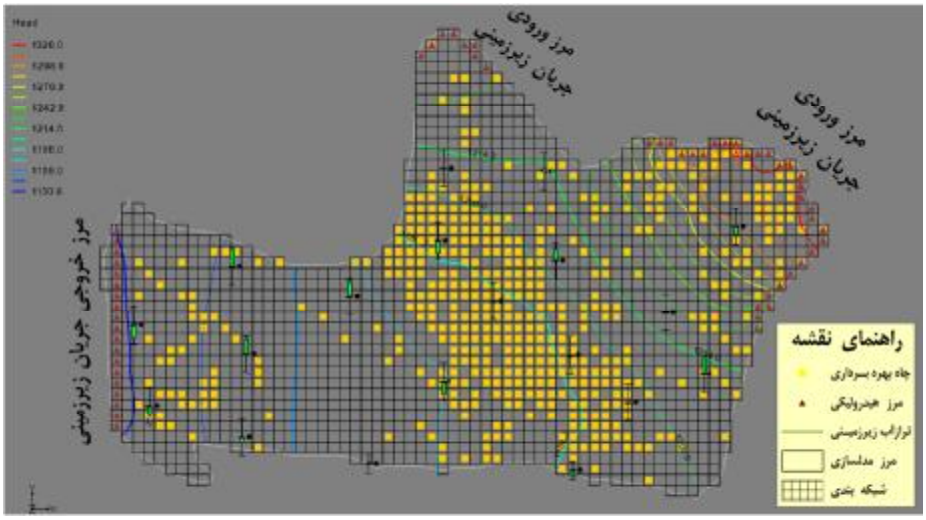
با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی به‌منظور تسریع در کنترل این وضعیت برنامه تعادل‌بخشی زیرنظر وزارت نیرو در ۱۵ پروژهٔ کلان ملی با هدف تأمین و بازگشت حجم استاتیک سفره‌های آب زیرزمینی آغاز شده است (بی‌نام، ۱۳۹۳الف؛ بی‌نام، ۱۳۹۷). هدف چند پروژه از آن‌ها، کاهش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی از طریق مسدودکردن چاه‌های غیرمجاز برای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، کنترل، نظارت و مسلوب‌المنفعه‌کردن چاه‌های فاقد پروانهٔ مضر به مصالح عمومی و جایگزینی پساب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه است. این سه پروژه در صورت اجرایی‌شدن سبب کاهش حجم برداشت فعلی از منابع آب زیرزمینی می‌شوند و می‌توانند حجم قابل‌توجهی آب را به سفرهٔ آب زیرزمینی برگردانند. براساس برآوردهای انجام‌شده، حجمی بالغ بر ۴۴ درصد از هدف احیا و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها با استفاده از این سه پروژه در سطح کلان تأمین خواهد شد و مابقی براساس جلوگیری از اضافهٔ برداشت چاه‌های مجاز، طرح‌های افزایش نفوذ آب انجام خواهد شد (بی‌نام، ۱۳۹۳ب؛ بی‌نام، ۱۳۹۷).

در این مطالعه به‌منظور تدوین راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم در راستای طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، راهکارهای کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، تغذیهٔ مصنوعی آبخوان و انتقال آب از سدهای مجاور درجهت تأمین آب شرب و جایگزینی آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. تلفیق این راهکارها

www.SID.ir

Archive of SID

نیز مورد بررسی قرار گرفت. براین‌اساس و با توجه به بیلان منابع آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد این راهکارها کاهش برداشت حجمی برابر با ۱۵/۳، ۳۰/۶ و ۴۵/۹ میلیون مترمکعب از چاه‌های کشاورزی منطقه به‌صورت مساوی در نظر گرفته می‌شود (بی‌نام، ۱۳۹۷). راهکار تغذیهٔ مصنوعی نیز در بخش شمالی آبخوان و در مسیر رودخانهٔ کردان با توجه به مطالعات در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به رشد و توسعهٔ شهر جدید هشتگرد، راهکار جایگزینی منابع آب شرب به‌جای منابع آب زیرزمینی نیز به‌عنوان راهکار در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمایی کلی از مدل توزیعی آبخوان هشتگرد به همراه چاه‌های بهره‌برداری، جبههٔ زیرزمینی و مرز مدل‌سازی

نتایج و بحث

شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دما در اثر تغییر اقلیم

برای ارزیابی کارایی نتایج شبیه‌سازی تغییر اقلیم در سه سناریوی انتشار تحت سه مدل تغییر اقلیم دو پارامتر بارندگی و میانگین دما در دورهٔ پایه و دورهٔ آتی سنجش شد. در جدول ۲ ارزیابی نتایج آزمون‌های آماری برای این سنجش ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در دورهٔ پایه، حاکی از دقت مناسب نتایج شبیه‌سازی است. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی، سه پارامتر بارش، حداکثر و حداقل دما مقدار p-Value مقدار یک یا نزدیک به یک است که حاکی از دقت مناسب از نظر آماری است. پس از اثبات کارایی مدل و ارزیابی آن، برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) شبیه‌سازی شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و دقت مناسب شبیه‌سازی اقلیم برای سه پارامتر بارش، حداکثر دما و حداقل دما در دورهٔ پایه، شبیه‌سازی با استفاده از مدل LARS_WG برای سه مدل اقلیمی تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 انجام گرفت. مبنای این شبیه‌سازی دقت مناسب مدل‌ها در دورهٔ پایه است. براین‌اساس میانگین سه مدل اقلیمی در سه سناریوی انتشار در شکل ۴، میانگین بارش و در شکل ۵، میانگین دما ارائه شده است. ارزیابی دقت نتایج بدست‌آمده به‌صورت ارزیابی میزان اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی‌شده و متوسط دورهٔ پایه ارائه شده است. روند تغییرات بارش و میانگین دما در سطح ایستگاه مورد شبیه‌سازی حاکی از دقت مناسب، شبیه‌سازی برای دورهٔ آتی است.

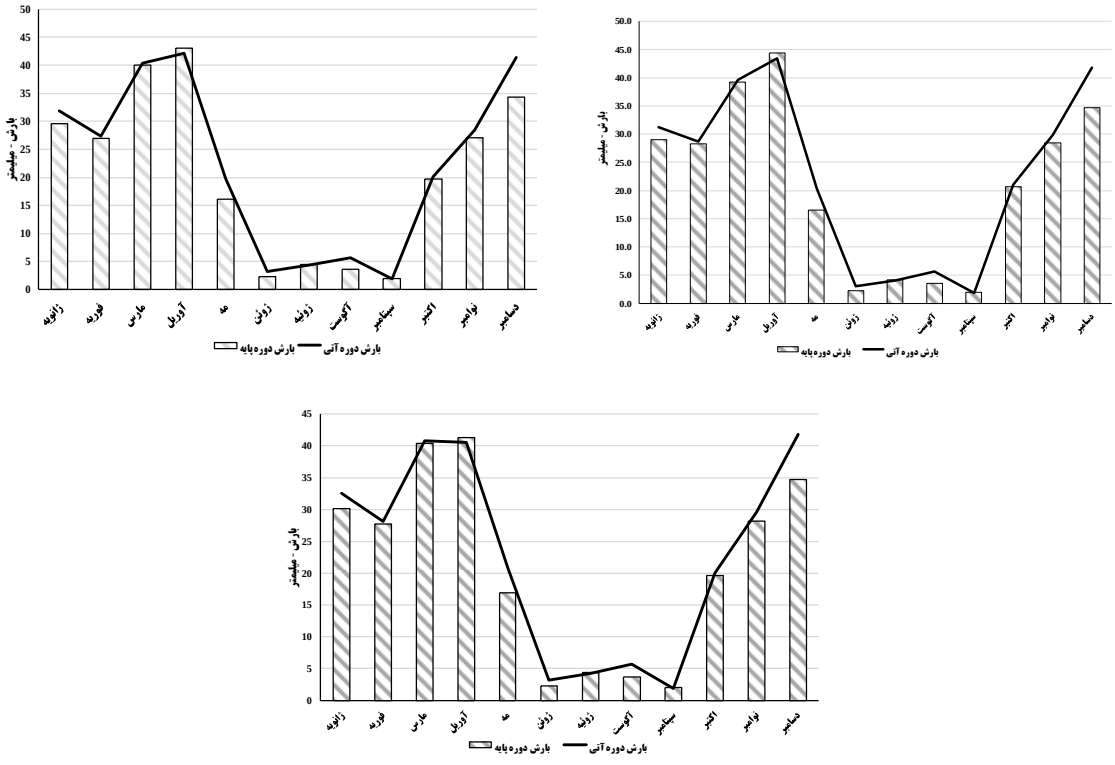
بررسی کلی نتایج شبیه‌سازی‌شده سناریوهای مختلف اقلیمی در سه مدل حاکی از روند افزایشی مقدار دما و کاهش میزان بارش در مقایسه با دورهٔ پایه بود. نتایج به‌دست‌آمده در دورهٔ شبیه‌سازی دورهٔ آتی نشان داد که در سطح آماری ۹۵ درصد اختلاف بین میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده با میانگین بارش در دورهٔ پایه معنی‌دار بوده و این موضوع در شبیه‌سازی پارامتر دما نیز صادق است. براین‌اساس مناسب‌بودن نتایج شبیه‌سازی از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد مورد تأیید است. به‌طورکلی نتایج حاکی از دقت مناسب و ارزیابی خوب مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای بارش، حداقل دما و حداکثر دما در منطقهٔ مورد مطالعه است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- آزمون آماری مربوط به صحت‌سنجی کارایی مدل LARS-WG

ماه	میانگین بارش ماهانه			دمای حداکثر			دمای حداقل		
	t	ks	p-value	t	ks	p-value	t	ks	p-value
ژانویه	۰/۴۷۸	۰/۱۱۰	۱	۰/۵۱۲	۰/۱۴۹	۱	-۰/۰۴۳	۰/۱۵۷	۱
فوریه	۰/۹۹۱	۰/۰۱۸	۱	۰/۳۴۹	۰/۱۳۷	۱	-۰/۵۹۱	۰/۱۹۵	۱
مارس	-۰/۰۶۷	۰/۰۴۴	۰/۹۱۰	-۰/۴۰۵	۰/۰۰۹	۱	۰/۴۰۷	۰/۰۴۹	۱
آوریل	۰/۰۴۷	۰/۱۲۴	۰/۹۵۰	-۰/۰۹۰	۰/۰۴۲	۱	-۰/۸۳۶	۰/۱۴۱	۱
مه	۰/۳۳۱	۰/۱۸۷	۰/۹۶۰	-۰/۱۲۹	۰/۰۳۱	۱	۰/۰۸۰	۰/۱۰۵	۱
ژوئن	۰/۰۳۳	۰/۱۵۹	۱	-۰/۸۷۴	۰/۱۷۰	۱	-۰/۸۸۶	۰/۱۲۰	۰/۹۶۰
ژوئیه	۰/۷۸۶	۰/۰۲۳	۰/۹۹۰	-۰/۶۴۱	۰/۱۴۹	۱	-۰/۱۶۰	۰/۱۵۹	۱
اوت	-۰/۰۴۰	۰/۱۷۶	۱	-۰/۷۰۸	۰/۰۰۷	۱	۰/۴۹۳	۰/۱۸۹	۰/۹۲۰
سپتامبر	-۰/۵۱۸	۰/۰۳۹	۱	-۰/۳۵۴	۰/۰۹۷	۱	-۰/۵۶۷	۰/۱۲۳	۰/۹۶۰
اکتبر	۰/۵۲۷	۰/۱۵۴	۰/۹۷۰	۰/۰۴۷	۰/۰۹۷	۱	-۰/۳۰۴	۰/۰۷۶	۱
نوامبر	۰/۷۲۸	۰/۱۲۸	۱	۰/۳۸۵	۰/۰۷۴	۰/۹۷۰	-۰/۵۳۱	۰/۰۲۴	۱
دسامبر	۰/۶۹۰	۰/۰۵۳	۱	-۰/۲۷۰	۰/۱۹۸	۰/۹۲۰	-۰/۷۸۵	۰/۰۷۷	۰/۹۹۰

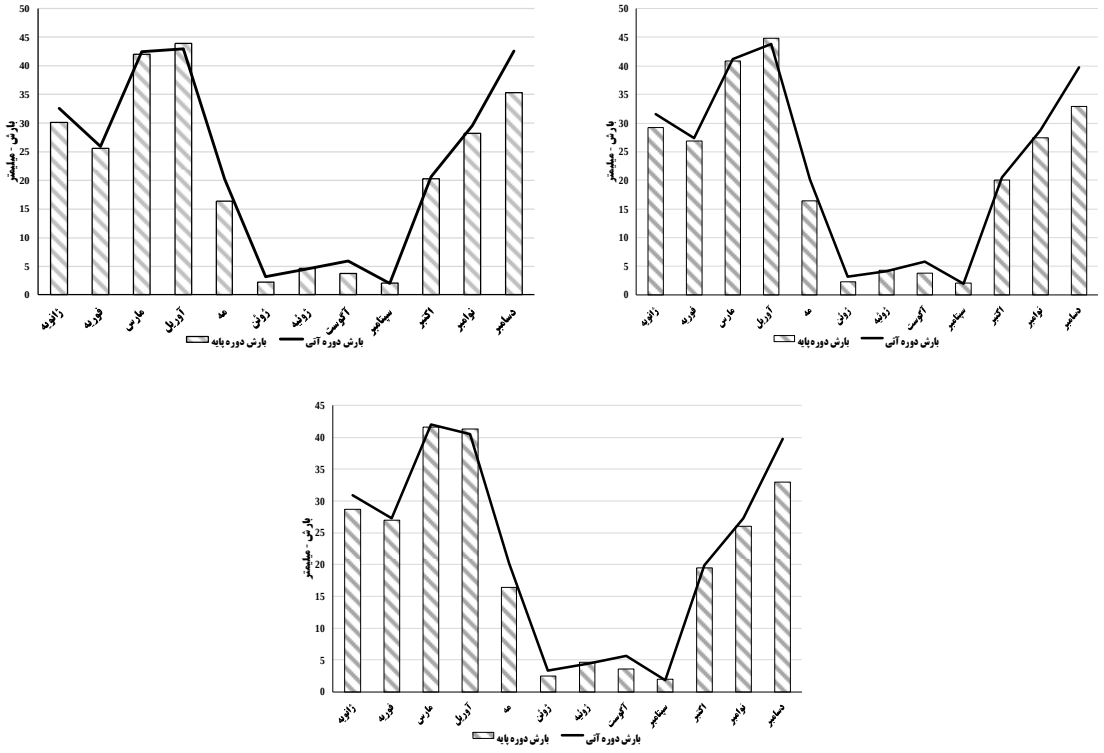


RCP 2.6

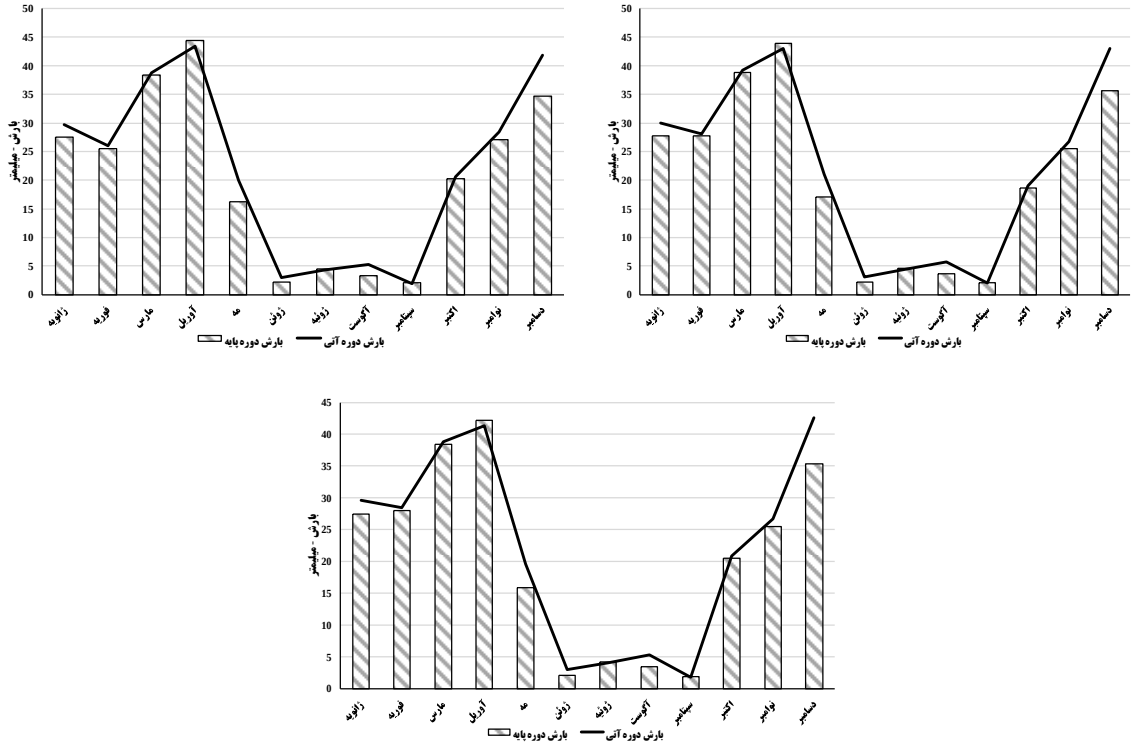
شکل ۴- مقایسهٔ میانگین بارش ماهانه (میلی‌متر) تحت اِعمال سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی در منطقه

www.SID.ir

Archive of SID



RCP 4.5

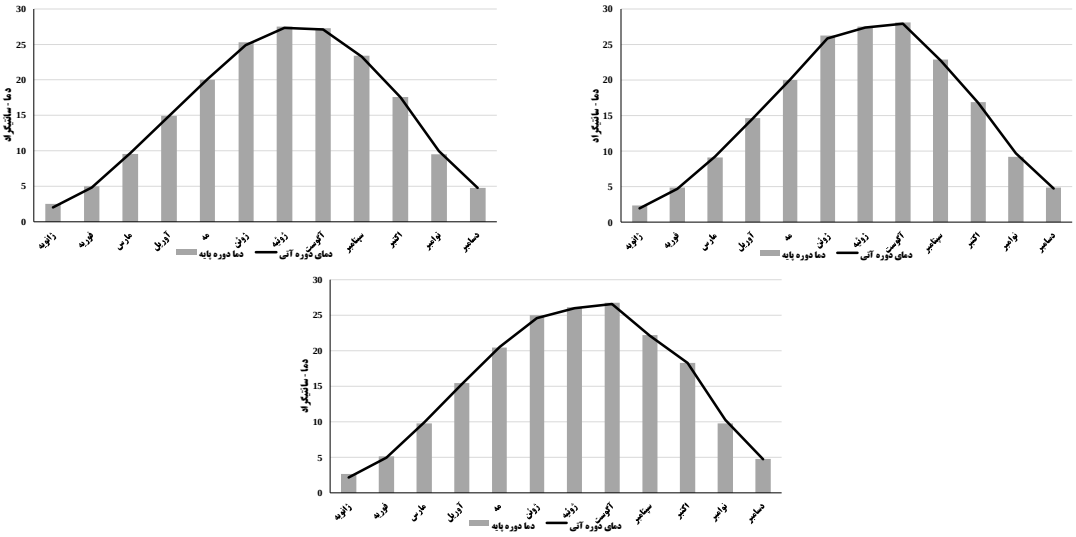


RCP 8.5

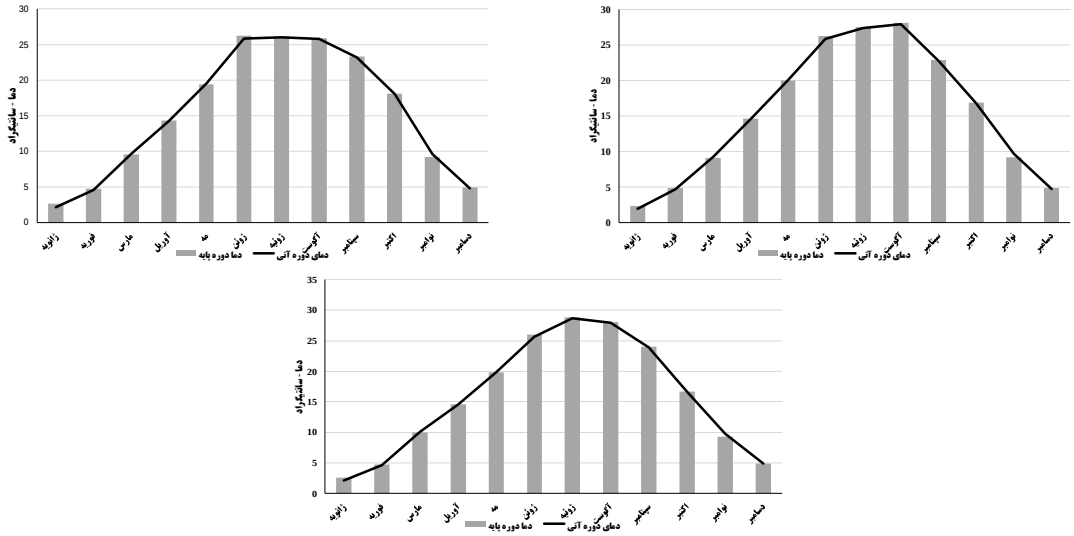
ادامه شکل ۴- مقایسهٔ میانگین بارش ماهانه (میلی‌متر) تحت اِعمال سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی در منطقه

www.SID.ir

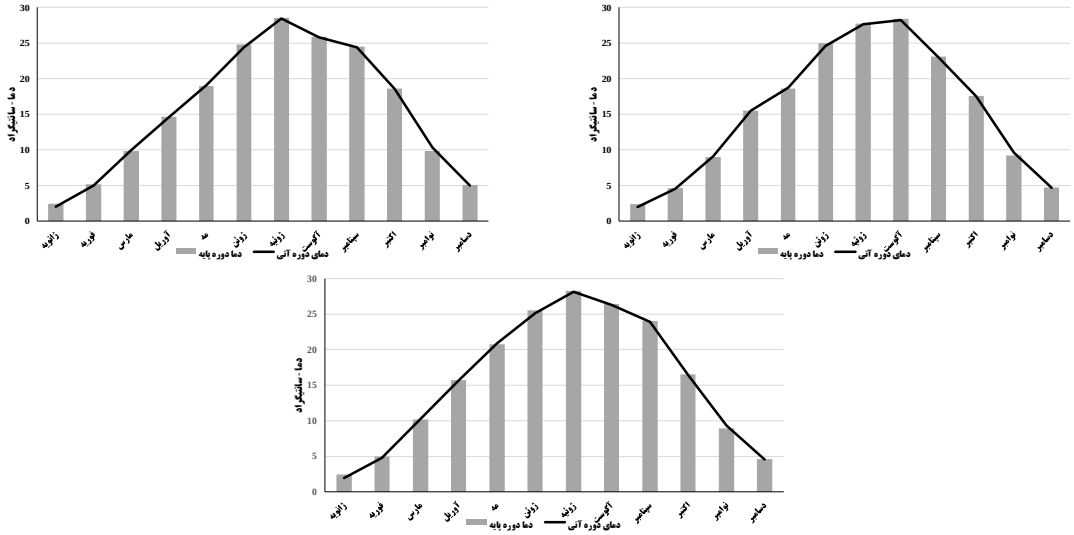
Archive of SID



RCP 2.6



RCP 4.5



RCP 8.5

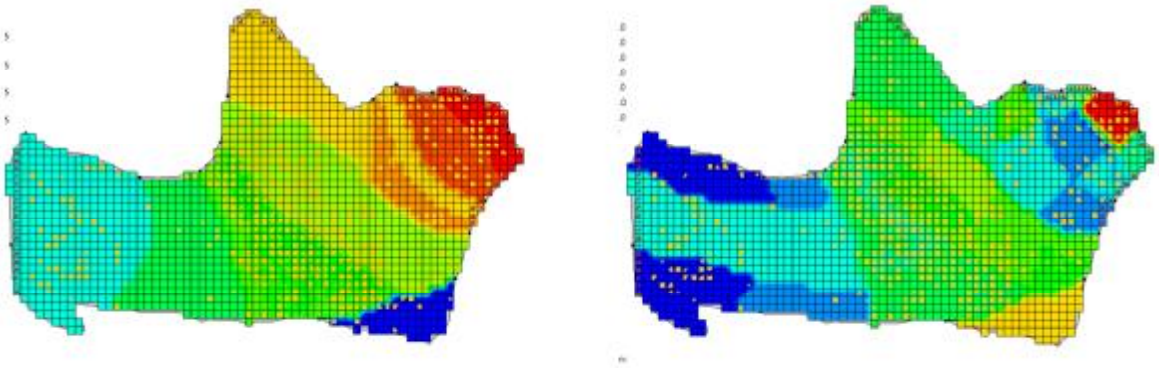
شکل ۵- مقایسهٔ میانگین دمای ماهانه (درجهٔ سانتی‌گراد) تحت اِعمال سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی در منطقه

www.SID.ir

Archive of SID

ارزیابی مدل جریان آب زیرزمینی

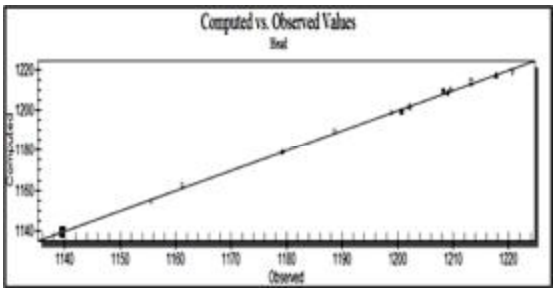
یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل درجهت به‌دست‌آوردن نتایج بهینه است. با توجه به اجرای مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه به‌عنوان عوامل حساس مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. واسنجی مدل کمّی آب زیرزمینی به دو صورت سعی و خطا و روش اتوماتیک PEST انجام گرفت. نتایج نشان داد که با حرکت به سمت خروجی آبخوان، از میزان ضریب ذخیره کاسته می‌شود که این نتایج با استفاده از جنس سازندهای زمین‌شناسی نیز قابل‌اثبات است. عمق آبرفت به‌صورت اختلاف سطح زمین و لایهٔ سنگ بستر در نظر گرفته شده که در ساختار مدل MODFLOW اطلاعات وارد شد. مقدار ضخامت آبرفت در بخش‌های مختلف متفاوت بوده و وابسته به ساختار منطقه است. مقدار قابلیت انتقال براساس نتایج آزمایشات پمپاژ در مدل وارد شد که در حین شبیه‌سازی در مدل ماندگار براساس پارامتر هدایت هیدرولیکی واسنجی شد. عمق سنگ بستر (T=K.B) براساس آزمایشات ژئوفیزیک منطقه تعیین و در مدل در بخش تعریف ساختار سه‌بعدی مدل وارد شد. بررسی مقادیر واسنجی‌شدهٔ ضرایب هیدرودینامیک آبخوان هشتگرد از ارتباط بسیار نزدیک بین این پارامترها با ساختار زمین‌شناسی منطقه خبر می‌دهد. به‌گونه‌ای که در بخش‌هایی از آبخوان که دارای ضریب آبدهی ویژهٔ بالایی است، ساختارهای سه‌بعدی آبخوان نیز وجود لایه‌های ماسه‌ای با قابلیت آبدهی ویژهٔ مناسب را نشان می‌دهد. شکل ۶، نتایج نهایی میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را نشان می‌دهد. در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، از داده‌های حاصل از گزارش بیلان آب زیرزمینی محدودهٔ مطالعاتی و برخی از داده‌های میدانی شامل لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایشات پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال، نوع سازندهای زمین‌شناسی و مطالعات پیشین نیز درجهت تطبیق نتایج استفاده شد.



الف- هدایت هیدرولیکی ب- آبدهی ویژه

شکل ۶- پارامترهای توزیعی واسنجی در سطح آبخوان هشتگرد

ارزیابی دقت نتایج شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در حالت ماندگار که در شکل ۷ نشان داده شده است، به‌عنوان خروجی مدل حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی است. نتایج نشان داد که مقدار تراز مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نزدیک به‌هم و اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مجموع چاه‌های مشاهده‌ای کمتر از یک متر است و در فاصلهٔ اندک با نیم‌سازی ارائه‌شده در شکل است.



شکل ۷- نمودار صحت‌سنجی مدل در حالت ماندگار

www.SID.ir

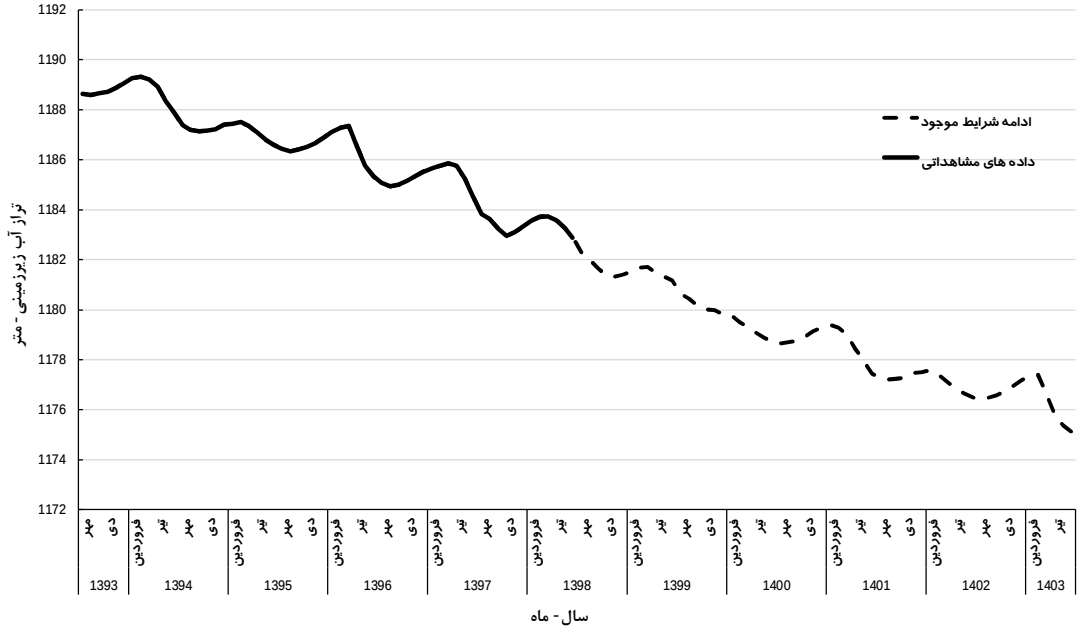
Archive of SID

ارزیابی آمار دقت شبیه‌سازی انجام‌شده در سطح آبخوان برای چاه‌های مشاهده‌ای و کل آبخوان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به قرارگیری ۱۹ حلقه چاه، مشاهده‌ای در منطقهٔ جدول آنالیز خطای مدل به‌صورت جدول ۳ در حالت مدل ماندگار جریان و غیرماندگار جریان محاسبه شد. ارزیابی آماری در حالت ماندگار بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مهر۱۳۹۳ و در حالت واسنجی مدل بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره ۳ ساله (۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۷-۱۳۹۶) محاسبه شده است.

پس از شبیه‌سازی و ارزیابی مدل کمّی آبخوان، پیش‌بینی وضعیت آتی تراز سطح آب در آبخوان برای یک دورهٔ ۵ ساله تا سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با درنظرگرفتن ادامهٔ روند موجود از نظر بهره‌برداری انجام گرفت. براین‌اساس نتایج ادامهٔ شرایط موجود نشان می‌دهد که این آبخوان در انتهای سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به مهر ۱۳۹۳، بیش از ۱۳ متر افت خواهد داشت که با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آبخوان هشتگرد توسط مرتضوی‌زاده و گودرزی (۱۳۹۷) و رسائی و همکاران (۱۳۹۹) نیز همخوانی دارد. در شکل ۸، هیدروگراف واحد آبخوان در شرایط ادامه وضعیت موجود نشان داده شده است.

جدول ۳- آنالیز خطای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی- متر

پارامتر خطا	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار
میانگین خطا	-۰/۹۲	۱/۰۴
میانگین مطلق خطا	۱/۳۲۴	۱/۵۸
میانگین مجذور خطا	۱/۴۲	۱/۷۶



شکل ۸- هیدروگراف آبخوان هشتگرد در شرایط ادامهٔ وضعیت موجود

پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم

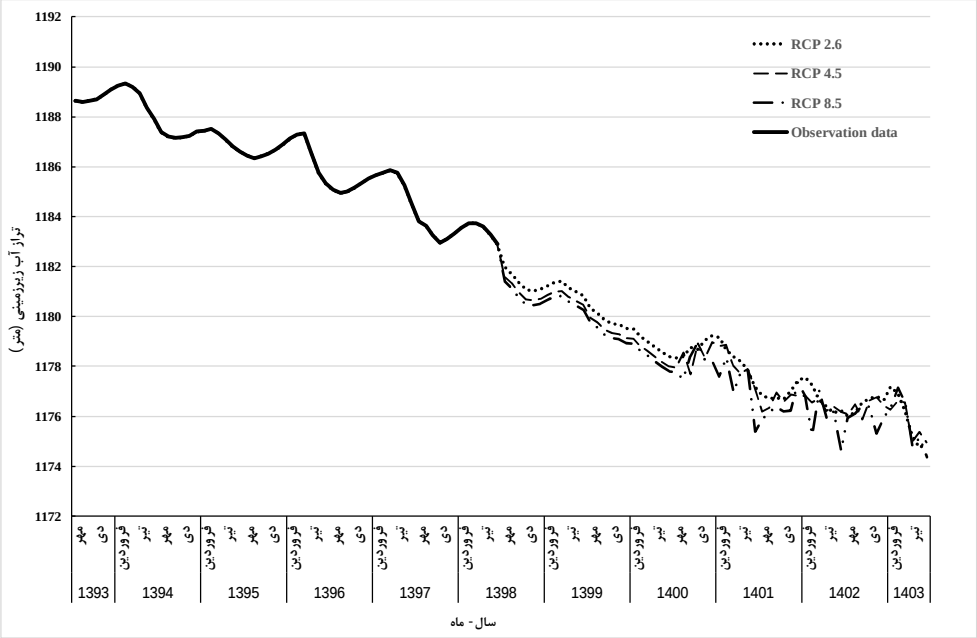
به‌منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد براساس گزارشات تأییدشدهٔ گزارش پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)[1] (CMIP5) از سه مدل HadGem2Es، EC-ERATH و GFDL-CM3 تحت سه سناریوی انتشار استفاده شد. براین‌اساس با توجه به تغییرات میزان بارش و دما در محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد میزان تغییر در تغذیه و تخلیهٔ آبخوان با توجه به بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه محاسبه و در مدل اِعمال شد (IPCC-TGCIA, 2007). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، شبیه‌سازی وضعیت آبخوان هشتگرد با استفاده از مدل MODFLOW انجام گرفت. در این شرایط هیدروگراف واحد آبخوان برای هر مدل تغییر اقلیم تحت

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change

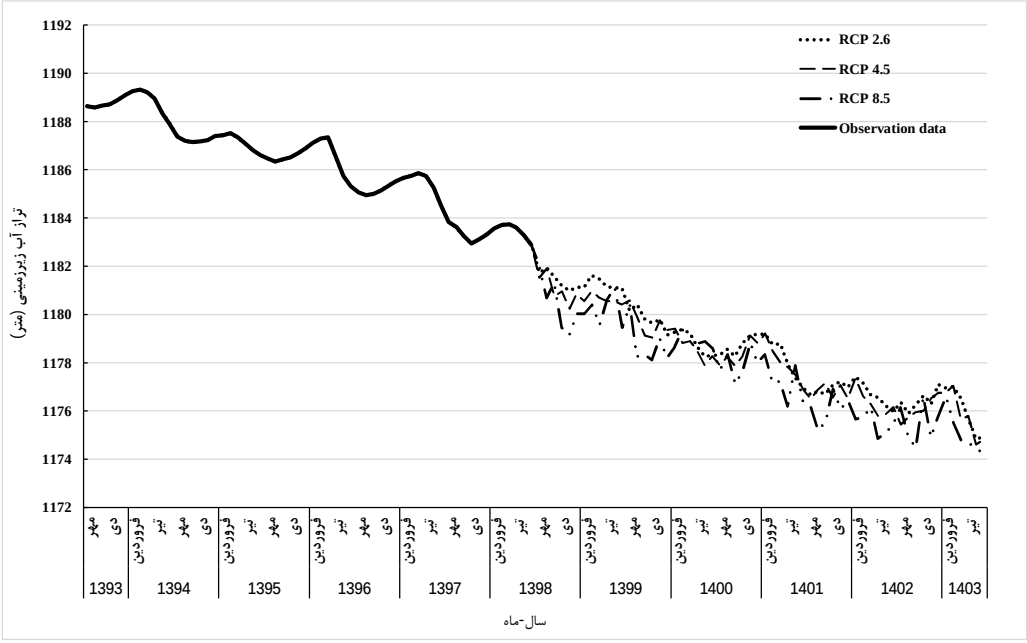
www.SID.ir

Archive of SID

سه سناریوی انتشار RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 برای دورهٔ آتی ۵ ساله برآورد شد که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل HadGem2 در سه سناریوی انتشار، حاکی از این موضوع است که میزان افت آبخوان ادامه داشته و تغییرات افت در طی دورهٔ ۵ ساله پیش‌بینی بین ۷/۹ تا ۸/۵ متر افت به‌دست آمد. میزان افت تراز آبخوان در دورهٔ پیش‌بینی در مدل Ec-Earth بین ۸ تا ۸/۷ متر و در مدل GFDL-CM3 بین ۷/۸ تا ۹/۷ متر به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از میزان افت در آبخوان حاکی از این موضوع است که روند افت آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم افزایشی بوده؛ به‌گونه‌ای‌که کمترین افت ثبت‌شده در سناریوی RCP 2.6 در مدل HadGem2 به میزان ۰/۲ متر در سال و بیشترین میزان افت آبخوان در سناریوی RCP 8.5 در مدل GFDL-CM3 به میزان ۲ متر در سال شبیه‌سازی شد.



الف- مدل HADGem2Es

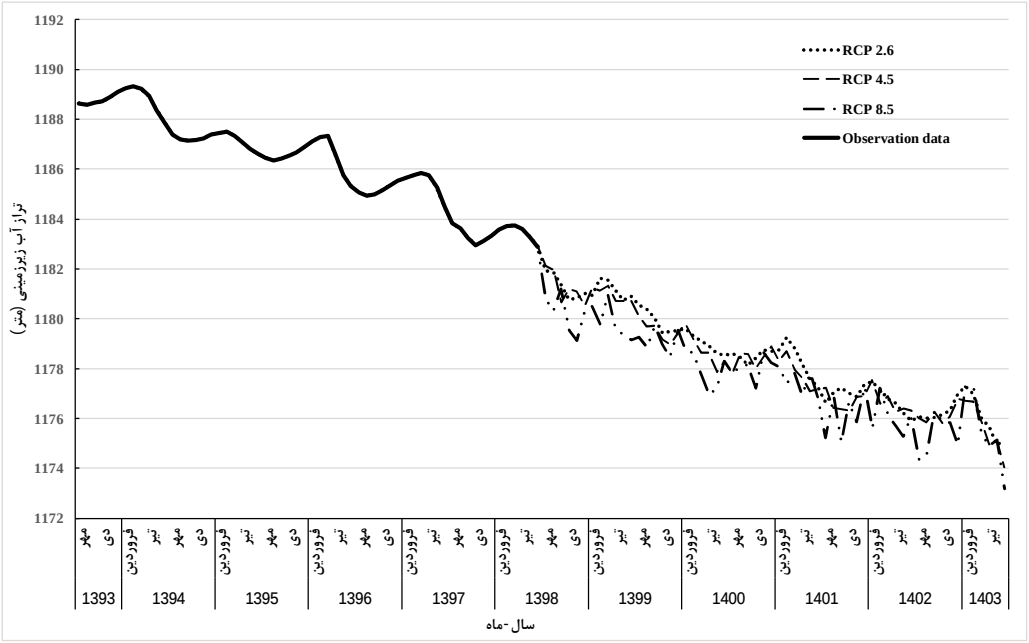


ب- EC-ERATH

شکل ۹- تحلیل هیدروگراف واحد آبخوان هشتگرد براساس سناریوهای مختلف انتشار

www.SID.ir

Archive of SID



- GFDL-CM3ج

ادامه شکل ۹- تحلیل هیدروگراف واحد آبخوان هشتگرد براساس سناریوهای مختلف انتشار

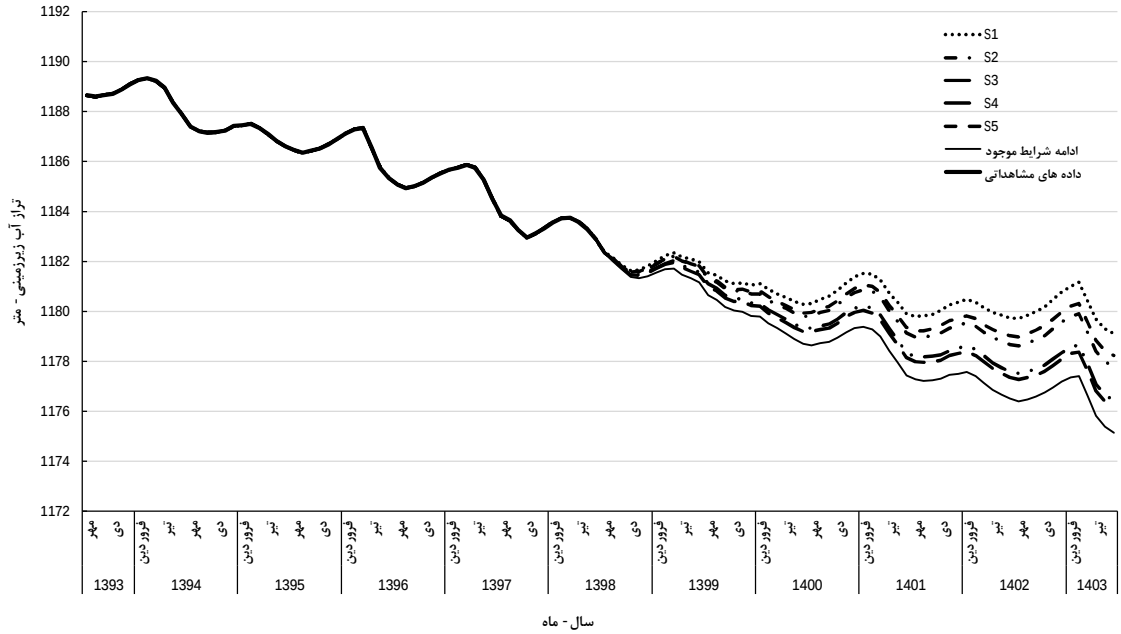
بررسی سیاست‌های تعادل‌بخشی

پنج سناریوی تعادل‌بخشی در آبخوان هشتگرد با توجه به وضعیت بیلان منابع آب منطقه تعریف و در مدل مفهومی آبخوان تحت اِعمال تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد. سه سناریوی کاهش برداشت آب از منابع آب زیرزمینی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) براساس کل حجم ۳۰۶ میلیون مترمکعب بهره‌برداری از آبخوان به‌صورت کاهش ۱۵/۳، ۳۰/۶ و ۴۵/۹ میلیون‌مترمکعب از چاه‌های کشاورزی منطقه به‌صورت مساوی تعریف و مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در این کاهش برداشت نیز با توجه به ضریب آب برگشتی اراضی کشاورزی که میزان ۲۰ درصد است میزان تغذیه از جریانات برگشتی نیز کاهش یافت و در مدل تعریف شد. به‌منظور ارزیابی اثر تغذیهٔ مصنوعی در دشت هشتگرد با توجه به گزارش مکان‌یابی تغذیهٔ مصنوعی در مسیر رودخانهٔ کردان، مشخص شد که حجم آب برداشت‌شده از رودخانه درجهت تغذیهٔ مصنوعی، ۳۸ میلیون مترمکعب است (بی‌نام، ۱۳۹۷). با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی آبرفت منطقه و ضریب نفوذپذیری، مشخص شد حداکثر میزان تغذیهٔ آبخوان، ۷ میلیون مترمکعب خواهد بود که این میزان در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به‌صورت جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به مدل تعریف شد. همچنین در سناریوی تأمین آب شرب از طریق سد طالقان و جایگزینی آب چاه‌های منطقه نیز مشخص شد که حجم ۲۰ میلیون مترمکعب آب به‌صورت انتقالی برای تأمین آب شرب شهر هشتگرد تخصیص یابد و جایگزین ۲۰ میلیون مترمکعب آب برداشت‌شده از چاه‌های منطقه می‌شود. براین‌اساس در این سناریو ضمن انتقال آب و درنظرداشتن ضریب آب برگشتی مصارف شرب به میزان ۶۰ درصد، مشخص شد حجمی معادل ۳۲ میلیون مترمکعب آب کمتر از آبخوان برداشت می‌شود. براین‌اساس، شبیه‌سازی تراز سطح آب آبخوان در این ۵ سناریو انجام گرفت و تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان تعیین شد (شکل ۹). همان‌طور که در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده می‌شود، تغییرات هیدروگراف واحد آبخوان براساس میانگین تغییرات تراز آب در سه مدل اقلیمی برای سه سناریوی انتشار ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۰- هیدروگراف آبخوان در اِعمال سیاست‌های تعادل‌بخشی تحت سناریوی انتشار RCP2.6 (S_1 تا S_5 به‌ترتیب سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از آبخوان هشتگرد با هدف بهبود تراز آب زیرزمینی و احیا و تعادل بخشی آن است).



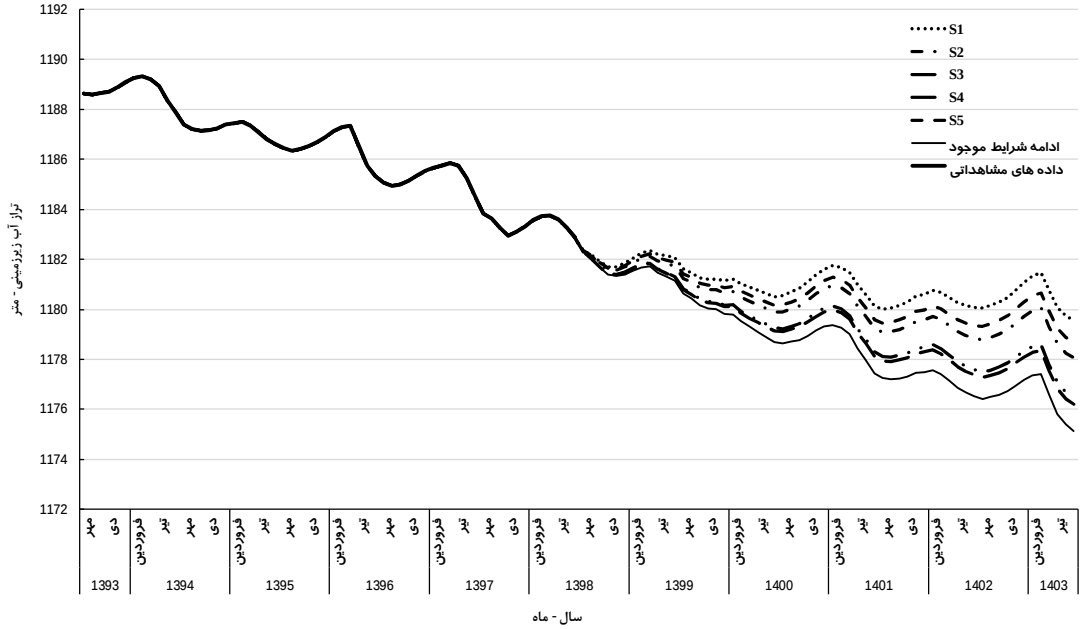
شکل ۱۱- هیدروگراف آبخوان در اِعمال سیاست‌های تعادل‌بخشی تحت سناریوی انتشار RCP4.5 (S_1 تا S_5 به‌ترتیب سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از آبخوان هشتگرد با هدف بهبود تراز آب زیرزمینی و احیا و تعادل‌بخشی آن است).

نتایج به‌دست‌آمده در تدوین راهکارهای مختلف تعادل‌بخشی در آبخوان هشتگرد حاکی از ادامهٔ روند افت آبخوان در طی دورهٔ پیش‌بینی است. بررسی سناریوهای شبیه‌سازی نشان داد که راهکار S_1 که کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب از آبخوان است، بیشترین کارایی را در هر سه سناریوی انتشار اقلیمی در آبخوان نشان داده‌است؛ به‌طوری‌که میزان افت در سناریوی RCP 8.5 در طی ۵ سال میزان ۴/۴ متر و در سناریوهای RCP4.5 و RCP2.6 به‌ترتیب ۴ و ۳/۲ متر افت آبخوان کاهش داشته‌است. کم‌ترین میزان تأثیرپذیری در بهبود وضعیت

www.SID.ir

Archive of SID

کمّی آبخوان مربوط به سناریوی S4 است که با توجه به کم‌بودن حجم تغذیهٔ مصنوعی، حدود یک متر بهبود وضعیت کمّی آبخوان را به‌دست آورده‌است. این سناریو در سناریوهای مختلف انتشار تفاوت کمّی را در دورهٔ آتی (بهمن ۱۴۰۰ تا شهریور ۱۴۰۳) نشان می‌دهد. بررسی کمّی اِعمال راهکارهای تعادل‌بخشی حاکی از این موضوع است که بیشترین میزان عدم‌قطعیت در سناریوی RCP 8.5 وجود دارد و این میزان بالای عدم‌قطعیت ناشی از تفاوت معنی‌دار بین پارامترهای اقلیمی در این سناریو است. نتایج اِعمال راهکارهای تعادل‌بخشی در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین میزان عدم‌قطعیت نتایج هیدروگراف آبخوان مربوط به راهکار S_1 بوده که در این راهکار میزان عدم‌قطعیت در سه سناریوی انتشار ۱/۱۶ متر به‌دست آمد. در این شرایط کم‌ترین میزان عدم‌قطعیت مربوط به سناریوی S_3 با میزان ۰/۱۵ متر به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از میزان عدم‌قطعیت راهکارهای تعادل‌بخشی حاکی از این موضوع است که با افزایش میزان کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، میزان عدم‌قطعیت افت آبخوان افزایش داشته‌است.



شکل ۱۲- هیدروگراف آبخوان در اِعمال سیاست‌های تعادل‌بخشی تحت سناریوی انتشار RCP8.5 (S_1 تا S_5 به‌ترتیب سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از آبخوان هشتگرد با هدف بهبود تراز آب زیرزمینی و احیا و تعادل‌بخشی آن است).

نتیجه‌گیری

پیچیدگی سامانه‌های منابع آب در کنار بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی از منابع آب زیرزمینی در کنار وابستگی شدید قشر بهره‌بردار از نظر امرار معاش موجب شده تا تدوین یک رویکرد سیستماتیک در مدیریت عرضه و تقاضای آب به‌منظور توسعه روشن باشد. با توجه به افت سطح آبخوان‌های آب زیرزمینی، مدیریت برداشت از این منابع، کنترل سطح برداشت بسیار مهم بوده و بسیاری از سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان برای تأمین این هدف مطرح شده‌اند. در این پژوهش سازگاری با تغییر اقلیم برای بهبود مدیریت و بهره‌برداری پایدار از منابع آب در آبخوان هشتگرد با روند بحرانی از نظر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آبخوان حاکی از افت آبخوان به میزان ۱۳/۵ متر تا پایان سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ است که با توجه به وضعیت بحرانی آبخوان بسیار حائز اهمیت است. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی حاکی از روند کاهشی بارش و افزایشی دما در این منطقه است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان انجام گرفت و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سناریوی اقلیمی RCP2.6 در مدل Had Gem2 به‌عنوان کم‌اثرترین سناریو در روند افت آبخوان و سناریوی RCP8.5 در مدل GFDL-CM3 دارای

www.SID.ir

Archive of SID

بیشترین میزان افت آبخوان است. براین‌اساس و با توجه به تغییرات افت ۰/۲ تا ۲ متر در سناریوهای مختلف اقلیمی، ۵ راهکار تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. راهکارهای کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، تغذیهٔ مصنوعی آبخوان و انتقال آب از سدهای مجاور درجهت تأمین آب شرب و جایگزینی آب زیرزمینی در مدل کمّی تحت اِعمال شرایط تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از اِعمال راهکارهای مختلف تعادل‌بخشی در آبخوان هشتگرد حاکی از ادامهٔ روند افت آبخوان در طی دورهٔ پیش‌بینی تا پایان سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ است. بررسی سناریوهای شبیه‌سازی نشان داد که راهکار S_1 که کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب از آبخوان است، بیشترین کارایی را در هر سه سناریوی انتشار اقلیمی در آبخوان نشان داده‌است؛ به‌طوری‌که میزان افت در سناریوی RCP 8.5 در طی ۵ سال میزان ۴/۴ متر و در سناریوهای RCP4.5 و RCP2.6 به‌ترتیب به میزان ۴ و ۳/۲ متر به‌وقوع خواهد پیوست. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان عدم‌قطعیت در نتایج تراز آبخوان مربوط به راهکار S_1 بوده و تفاوت ۱/۱۵ متری در نتایج سناریوهای انتشار را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش حاکی از اهمیت و لزوم تدوین راهکارهای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در تمام محدوده‌های مطالعاتی کشور است که در شرایط وقوع تغییرات اقلیمی نیز حادتر خواهد شد.

منابع

۱. احمدی‌فر ر.، موسوی م.، و رحیم‌زادگان م.، ۱۳۹۹. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: آبخوان دشت سراب). دانش آب و خاک، ۳۰(۱): ۱۵۳-۱۶۶.

۲. بی‌نام، ۱۳۹۳الف. گزارش ممنوعیت دشت هشتگرد. شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۱۲۱ ص.

۳. بی‌نام، ۱۳۹۳ب. گزارش برنامه احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور، وزارت نیرو، ۱۳۲ ص.

۴. بی‌نام، ۱۳۹۷. گزارش بیلان منابع آب محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد با کد ۴۱۰۵، شرکت آب منطقه‌ای البرز، وزارت نیرو، ۱۱۵ ص.

۵. پرهمت ج.، الطافی دادگر م.، و پرهمت ر.، ۱۳۹۷. شبیه‌سازی تعادل بخشی آبخوان در معرض افت شدید با اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی- مطالعهٔ موردی: حوضه روانسر- سنجابی کرمانشاه، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۵): ۱۴۵-۱۶۳.

۶. جمعدار م.، سرائی تبریزی م.، و یوسفی ح.، ۱۴۰۰. پتانسیل‌یابی میزان کارستی شدن چشمه‌ها از منظر هیدروژئوشیمیایی در محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد، هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۱۱۳-۱۲۶.

۷. حمزه س.، باقرپور طوله لات ز.، دلقندی م.، و کاردان‌مقدّم ح.، ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: آبخوان گتوند-عقیلی)، اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۱۱۱-۱۲۲.

۸. رسائی ا.، ح.، شرافتی ا.، و کاردان‌مقدّم ح.، ۱۳۹۹. تحلیل عدم‌قطعیت تراز آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعهٔ موردی: محدودهٔ مطالعاتی هشتگرد)، اکوهیدرولوژی، ۷(۳): ۸۱۵-۸۲۷.

۹. زنگنه م.، سرائی تبریزی م.، خسروجردی ا.، صارمی، ع.، ۱۴۰۰. اثربخشی راهکارهای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست (مطالعهٔ موردی: محدودهٔ مطالعاتی ورامین)، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۷): ۱۷۳۵-۱۷۵۱.

۱۰.زیدعلی‌نژاد ن.، ناصری ح.، ر.، شکیبا ع.، علیجانی ف.، ۱۳۹۹. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی در آبخوان کارستی لالی، استان خوزستان، نیوار، ۴۴(۱۰۹): ۹۷-۱۰۹.

۱۱.عابدینی م.، ضیایی ع.، ن.، شفیعی م.، قهرمان ب.، انصاری ح.، و مشکینی ج.، ۱۳۹۵. تحلیل عدم‌قطعیت در مدلسازی آب زیرزمینی با استفاده از روش GLUE (مطالعهٔ موردی: دشت بجنورد)، آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱۰): ۷۵۵-۷۶۹.

۱۲.عباس نوین‌پور ا.، صادقی اقدم ف.، و کاکی م.، ۱۴۰۰. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت روضه چای، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۱۵(۲۹): ۱۵-۲۷.

۱۳.کاردان‌مقدّم ح.، و روزبهانی ع.، ۱۳۹۴. ارزیابی مدل شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی ماهانهٔ سطح آب زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: آبخوان بیرجند)،

www.SID.ir

Archive of SID

مدیریت آب و آبیاری. ۵(۲): ۱۳۹-۱۵۱.

۱۴.مرتضوی‌زاده ف. و گودرزی م. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی رواناب سطحی و آب زیرزمینی با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2 (مطالعهٔ موردی: هشتگرد). آب و خاک. ۳۲(۲): ۴۳۳-۴۴۶.

15. Bouderbala A. 2019. The impact of climate change on groundwater resources in coastal aquifers: case of the alluvial aquifer of Mitidja in Algeria. Environmental Earth Sciences. 78(24): 1-13.
16. Ertürk A. Ekdal A. Gürel M. Karakaya N. Guzel C. and Gönenç E. 2014. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. Science of the Total Environment. 499: 437-447.
17. Frija A. Dhehibi B. Chebil A. and Villholth K. G. 2015. Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. Groundwater for Sustainable Development. 1(1-2): 23-32.
18. IPCC-TGCIA. 2007. General Guidelines on The use of scenario data for climateimate Impact and adaptation assessment, K. Alfsen, E. Barrow, B. Bass, X. 66 p.
19. Kumar C.P. 2016. Impact of climate change on groundwater resources. In Handbook of research on climate change impact on health and environmental sustainability (pp. 196-221). IGI Global.
20. Kardan Moghaddam H. Milan S.G. Kayhomayoon Z. and Azar N.A. 2021. The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. Environmental Monitoring and Assessment. 193(4): 1-20.
21. Kardan Moghaddam H. Moghaddam H. K. Kivi Z. R. Bahreinimotlagh M. and Alizadeh M. J. 2019. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. Groundwater for Sustainable Development. 9: 10-23.
22. Nistor M. M. 2019. Climate change effect on groundwater resources in South East Europe during 21st century. Quaternary International. 504: 171-180.
23. Racsko P. Szeidl L. and Semenov M. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. Ecological modeling. 57(1-2): 27-41.
24. Semenov M. A. 2007. Developing of high-resolution UKCUP02-based climate change scenarios in the UK. Agricultural and Forest Meteorology. 144: 127-138.
25. Semenov M. A. and Porter J. R. 1995. Climatic variability and the modeling of crop yields. Agricultural and Forest Meteorology. 73: 265-283.

www.SID.ir