

مطالعه طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد)

علی یوسفی^۱، مهدی سرائی تبریزی^{۲*}، جهانگیر پرهمت^۳ و حسین بابازاده^۴

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در راستای سازگاری با تغییر اقلیم است. منطقه مورد مطالعه این پژوهش، منطقه هشتگرد واقع در غرب استان البرز به وسعت ۱۱۷۰/۶ کیلومترمربع، و یک آبخوان آبرفتی با مساحت ۴۱۰/۷ کیلومترمربع است. براین اساس شبیه‌سازی دو پارامتر بارش و دما در منطقه 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 تغییر اقلیم در منطقه، به‌منظور ارزیابی وضعیت کمی آبخوان، با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی انجام گرفت و پیش‌بینی وضعیت آبی تحت شرایط تغییر اقلیم آنالیز شد. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده 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 معنی‌دار بودن اختلاف و مناسب بودن نتایج شبیه‌سازی است. از طرفی نتایج شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان حاکی از ادامه 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 آبی، سناریوهای تعادل بخشی آبخوان به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه با استفاده از ۵ راهکار ارزیابی با ارزیابی بهبود وضعیت نسبی آبخوان آنالیز شد. نتایج اعمال راهکارهای تعادل بخشی 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. براین اساس 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 تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در تمام محدوده‌های مطالعاتی کشور که در شرایط وقوع تغییرات اقلیمی نیز حادث خواهد شد، بسیار حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان هشتگرد، سازگاری با تغییر اقلیم، مدل MODFLOW.

ارجاع: یوسفی ع، سرائی تبریزی م، پرهمت ج، و بابازاده ح. ۱۴۰۱. مطالعه طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده 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

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 تعادل بخشی 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). از آنجایی که 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 تعادل بخشی و برون‌رفت از بحران آب زیرزمینی را ارائه دهند. ارائه سناریوهای مختلف در جهت تعادل بخشی 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 کره زمین با گرمایش جهانی به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در قرن حاضر مورد توجه قرار گرفته‌است (کاردان‌مقدم و روزبهانی، ۱۳۹۴). تغییرات اقلیم باعث تغییر در مدت، شدت، فرم و زمان بارش در مناطق مختلف کره زمین می‌شود که این مسئله باعث تغییر در تغذیه منابع آب، به‌خصوص منابع آب زیرزمینی می‌شود؛ بنابراین این تغییر در تغذیه منابع آب زیرزمینی باعث تنش‌هایی در عرصه مدیریت منابع آب می‌شود. رشد

فزاینده صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل‌زدایی و تخریب محیط‌زیست از طرف دیگر طی دهه‌های اخیر، افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین را به‌دنبال داشته‌است (IPCC-TGCI, 2007). اثرات تغییر اقلیم به‌صورت مستقیم بر میزان آبدی منابع آب سطحی و به‌طور غیرمستقیم بر میزان ذخیره آبخوان‌ها تأثیرگذار است. ارتباط تنگاتنگی بین اجزای چرخه هیدرولوژیک و سیستم اقلیمی وجود دارد که سبب می‌شود اثرگذاری مستقیمی بر هم داشته باشند. میزان رواناب، آبدی 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 آینده مدیریت منابع آب باشد. نیستور (۲۰۱۹) ارزیابی اثرات تغییر اقلیم 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 جنوب شرق اروپا استفاده شد. از جمله 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 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 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 جنوب شرقی با خشکسالی روبه‌رو است و محیط‌زیست، آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی برانگیخته می‌شوند. مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر تغییر اقلیم 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 در نتیجه افزایش برداشت و افت آبخوان بوده‌است (بی‌نام، ۱۳۹۷)؛

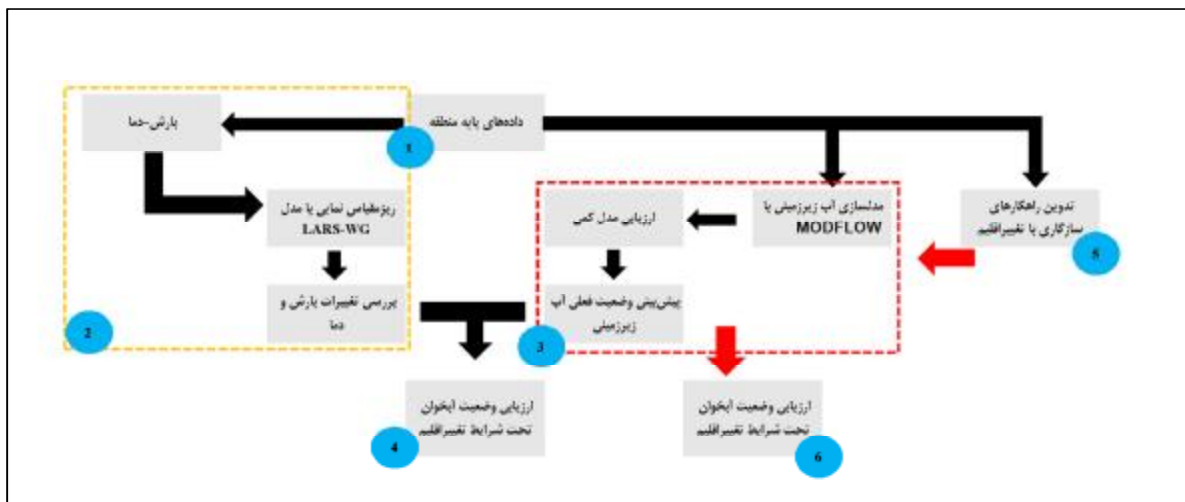
زیرزمینی این منطقه است. شناخت اثرات تغییر اقلیم بدون برنامه‌ریزی در راستای سازگاری با این واقعه نمی‌تواند در راستای مدیریت پایدار منابع آب مؤثر باشد.

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 EC-ERATH، HadGem2Es 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 تعادل بخشی آبخوان، شامل پنج سناریوی مدیریتی (S_1, S_2, S_3, S_4 و S_5) در جهت بهبود اطلس منابع آب زیرزمینی به ترتیب شامل کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، تغذیه مصنوعی آبخوان و انتقال آب از سدهای مجاور در جهت تأمین آب شرب و جایگزینی آب زیرزمینی به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت میزان بهبود وضعیت نسبی آبخوان تحت اعمال سناریوهای مختلف تعیین شد. شکل ۱ به‌طور شماتیک چارچوب و مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.

رسائی و همکاران، ۱۳۹۹). پرهت و همکاران (۱۳۹۷) مدل‌سازی را به‌عنوان ابزاری در پیش‌بینی شرایط آبخوان، تبادل بین منابع آب و اثرات تغییرات اقلیمی بر این منابع در جهت بهبود اهداف مدیریتی آبخوان مورد استفاده قرار دادند و سپس با استفاده از مدل MODFLOW در محیط GMS و مقایسه 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 بوده است. مرتضوی‌زاده و گودرزی (۱۳۹۷)، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم را با استفاده از مدل HadGEM2 در محدوده 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 پدیده تغییر اقلیم قرار داشته و تا سال ۲۰۴۰ میزان افت این آبخوان، ۱۸ متر خواهد بود. رسائی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم در شبیه‌سازی تراز آبخوان هشتگرد پرداختند و نتایج نشان داد که میزان عدم قطعیت در سناریوهای بدینانه نسبت به 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، مطالعه حاضر در راستای طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی انجام گرفته است؛ بنابراین هدف از این مطالعه ارزیابی راهکارهای تعادل بخشی در راستای تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب



شکل ۱- روندنمای مراحل مختلف انجام پژوهش

منطقه طرح

محدوده 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 محدوده مطالعاتی در نیمه شمالی حوزه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. رودخانه 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 لایه 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 رودخانه کردان تحذب منحنی‌های تراز آب زیرزمینی به سمت اراضی پایین‌دست رودخانه بوده و خطوط جریان نسبت به محور رودخانه کردان واگرا است که به سمت مرکز دشت تحذب منحنی‌ها به سمت بالادست رودخانه بوده و در پایاب دشت خطوط جریان نسبت به 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 به صورت 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 عباس‌نوبین‌پور و همکاران (۱۴۰۰) استفاده شده است. سناریوی اقلیمی نیز براساس حالت خوش‌بینانه RCP2.6، حالت میانی RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 انتخاب شد. 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 جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود (راکسو 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 پیش‌بینی‌شده 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 از جمله منابع آب و کشاورزی برای ارزیابی اثرات استفاده شد. مدل LARS-WG در اقلیم‌های مختلف امتحان شده و نتایج خوبی را در تولید آمارهای

جریانات ورودی و خروجی به آبخوان، بیلان منابع آب برای منطقه محاسبه و پارامترهای مدل با حل معادله لاپلاس تعریف شد (کاردان‌مقدم و همکاران، ۲۰۲۱). شرایط مرزی آبخوان شامل جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان، ساختار علم چینه‌شناسی (استراتیگرافی) آبخوان شامل توپوگرافی، سطح آب و سنگ‌بستر، میزان تغذیه ناشی از نفوذ از بارندگی و رواناب سطحی، تخلیه منابع آب آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و... پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل است. مهر ۱۳۹۳ به‌عنوان اولین گام شبیه‌سازی تعریف و براساس آن برای یک دوره 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 شبکه 250×250 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 دوره آماری در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، یک دوره 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 دوره واسنجی، ۲ سال به‌عنوان دوره 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 دوره 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 (رئائی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کاردان‌مقدم و همکاران، ۲۰۲۱). ارزیابی نتایج مدل در دوره 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.

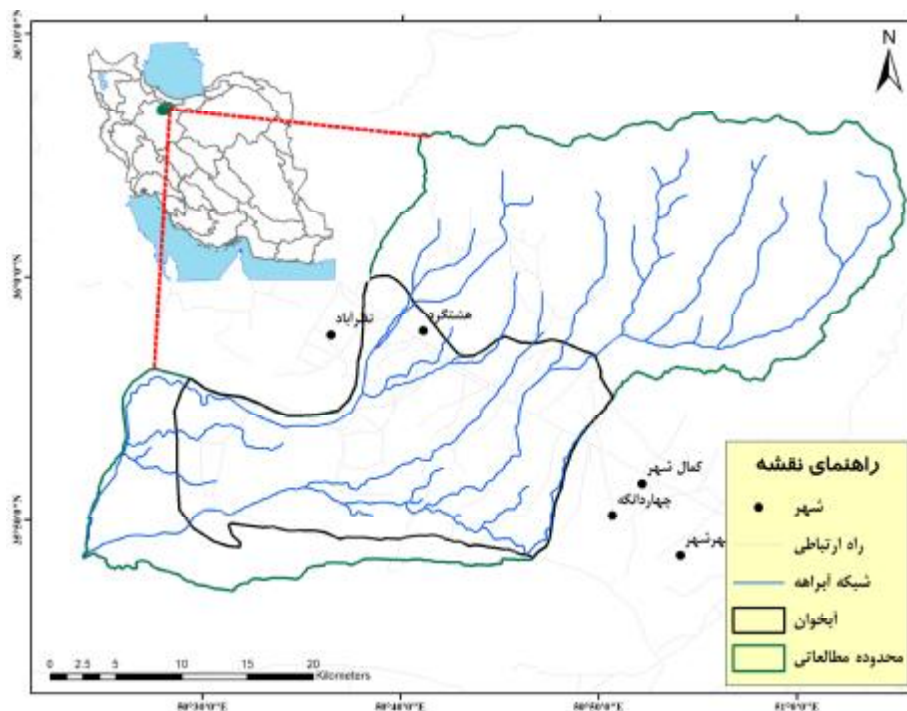
آب‌وهوای گوناگون شامل وقایع شدید آب‌وهوایی نشان داد (سمنو و همکاران، ۱۹۹۵؛ سمنو و همکاران، ۲۰۰۷). پس از شبیه‌سازی سری زمانی داده‌های تاریخی منطقه و ارزیابی دقت مدل، تولید سری زمانی برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف انتشار انجام گرفت. هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)^۱ در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهای جدید RCP به‌عنوان نماینده چهار خط‌سیر کلیدی گازهای گلخانه‌ای به نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 استفاده کرده است. نام‌گذاری سناریوهای خانواده RCP براساس میزان سطح واداشت‌های تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ به‌ترتیب شامل مقادیر ۲/۶، ۴/۵ و ۶ (W/m²) 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 نسبت به 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 بیان‌کننده عدم اتخاذ سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییرات اقلیمی و آب‌وهوایی کره 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 آبی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیک، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله‌روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه واسنجی است (کاردان‌مقدم و همکاران، ۲۰۱۹). اولین گام جهت شبیه‌سازی تعریف مدل مفهومی آبخوان براساس بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه است؛ بنابراین با توجه به حجم

جدول ۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان هشترود- MCM (بی نام، ۱۳۹۷)

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



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

راهکارهای تعادل بخشی

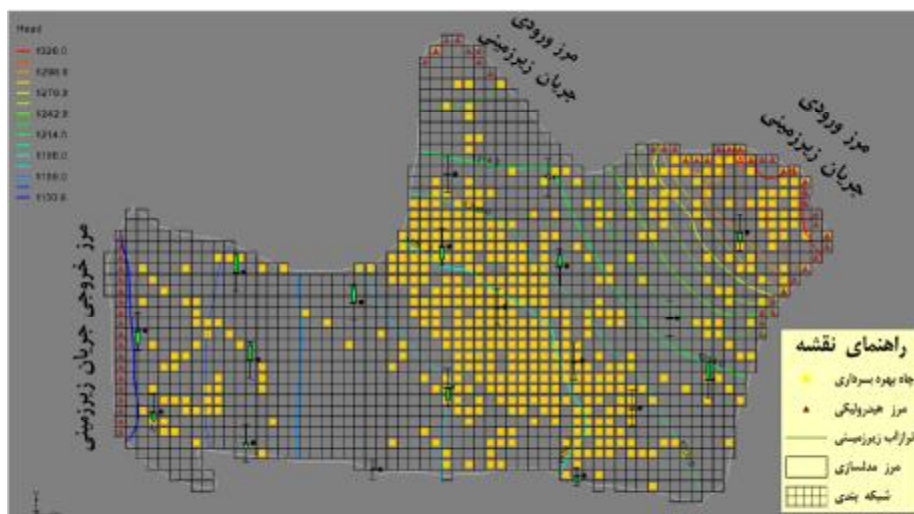
حجم قابل توجهی آب را به سفره آب زیرزمینی برگردانند. براساس برآوردهای انجام شده، حجمی بالغ بر ۴۴ درصد از هدف احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها با استفاده از این سه پروژه در سطح کلان تأمین خواهد شد و مابقی براساس جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز، طرح‌های افزایش نفوذ آب انجام خواهد شد (بی نام، ۱۳۹۳؛ بی نام، ۱۳۹۷).

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

با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی به منظور تسریع در کنترل این وضعیت برنامه تعادل بخشی زیر نظر وزارت نیرو در ۱۵ پروژه کلان ملی با هدف تأمین و بازگشت حجم استاتیک سفره‌های آب زیرزمینی آغاز شده است (بی نام، ۱۳۹۳؛ الف؛ بی نام، ۱۳۹۷). هدف چند پروژه از آن‌ها، کاهش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی از طریق مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز برای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، کنترل، نظارت و مسلوب‌المنفعه کردن چاه‌های فاقد پروانه مضر به مصالح عمومی و جایگزینی پساب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه است. این سه پروژه در صورت اجرایی شدن سبب کاهش حجم برداشت فعلی از منابع آب زیرزمینی می‌شوند و می‌توانند

نیز در بخش شمالی آبخوان و در مسیر رودخانه کردان با توجه به مطالعات در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به رشد و توسعه شهر جدید هشتگرد، راهکار جایگزینی منابع آب شرب به‌جای منابع آب زیرزمینی نیز به‌عنوان راهکار در نظر گرفته شد.

نیز مورد بررسی قرار گرفت. براین اساس 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 تغذیه مصنوعی



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

دقت مناسب مدل‌ها در دوره پایه است. براین اساس 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 دوره پایه ارائه شده است. روند تغییرات بارش و میانگین دما در سطح ایستگاه مورد شبیه‌سازی حاکی از دقت مناسب، شبیه‌سازی برای دوره 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 دوره پایه بود. نتایج به‌دست‌آمده در دوره شبیه‌سازی دوره آتی نشان داد که در سطح آماری ۹۵ درصد اختلاف بین میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده با میانگین بارش در دوره پایه معنی‌دار بوده و این موضوع در شبیه‌سازی پارامتر دما نیز صادق است. براین اساس مناسب بودن 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 منطقه مورد مطالعه است.

نتایج و بحث

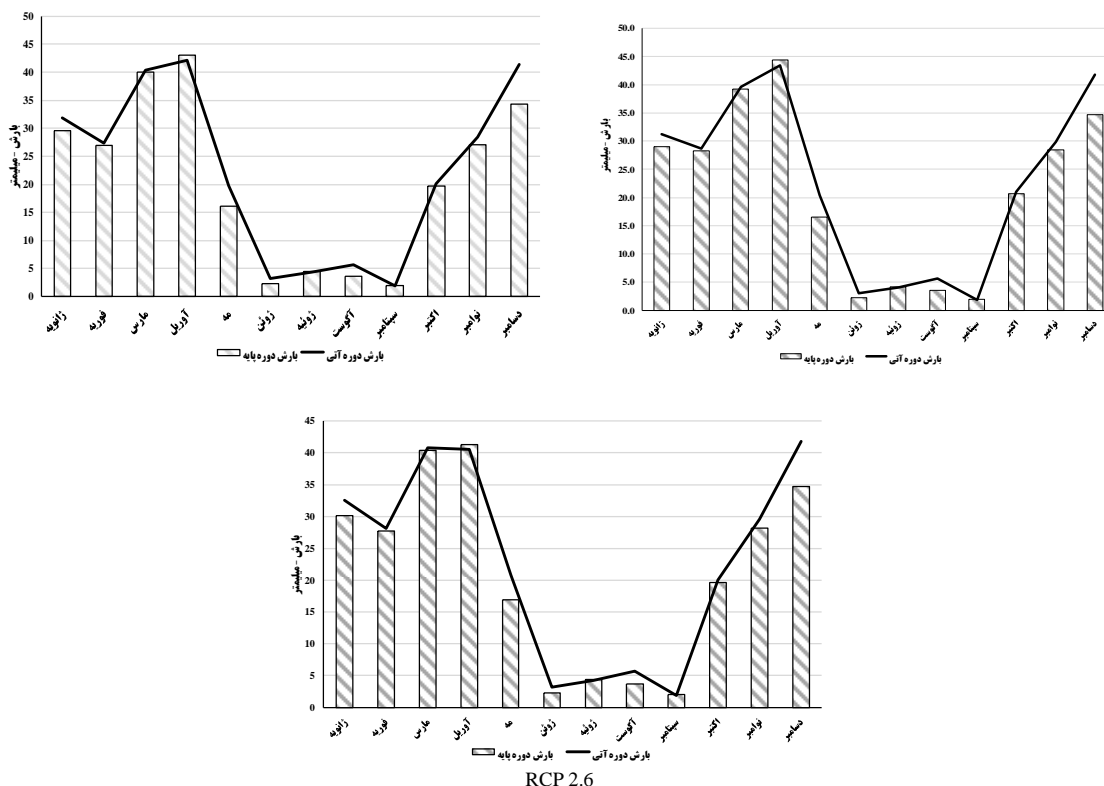
شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دما در اثر تغییر اقلیم

برای ارزیابی کارایی نتایج شبیه‌سازی تغییر اقلیم در سه سناریوی انتشار تحت سه مدل تغییر اقلیم دو پارامتر بارندگی و میانگین دما در دوره پایه و دوره آتی سنجش شد. در جدول ۲ ارزیابی نتایج آزمون‌های آماری برای این سنجش ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در دوره 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.

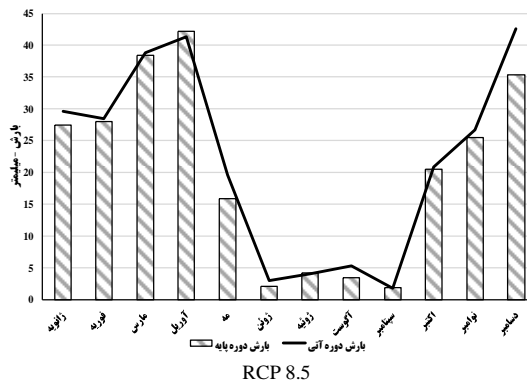
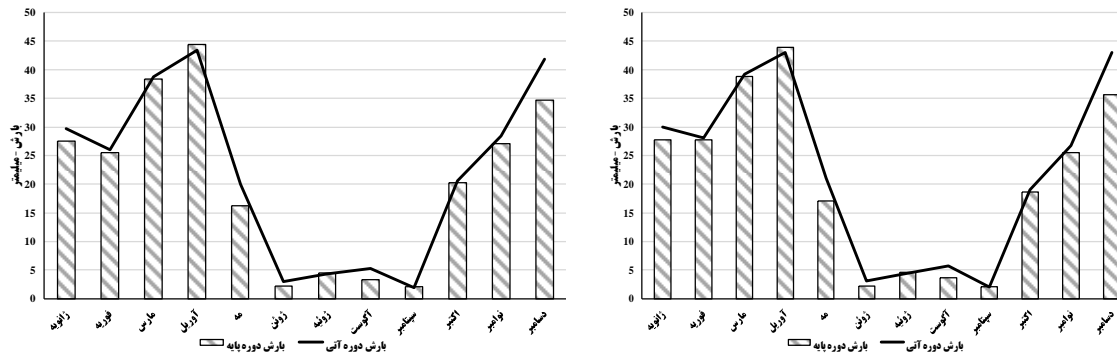
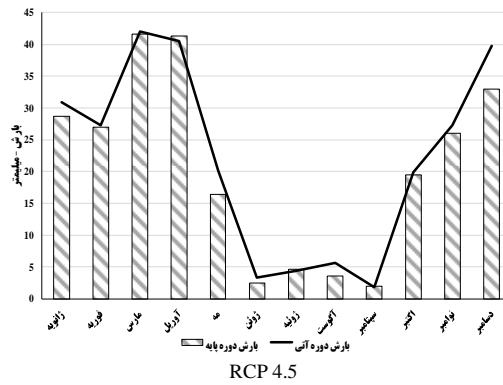
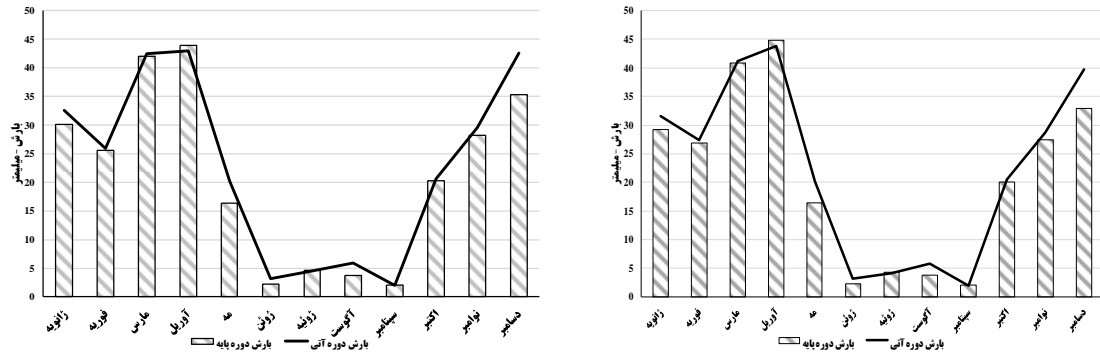
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و دقت مناسب شبیه‌سازی اقلیم برای سه پارامتر بارش، حداکثر دما و حداقل دما در دوره پایه، شبیه‌سازی با استفاده از مدل LARS_WG برای سه مدل اقلیمی تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 انجام گرفت. مبنای این شبیه‌سازی

جدول ۲- آزمون آماری مربوط به صحت سنجی کارایی مدل LARS-WG

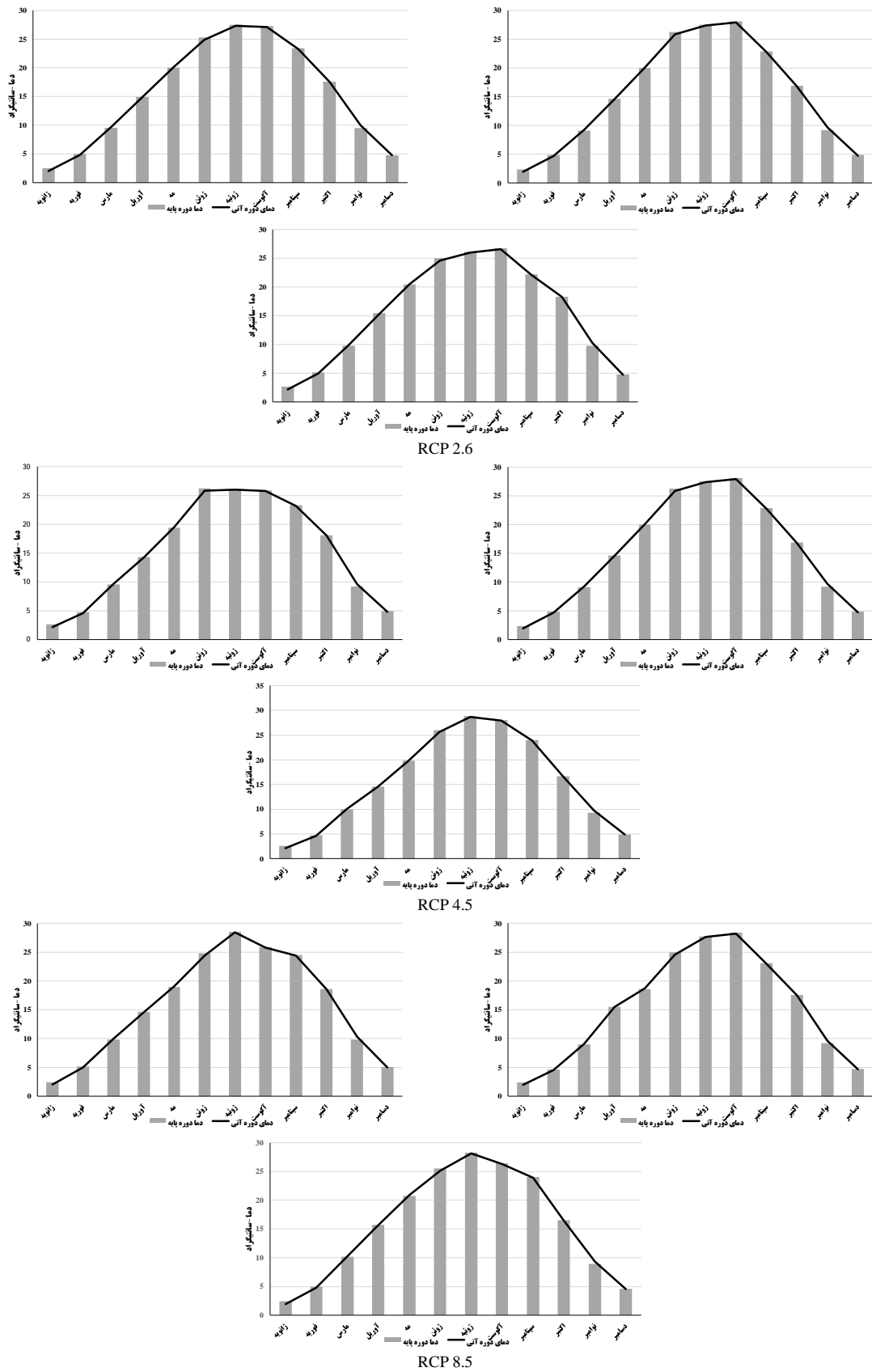
ماه	میانگین بارش ماهانه			دمای حداکثر			دمای حداقل		
	p-value	ks	t	p-value	ks	t	p-value	ks	t
ژانویه	۱	۰/۱۱۰	۰/۴۷۸	۱	۰/۱۴۹	۰/۵۱۲	۱	۰/۱۵۷	۰/۴۳
فوریه	۱	۰/۰۱۸	۰/۹۹۱	۱	۰/۱۳۷	۰/۳۴۹	۱	۰/۱۹۵	۰/۵۹۱
مارس	۰/۹۱۰	۰/۰۴۴	۰/۰۶۷	۱	۰/۰۰۹	۰/۴۰۵	۱	۰/۰۴۹	۰/۴۰۷
آوریل	۰/۹۵۰	۰/۱۲۴	۰/۰۴۷	۱	۰/۰۴۲	۰/۰۹۰	۱	۰/۱۴۱	۰/۸۳۶
مه	۰/۹۶۰	۰/۱۸۷	۰/۳۳۱	۱	۰/۰۳۱	۰/۱۲۹	۱	۰/۱۰۵	۰/۰۸۰
ژوئن	۱	۰/۱۵۹	۰/۰۳۳	۱	۰/۱۷۰	۰/۸۷۴	۱	۰/۱۲۰	۰/۸۸۶
ژوئیه	۰/۹۹۰	۰/۰۲۳	۰/۷۸۶	۱	۰/۱۴۹	۰/۶۴۱	۱	۰/۱۵۹	۰/۱۶۰
اوت	۱	۰/۱۷۶	۰/۰۴۰	۱	۰/۰۰۷	۰/۷۰۸	۱	۰/۱۸۹	۰/۴۹۳
سپتامبر	۱	۰/۰۳۹	۰/۵۱۸	۱	۰/۰۹۷	۰/۳۵۴	۱	۰/۱۲۳	۰/۵۶۷
اکتبر	۰/۹۷۰	۰/۱۵۴	۰/۵۲۷	۱	۰/۰۹۷	۰/۰۴۷	۱	۰/۰۷۶	۰/۳۰۴
نوامبر	۱	۰/۱۲۸	۰/۷۲۸	۰/۹۷۰	۰/۰۷۴	۰/۳۸۵	۱	۰/۰۲۴	۰/۵۳۱
دسامبر	۱	۰/۰۵۳	۰/۶۹۰	۰/۹۲۰	۰/۱۹۸	۰/۲۷۰	۱	۰/۰۷۷	۰/۷۸۵



شکل ۴- مقایسه میانگین بارش ماهانه (میلی متر) تحت افعال سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی در منطقه RCP 2.6



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

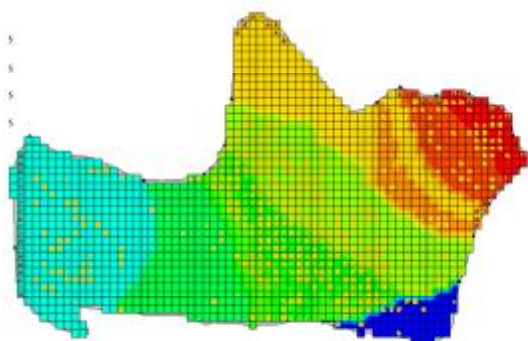


شکل ۵- مقایسه میانگین دمای ماهانه (درجه سانتی گراد) تحت اِعمال سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی در منطقه

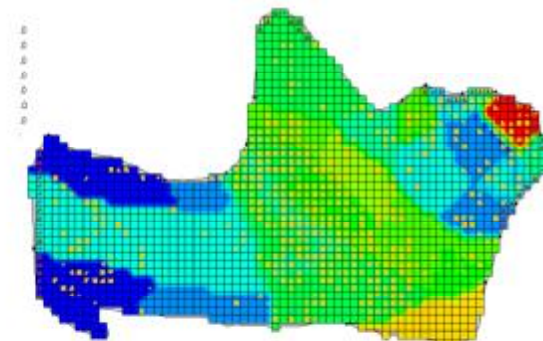
ارزیابی مدل جریان آب زیرزمینی

یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل در جهت به دست آوردن نتایج بهینه است. با توجه به اجرای مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه به عنوان عوامل حساس مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. واسنجی مدل کمی 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 می شود که این نتایج با استفاده از جنس سازندهای زمین شناسی نیز قابل اثبات است. عمق آبرفت به صورت اختلاف سطح زمین و لایه سنگ بستر در نظر گرفته شده که در ساختار مدل MODFLOW اطلاعات وارد شد. مقدار ضخامت آبرفت در بخش های مختلف متفاوت بوده و وابسته به ساختار منطقه است. مقدار قابلیت انتقال براساس نتایج آزمایشات پمپاژ در مدل وارد شد که در حین شبیه سازی 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 سه بعدی مدل وارد شد. بررسی مقادیر واسنجی شده ضرایب هیدرودینامیک آبخوان هشتگرد از ارتباط بسیار نزدیک بین این پارامترها با ساختار زمین شناسی منطقه خبر می دهد. به گونه ای که در بخش هایی از آبخوان که دارای ضریب آبدهی ویژه بالایی است، ساختارهای سه بعدی آبخوان نیز وجود لایه های ماسه ای با قابلیت آبدهی ویژه مناسب را نشان می دهد. شکل ۶، نتایج نهایی میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را نشان می دهد. در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، از داده های حاصل از گزارش بیلان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی و برخی از داده های میدانی شامل لوگ های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایشات پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال، نوع سازندهای زمین شناسی و مطالعات پیشین نیز در جهت تطبیق نتایج استفاده شد.

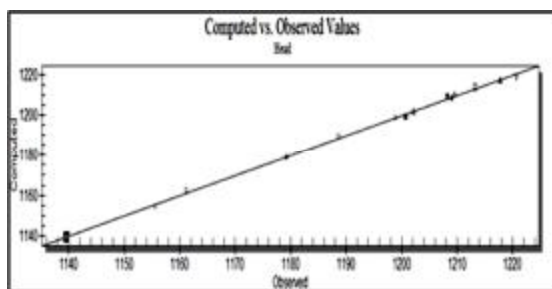


ب- آبدهی ویژه



الف- هدایت هیدرولیکی

شکل ۶- پارامترهای توزیعی واسنجی در سطح آبخوان هشتگرد



شکل ۷- نمودار صحت سنجی مدل در حالت ماندگار

ارزیابی دقت نتایج شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در حالت ماندگار که در شکل ۷ نشان داده شده است، به عنوان خروجی مدل حاکی از دقت بالای مدل در شبیه سازی تراز آب زیرزمینی است. نتایج نشان داد که مقدار تراز مشاهداتی و شبیه سازی شده نزدیک به هم و اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه سازی شده در مجموع چاه های مشاهده ای کمتر از یک متر است و در فاصله اندک با نیم سازی ارائه شده در شکل است.

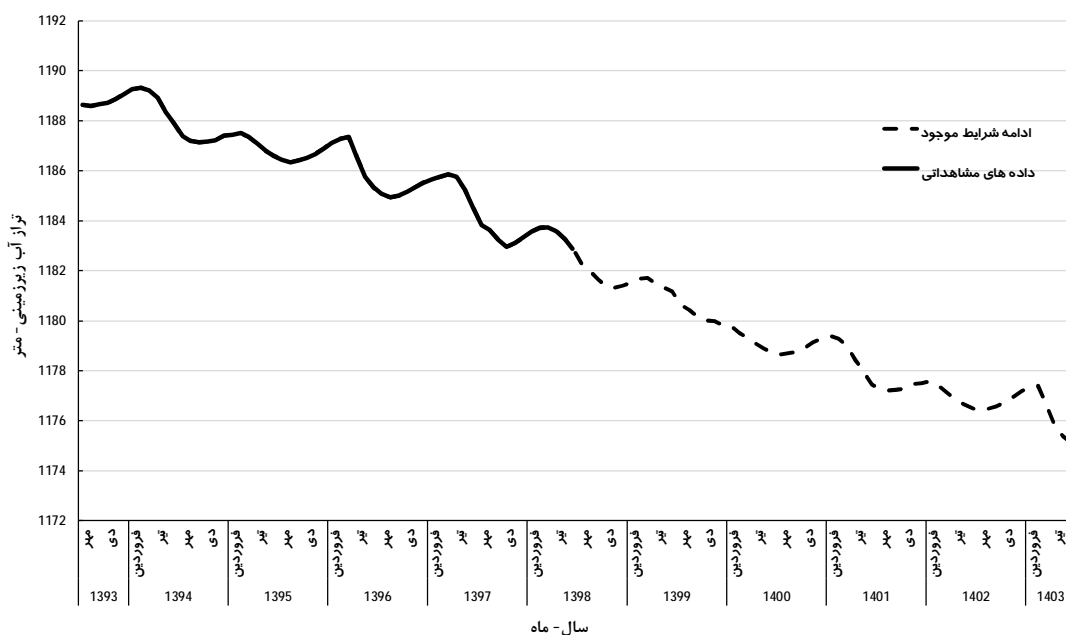
ادامه شرایط موجود نشان می‌دهد که این آبخوان در انتهای سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به مهر ۱۳۹۳، بیش از ۱۳ متر افت خواهد داشت که با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آبخوان هشتگرد توسط مرتضوی‌زاده و گودرزی (۱۳۹۷) و رسائی و همکاران (۱۳۹۹) نیز همخوانی دارد. در شکل ۸، هیدروگراف واحد آبخوان در شرایط ادامه وضعیت موجود 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

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 منطقه 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 مهر ۱۳۹۳ 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 کمی آبخوان، پیش‌بینی وضعیت آبی تراز سطح آب در آبخوان برای یک دوره ۵ ساله تا سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با در نظر گرفتن ادامه روند موجود از نظر بهره‌برداری انجام گرفت. براین اساس نتایج



شکل ۸- هیدروگراف آبخوان هشتگرد در شرایط ادامه وضعیت موجود

براین اساس با توجه به تغییرات میزان بارش و دما در محدوده مطالعاتی هشتگرد میزان تغییر در تغذیه و تخلیه آبخوان با توجه به بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه محاسبه و در مدل اعمال شد (IPCC-TGCI, 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

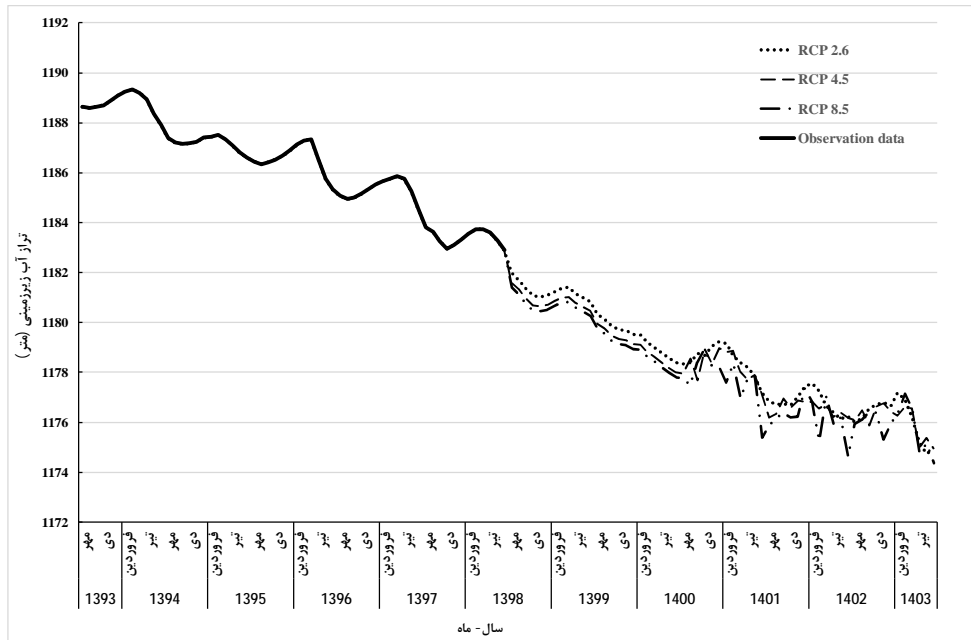
پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم

به‌منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد براساس گزارشات تأییدشده گزارش پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)^۱ (CMIP5) از سه مدل EC-ERATH، HadGem2Es، و GFDL-CM3 تحت سه سناریوی انتشار استفاده شد.

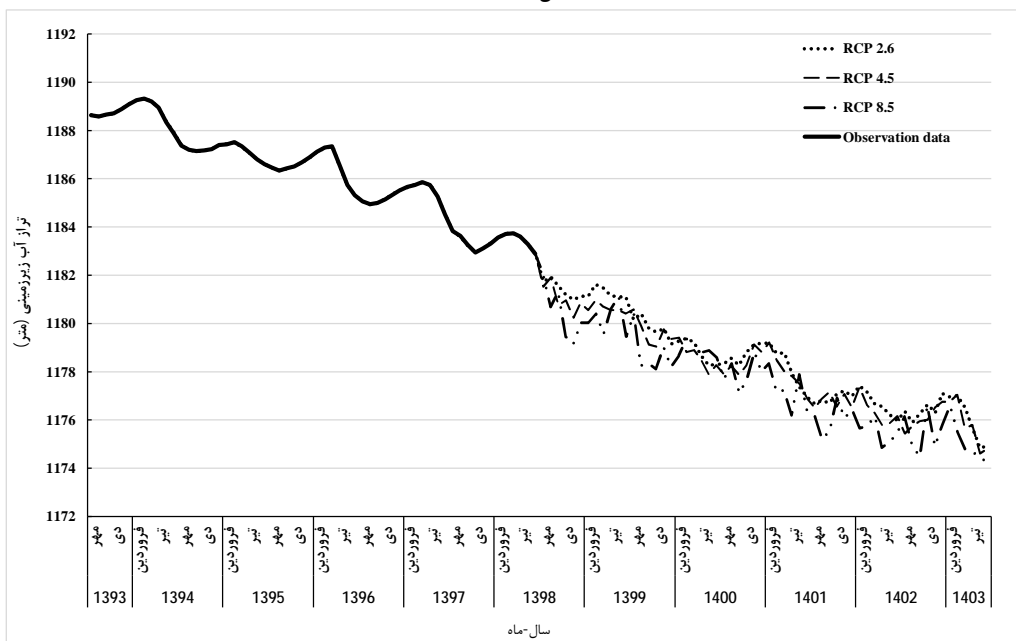
^۱ Intergovernmental Panel on Climate Change

۷/۸ تا ۹/۷ متر به دست آمد. نتایج به دست آمده از میزان افت در آبخوان حاکی از این موضوع است که روند افت آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم افزایشی بوده؛ به گونه‌ای که کمترین افت ثبت شده 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.

سه سناریوی انتشار RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دوره آتی ۵ ساله برآورد شد که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از مدل HadGem2 در سه سناریوی انتشار، حاکی از این موضوع است که میزان افت آبخوان ادامه داشته و تغییرات افت در طی دوره ۵ ساله پیش‌بینی بین ۷/۹ تا ۸/۵ متر افت به دست آمد. میزان افت تراز آبخوان در دوره پیش‌بینی در مدل Ec-Earth بین ۸ تا ۸/۷ متر و در مدل GFDL-CM3 بین

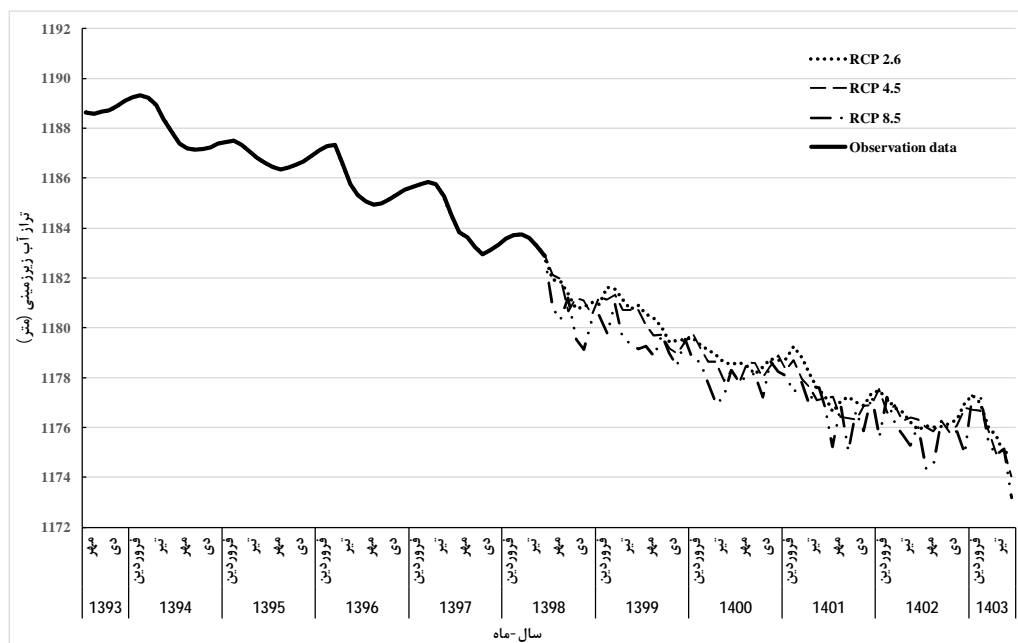


الف - مدل HADGem2Es



ب - مدل EC-ERATH

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



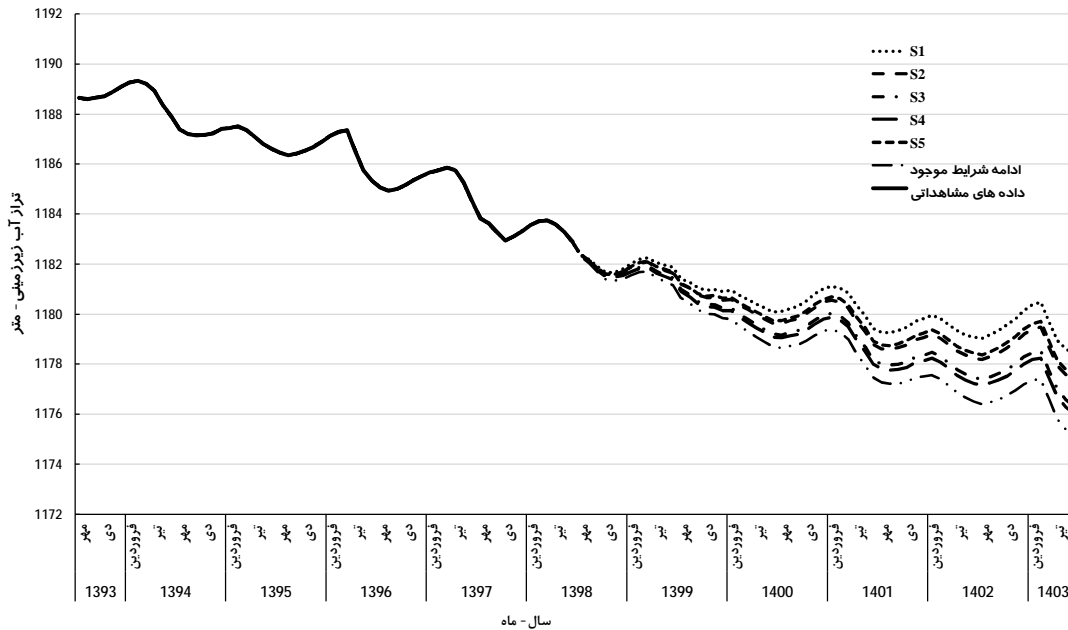
ج GFDL-CM3

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

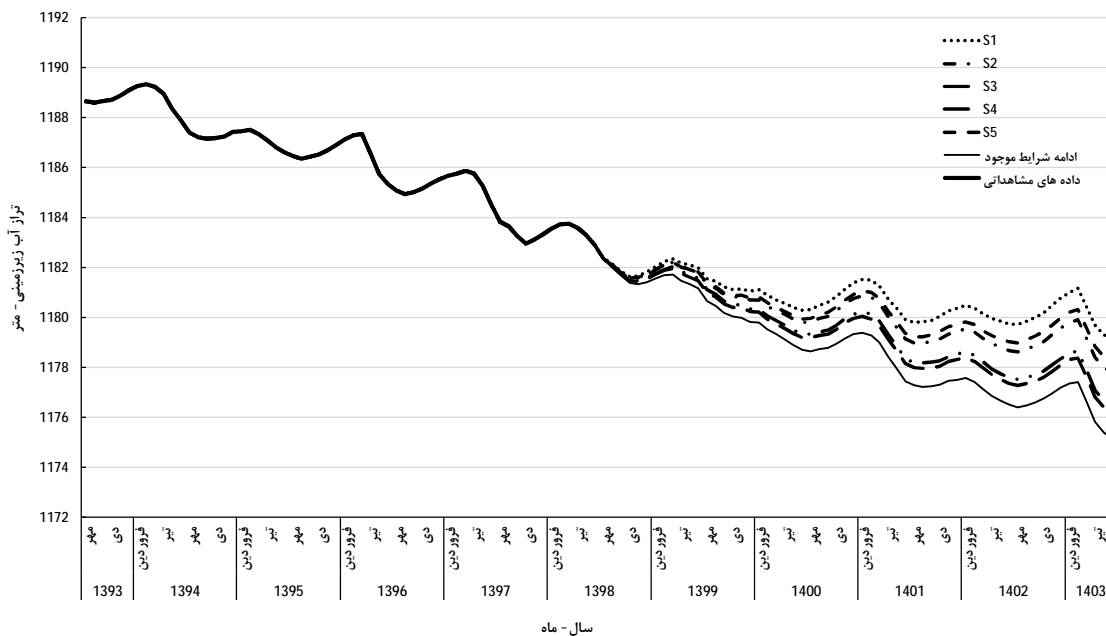
بررسی سیاست‌های تعادل بخشی

پنج سناریوی تعادل بخشی در آبخوان هشتگرد با توجه به وضعیت بیان منابع آب منطقه تعریف و در مدل مفهومی آبخوان تحت اعمال 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 به صورت کاهش ۱۵/۳، ۳۰/۶ و ۴۵/۹ میلیون مترمکعب از چاه‌های کشاورزی منطقه به صورت 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. به منظور ارزیابی اثر تغذیه مصنوعی در دشت هشتگرد با توجه به گزارش مکان‌یابی تغذیه مصنوعی در مسیر رودخانه کردان، مشخص شد که حجم آب برداشت‌شده از رودخانه در جهت تغذیه مصنوعی، ۳۸ میلیون مترمکعب است (بی‌نام، ۱۳۹۷). با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی آبرفت منطقه و ضریب نفوذپذیری، مشخص شد حداکثر میزان تغذیه آبخوان، ۷

میلیون مترمکعب خواهد بود که این میزان در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به صورت 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 به صورت انتقالی برای تأمین آب شرب شهر هشتگرد تخصیص یابد و جایگزین ۲۰ میلیون مترمکعب آب برداشت‌شده از چاه‌های منطقه می‌شود. براین اساس 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. براین اساس، 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.



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



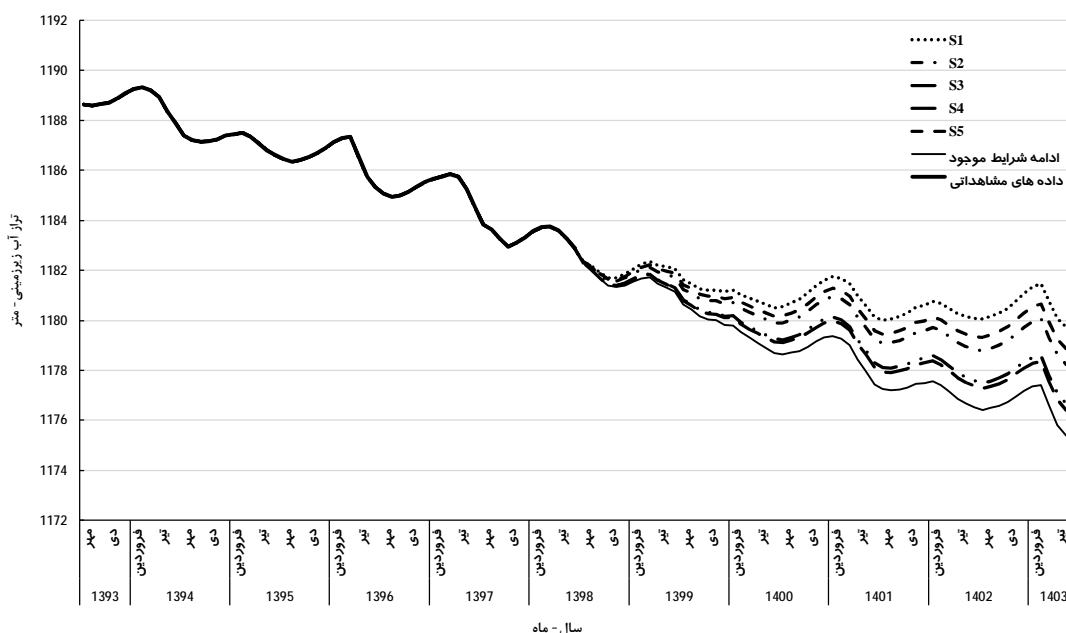
شکل ۱۱- هیدروگراف آبخوان در اعمال سیاست‌های تعادل بخشی تحت سناریوی انتشار RCP4.5 (S_1 تا S_5 به ترتیب سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از آبخوان هشتگرد با هدف بهبود تراز آب زیرزمینی و احیا و تعادل بخشی آن است).

در هر سه سناریوی انتشار اقلیمی در آبخوان نشان داده‌است؛ به طوری که میزان افت در سناریوی RCP 8.5 در طی ۵ سال میزان ۴/۴ متر و در سناریوهای RCP4.5 و RCP2.6 به ترتیب ۴ و ۳/۲ متر افت آبخوان کاهش داشته‌است. کم‌ترین میزان تأثیرپذیری در بهبود وضعیت

نتایج به دست آمده در تدوین راهکارهای مختلف تعادل بخشی در آبخوان هشتگرد حاکی از ادامه روند افت آبخوان در طی دوره پیش‌بینی است. بررسی سناریوهای شبیه‌سازی نشان داد که راهکار S_1 که کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب از آبخوان است، بیشترین کارایی را

مختلف نشان می‌دهد که بیشترین میزان عدم قطعیت نتایج هیدروگراف آبخوان مربوط به راهکار S₁ بوده که در این راهکار میزان عدم قطعیت در سه سناریوی انتشار ۱/۱۶ متر به دست آمد. در این شرایط کمترین میزان عدم قطعیت مربوط به سناریوی S₃ با میزان ۰/۱۵ متر به دست آمد. نتایج به دست آمده از میزان عدم قطعیت راهکارهای تعادل بخشی حاکی از این موضوع است که با افزایش میزان کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، میزان عدم قطعیت افت آبخوان افزایش داشته‌است.

کمّی آبخوان مربوط به سناریوی S₄ است که با توجه به کمبود حجم تغذیه مصنوعی، حدود یک متر بهبود وضعیت کمّی آبخوان را به دست آورده‌است. این سناریو در سناریوهای مختلف انتشار تفاوت کمّی را در دوره آبی (بهمن ۱۴۰۰ تا شهریور ۱۴۰۳) نشان می‌دهد. بررسی کمّی اعمال راهکارهای تعادل بخشی حاکی از این موضوع است که بیشترین میزان عدم قطعیت در سناریوی RCP 8.5 وجود دارد و این میزان بالای عدم قطعیت ناشی از تفاوت معنی‌دار بین پارامترهای اقلیمی در این سناریو است. نتایج اعمال راهکارهای تعادل بخشی در سناریوهای



شکل ۱۲- هیدروگراف آبخوان در اعمال سیاست‌های تعادل بخشی تحت سناریوی انتشار RCP8.5 (S₁ تا S₅) به ترتیب سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از آبخوان هشتگرد با هدف بهبود تراز آب زیرزمینی و احیا و تعادل بخشی آن است.

آبخوان هشتگرد با روند بحرانی از نظر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آبخوان حاکی از افت آبخوان به میزان ۱۳/۵ متر تا پایان سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ است که با توجه به وضعیت بحرانی آبخوان بسیار حائز اهمیت است. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی حاکی از روند کاهش بارش و افزایشی دما در این منطقه است. براساس نتایج به دست آمده، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان انجام گرفت و نتایج به دست آمده 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

نتیجه‌گیری

پس‌پس‌گیری 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 تعادل بخشی آبخوان برای تأمین این هدف مطرح شده‌اند. در این پژوهش سازگاری با تغییر اقلیم برای بهبود مدیریت و بهره‌برداری پایدار از منابع آب در

۵. پرهت ج. الطافی دادگر م. و پرهت ر. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی تعادل بخشی آبخوان در معرض افت شدید با اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی- مطالعه موردی: حوضه روانسر- سنجایی 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 محدوده مطالعاتی هشتگرد. هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۱۱۳-۱۲۶.
۷. حمزه س. باقرپور طوله لات ز. دلقدی م. و کاردان‌مقدم ح. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان گتوند-عقیلی). اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۱۱۱-۱۲۲.
۸. رسائی ا. ح. شرافتی ا. و کاردان‌مقدم ح. ۱۳۹۹. تحلیل عدم‌قطعیت تراز آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد). اکوهیدرولوژی، ۷(۳): ۸۱۵-۸۲۷.
۹. زنگنه م. سرائی تبریزی م. خسروجردی ا. صارمی، ع. ۱۴۰۰. اثربخشی راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی ورامین). تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۷): ۱۷۳۵-۱۷۵۱.
۱۰. زیدعلی‌نژاد ن. ناصری ح. ر. شکیبیا 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. شفیع م. قهرمان ب. انصاری ح. و مشکینی ج. ۱۳۹۵. تحلیل عدم‌قطعیت در مدلسازی آب زیرزمینی با استفاده از روش GLUE (مطالعه موردی: دشت بجنورد). آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱۰): ۷۶۹-۷۵۵.
۱۲. عباس نوین‌پور ا. صادقی اقدم ف. و کاکي م. ۱۴۰۰. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت روضه چای. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی. ۱۵(۲۹): ۱۵-۲۷.
۱۳. کاردان‌مقدم ح. و روزبهانی ع. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی ماهانه سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند).

بیشترین میزان افت آبخوان است. براین اساس و با توجه به تغییرات افت ۰/۲ تا ۲ متر در سناریوهای مختلف اقلیمی، ۵ راهکار تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. راهکارهای کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، تغذیه مصنوعی آبخوان و انتقال آب از سدهای مجاور در جهت تأمین آب شرب و جایگزینی آب زیرزمینی در مدل کمی تحت اعمال شرایط تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از اعمال راهکارهای مختلف تعادل بخشی در آبخوان هشتگرد حاکی از ادامه روند افت آبخوان در طی دوره پیش‌بینی تا پایان سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ است. بررسی سناریوهای شبیه‌سازی نشان داد که راهکار S₁ که کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب از آبخوان است، بیشترین کارایی را در هر سه سناریوی انتشار اقلیمی در آبخوان نشان داده‌است؛ به طوری که میزان افت در سناریوی RCP 8.5 در طی ۵ سال میزان ۴/۴ متر و در سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب به میزان ۴ و ۳/۲ متر به‌وقوع خواهد پیوست. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان عدم قطعیت در نتایج تراز آبخوان مربوط به راهکار S₁ 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 تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در تمام محدوده‌های مطالعاتی کشور است که در شرایط وقوع تغییرات اقلیمی نیز حادث خواهد شد.

منابع

۱. احمدی‌فر ر. موسوی م. و رحیم‌زادگان م. ۱۳۹۹. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت سراب). دانش آب و خاک. ۳۰(۱): ۱۵۳-۱۶۶.
۲. بی‌نام. الف. ۱۳۹۳. گزارش ممنوعیت دشت هشتگرد. شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو. ۱۲۱ ص.
۳. بی‌نام. ۱۳۹۳. گزارش برنامه احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور، وزارت نیرو، ۱۳۲ ص.
۴. بی‌نام. ۱۳۹۷. گزارش بیان منابع آب محدوده مطالعاتی هشتگرد با کد ۴۱۰۵، شرکت آب منطقه‌ای البرز، وزارت نیرو. ۱۱۵ ص.

25. Semenov M. A. and Porter J. R. 1995. Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*. 73: 265-283.
- مدیریت آب و آبیاری. ۵(۲): ۱۳۹-۱۵۱.
۱۴. مرتضوی زاده ف. و گودرزی م. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی رواناب سطحی و آب زیرزمینی با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2 (مطالعه 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-TGCI. 2007. General Guidelines on The use of scenario data for climate 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. Racsco 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.