

ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر نوسانات آب زیرزمینی دشت برخوار اصفهان

بابک همایون پور^۱، مسعود گودرزی^{۲*}، غلامرضا ذهتابیان^۳ بهارک معتمدوزیری^۴ و حسن احمدی^۵

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، ^۲ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، ^۳ استاد، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ^۴ استادیار، گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران و ^۵ استاد بازنشسته، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

چکیده

این پژوهش، با استفاده از گزارش هیات بین‌الدول تغییر اقلیم سازمان ملل، به بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر روی نوسانات آب سطحی و زیرزمینی دشت برخوار میمه اصفهان، پرداخته است. به منظور، مدل سازی هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آب‌دهی ویژه در حالت غیرماندگار واسنجی شد. برآورد بارندگی و دما در منطقه نیز با استفاده از خروجی مدل $HadCm_3$ از طریق مدل ریزمقیاس‌نمایی Lars-WG برای موقعیت ایستگاه میمه، تحت دو سناریوی A_1B و A_2 شبیه سازی شد. از دو آزمون تحلیل روند ناپارامتریک تخمین‌گر شیب سن و من‌کندال، برای آشکارسازی روند سطح ایستابی آب های زیرزمینی دشت برخوار میمه اصفهان طی دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۷۰ بر اساس آمار سطح ایستابی ۱۹ چاه مشاهداتی استفاده شد. با استفاده از ماتریس همبستگی پیرسون، همبستگی بین عناصر اقلیمی (ایستگاه میمه) دما، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (تورنت وایت) با سطح ایستابی دشت برخوار محاسبه شد و بر اساس آن یک مدل رگرسیونی چندمتغیره برای مدل کردن سری زمانی سالانه سطح ایستابی، در سطح اطمینان ۰/۹۵ توسعه داده شد. سطح ایستابی آب دشت برخوار به وسیله فاکتورهای اقلیمی دوره ۲۰۹۹-۲۰۸۰ و بر اساس مدل رگرسیون توسعه داده شده، شبیه‌سازی شد. نتایج بیانگر آن بود که نسبت به دوره پایه، سطح ایستابی آب منطقه با شیب سالانه نزدیک به نیم‌متر در سال، روند کاهشی داشته است. آنالیز همبستگی بیانگر آن بود که سه عنصر اقلیمی بارش، دما و تبخیر و تعرق در یک ترکیب خطی ۰/۷۵ از تغییرات سالانه آب زیرزمینی دشت را مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج مدل ریزمقیاس‌نمایی اجرا شده روی داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو، بیانگر آن بود که در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ تحت هر دو سناریو، سطح آب زیرزمینی منطقه، بین ۱۵ تا ۱۷ متر نسبت به دوره پایه افت خواهد داشت که ناشی از افزایش تبخیر و تعرق و به تبع آن کاهش بارش موثر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بارش، تبخیر و تعرق، تحلیل روند، سطح ایستابی، میمه

مقدمه

بحران جدیدی روبرو شد. البته این بحران تا اواخر قرن ۲۰ میلادی کمتر شناخته شده بود (IPCC, 2007). از سال‌های آخر قرن ۲۰ میلادی، واژه تغییر اقلیم به

پس از دوران صنعتی شدن که بشر توانست سرعت و میزان تولیدات خود را چندین برابر کند، کره زمین با

مطالعه، تحت هر سه سناریوی تغییر اقلیم برای دوره‌های آتی بود. Taei Semiroمی و همکاران (۲۰۱۳) اثرات تغییر اقلیم بر ذخایر آب زیرزمینی در حوزه آبخیز بار نیشابور را ارزیابی نمودند. به این منظور، ابتدا با استفاده از مدل‌های ارائه شده و به‌کارگیری روش‌های ریزمقیاس سازی، وضعیت اقلیمی منطقه طی سال‌های آتی را پیش بینی نمود. نتایج نشان‌دهنده افزایش میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل تقریباً به‌صورت یکسان و به میزان ۱/۱، ۲/۳ و ۶/۴ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش به میزان ۴/۱۶، ۶/۱۷ و ۳۱/۹ درصد تحت سناریوی A₂ مدل Hadcm3 به‌ترتیب در دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۷۱ است. پس از ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی، اثر تغییر اقلیم بر روی دبی رودخانه بار بررسی شد. نتایج بیانگر کاهش دبی به‌میزان نه، ۴۴ و ۶۶ درصد به‌ترتیب در ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه است. سپس، با استفاده از تجزیه و تحلیل شاخه خشکیدگی هیدروگراف مربوط به هر سال، اثرات تغییر اقلیم بر ذخایر آب زیرزمینی منطقه بررسی شد. نتایج حاکی از کاهش حجم ذخایر آب زیرزمینی به‌میزان ۷/۳۶، ۵۲/۰ و ۶۱/۰ درصد به‌ترتیب در سه دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰، نسبت به دوره پایه بود.

Poormohamadi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به تعیین اجزای بیلان آب سطحی و زیرزمینی حوزه آبخیز نیمه‌خشک تویسرکان در استان همدان و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر آن پرداخت. با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو در دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آبی دشت با احتمال وقوع ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد پرداخت. نتایج نشان داد که بیلان آبی دشت به‌میزان ۶/۲۱ میلیون مترمکعب در سال آبی ۸۸-۸۷ منفی است. تبخیر و تعرق که مهمترین جز هدررفت حوضه است، ۱۲۱ میلیون مترمکعب آب را هدر می‌دهد. نتایج بیلان آب زیرزمینی نیز نشان داد که تغییرات ذخیره ۵/۱۲- میلیون مترمکعب در سال است. اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب دشت نشان می‌دهد که به

ادبیات علمی جهان اضافه شد (Vicuna و Dracup، ۲۰۰۷). دلایل اصلی تغییر اقلیم، پدیده محبوس شدن گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص کربن دی‌اکسید در جو کره زمین است. Kouhestani (۲۰۰۹) با بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر روی سطح آب زیرزمینی در منطقه نرماب استان گلستان با استفاده از مدل ریاضی مادفلو، تغییرات سطح آب را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد، در اثر تغییر اقلیم در این منطقه، افت سطح آب زیرزمینی حدود چهار متر خواهد بود. Karamouz و همکاران (۲۰۱۱) اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت رفسنجان را با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM^۱) مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با بهره‌گیری از مدل Lars-WG، داده‌های بارش و دما را ریزمقیاس نمودند تا بتوانند مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان را طی دوره‌های آتی تعیین نمایند. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی باعث یک سیر نزولی بر روی حجم آبخوان شده است.

Shahnourian (۲۰۱۲)، اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را در دشت گرگان مورد بررسی قرار داد. نتایج مطالعه، با فرض حفظ وضعیت موجود توسعه منطقه، حاکی از سیر نزولی حجم آبخوان با توجه به تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر منابع و مصارف محدوده مطالعاتی است. Forouzandeh Shahraki (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای بر روی بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل در سال‌های آتی بود. بدین منظور، از داده‌های ثبت شده ۳۵ حلقه چاه پیزومتری طی دوره ۲۰۰۶-۱۹۸۷ استفاده نمود. جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی آینده از سناریوهای مدل اقلیمی HadCM3 بهره‌گرفت و جهت انطباق مقیاس خروجی این مدل با مقیاس مورد نیاز مطالعات تغییر اقلیم، داده‌های ثبت شده دما و بارش توسط مدل Lars-WG ریزمقیاس نمود. با استفاده از روابط حاصل از مدل‌های هوشمند، تراز آب چاه‌ها برای سال‌های آتی را تخمین زد که نتایج حاصل، بیانگر افت سطح آب کلیه چاه‌های پیزومتری مورد

¹ General Circulation Model

منابع آب حوضه رودخانه کلانتان در مالزی با استفاده از مدل‌های GCM پرداختند که نتایج آن‌ها افزایش بارندگی در فصل مرطوب و کاهش بارندگی در فصل خشک را نشان داد. Ferreira و همکاران (۲۰۱۸) اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارش‌های تابستانی در جنوب شرقی ایالات متحده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل افزایش قابل ملاحظه بارش به دلیل افزایش دما و شار بخار آب را نشان داد. Lotfi و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق در غرب ایران بر استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای RCP پرداختند. Goodarzi و Mortazavizadeh (۲۰۲۰) با استفاده از مدل GMS به ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر نوسانات آب زیرزمینی دشت هشگرد، بر اساس سناریوهای مختلف پرداختند. نتایج تحقیقات آنان، بیانگر سیر نزولی افت سطح آب زیرزمینی دشت ناشی از افت بارندگی منطقه است.

به دنبال این ناهنجاری‌های ناشی از گرمایش جهانی، بسیاری از مولفه‌های اقلیمی از قبیل بارش، تبخیر و تعرق، توزیع زمانی و مکانی بارش، تغییر پیدا کرده است (Artlert و همکاران، ۲۰۱۳). به دنبال آن دومینویی از تغییرات در منابع آب شیرین در دسترس جوامع انسانی از جمله تغییر در رژیم هیدرولوژیک رودخانه‌ها، تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی، تغییر در میزان برداشت آب‌های زیرزمینی، تغییر در میزان شارژ آب‌های زیرزمینی و غیره شروع می‌شود (Shrestha و همکاران، ۲۰۱۶).

تغییر اقلیم تاثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی و سطحی دارد (Sefenler، ۲۰۱۵). با توجه به اینکه، تاثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی نسبت به منابع آب سطحی غیرمستقیم و آهسته‌تر است، پایش وضعیت این منابع و حفظ پایداری آن‌ها تحت تاثیر این تغییرات از اهمیت بالایی برخوردار است (Rahmani و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی اثرات افزایش دما بر منابع آب، در منطقه خاورمیانه نشان می‌دهد که افزایش دمای منطقه تا دو درجه سانتی‌گراد موجب کاهش ۱۲ درصدی منابع آب خواهد شد که چالش‌ها و مناقشات

احتمال وقوع ۸۰ درصد مسئله بحران آب در دشت توپسرکان شدیدتر خواهد شد، به طوری که تغییرات ذخیره در دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به ترتیب سناریوهای ذکر شده ۷/۳۹- و ۶/۴۰- میلیون مترمکعب در سال خواهد رسید. Kidmose و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی تاثیرات تغییر اقلیم روی سطح آب‌های زیرزمینی در فرانسه و یونان را با استفاده از مدل‌سازی وقایع حدی انجام دادند و پیش‌بینی خود را برای ۲۰۸۱-۲۱۰۰ ارایه نمودند. دوره مبنای مطالعاتی آن‌ها ۱۹۹۱-۲۰۱۰ بوده است. افت سفره در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، حدود ۲۳ متر محاسبه شده است.

Pulido-Velazquez و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی جامع تاثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی در حوزه مانچا شرقی واقع در اسپانیا پرداختند. آن‌ها از مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم استفاده کردند. همچنین، جهت ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از مدل MT3DMS و برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مدل GMS-MODFLOW را به کار گرفتند. نتایج نشان داد که کمیت و کیفیت آب زیرزمینی (آلودگی نترات) همراه با تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی نیز تغییر می‌کند.

Goodarzi و همکاران (۲۰۱۵)، به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر ورودی آب زیرزمینی از یک روش هیبریدی، و برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر برداشت از آب‌های زیرزمینی از نرم‌افزار Cropwat برای تعیین نیاز آبیاری تحت دو سناریوی A2 و B1 در دشت نجف‌آباد استفاده کردند. میزان افت سطح ایستابی در سطح دشت، از حدود ۱/۲ متر به بیش از ۲/۵ متر در سال افزایش یافت. لذا، با توجه به وابستگی زیاد این دشت به منابع آب زیرزمینی و نیز با توجه به خشک شدن متناوب زاینده‌رود و در صورت نشست زمین، احیای منابع آب زیرزمینی غیرممکن می‌شود. بنابراین، ادامه بهره‌برداری از آبخوان با روند کنونی منجر به از بین رفتن دائمی و غیر قابل برگشت آبخوان می‌شود. Leong Tan و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر

دریافتند که میانگین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی حوضه در سال دهم پیش‌بینی نسبت به سال پایه ۷/۸۵ متر خواهد بود. Goodarzi و همکاران (۲۰۱۸) از طریق مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر را بررسی نمودند و با فرض ثابت بودن مصارف، نتیجه گرفتند تراز آب زیرزمینی دشت رو به افول است که ناشی از کاهش ورودی تغذیه‌ای دشت بوده است.

Zareian و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان پایداری مصرف آب در بخش کشاورزی حوزه آبخیز زاینده‌رود با استفاده از مدل‌های GCM، دریافتند که شاخص تعادل در آب موجود حوضه زاینده رود در الگوهای تغییر اقلیم، بین ۱۳ تا ۵۲ درصد افزایش خواهد یافت. دشت برخوردار اصفهان نیز که یکی از دشت‌های در معرض ریسک افت آب‌های زیرزمینی است، در دو دهه اخیر از لحاظ میزان برداشت آب زیرزمینی برای اهداف کشاورزی، در وضعیت بحرانی قرار گرفته است. بخش زیادی از آبخوان اصلی این دشت به دلیل عدم تطابق میزان برداشت بر میزان ظرفیت قابل برداشت آب زیرزمینی، در وضعیت خطرناکی قرار گرفته است که روند تشدید این وضعیت بحرانی برای منطقه در صورت تداوم این الگوی مصرف تشدید خواهد شد. هدف اساسی این مطالعه، بررسی و آشکارسازی تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت برخوردار اصفهان در نتیجه تغییر اقلیم در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ است.

مواد و روش‌ها

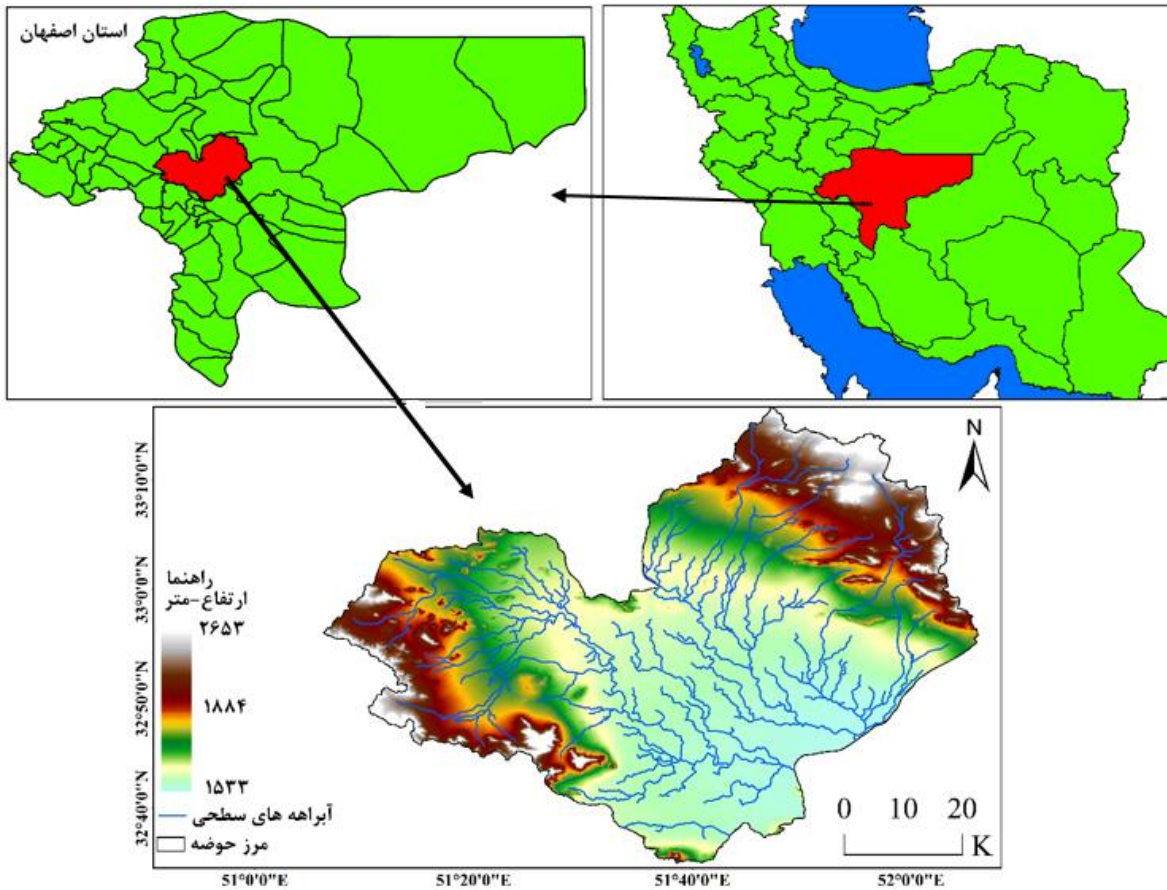
محدوده مطالعاتی: منطقه مورد مطالعه، دشت برخوردار اصفهان است (شکل ۱) که از نظر موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در بین طول جغرافیایی ۱۰° و ۵۱° تا ۱۰° و ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳° و ۳۲° تا ۳۳° و ۳۳° شمالی واقع است. منطقه مورد مطالعه، تقریباً در مرکز حوزه آبخیز گاوخونی واقع است. وسعت کل محدوده مطالعاتی ۳۳۸۵ کیلومتر مربع است که ۱۰۰۲/۹ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۲۳۸۲/۱ کیلومتر مربع را دشت تشکیل می‌دهد و آبخوان آبرفتی ۱۵۸۶/۶ کیلومتر مربع از دشت را شامل می‌شود.

منطقه را در آینده افزایش خواهد داد (Jalili و همکاران، ۲۰۱۶).

طی سه دهه اخیر تلاش‌های زیادی صورت گرفته، تا اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی، به‌صورت کمی درآید که در این راستا، مدل‌های گردش عمومی جو تحت سناریوهای مختلفی ارائه شده است. نتایج حاصل از اجرای اغلب این سناریوهای، بیانگر تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در میزان آب در دسترس در مقیاس‌های بزرگ است (Chen و همکاران، ۲۰۱۲). در ایران نیز، افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در بیشتر دشت‌های کشور به‌وضوح مشاهده می‌شود. تهی شدن مخازن آب‌های زیرزمینی، خشک شدن قنوات و چشمه‌ها و حتی چاه‌های نیمه‌عمیق و کاهش دبی چاه‌های عمیق، تغییر جهت جریان آب‌های زیرزمینی، شور شدن آبخوان‌ها، شور شدن خاک به‌واسطه آبیاری با آب‌های شور، بایر شدن کشتزارها، فرسایش خاک و غیره، بیشتر دشت‌های کشور را در زمره «مناطق مبتلا به بیابانزایی» قرار داده است (Rezaei Zaman و همکاران، ۲۰۱۳؛ Qalenei Mohamadi و همکاران، ۲۰۱۲).

محققان زیادی تاثیر تغییرات اقلیمی را بر تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در نواحی مختلف مورد بررسی قرار دادند. برای نمونه، پژوهش Chen و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که خروجی مدل‌های شبیه‌ساز تغییر اقلیم در منطقه پینگ‌تنگ تایوان، بیانگر آن است که سطح آب‌های زیرزمینی منطقه در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۱۰، کاهش محسوسی خواهد داشت. در ویتنام، Shresta و همکاران (۲۰۱۶) نتایج مشابهی را در مورد تاثیر تغییر اقلیم در سطوح ایستابی آب‌های زیرزمینی دلتایی در ویتنام نشان دادند. نتایج آنها نشان داد، تا پایان قرن ۲۱ میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی و در نتیجه سطح آب زیرزمینی منطقه کاهشی است. در ایران نیز، محققان نتایج مشابهی را در مورد تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در نتیجه تغییر اقلیم به‌دست آورده‌اند. به‌طوری که Rezaei Banafsheh و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی حوزه آبخیز تسوج با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری

بلندترین نقطه این محدوده مطالعاتی، ۲۶۵۳ متر و کمترین آن ۱۵۲۶ متر از سطح دریا است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت برخوار اصفهان

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، از سه دسته داده‌ها استفاده شد. دسته اول، داده‌های مربوط به سطح ایستابی دشت برخوار که با استفاده از ۱۹ چاه مشاهداتی دارای داده بلندمدت (۱۳۹۵-۱۳۷۰)، مورد بررسی قرار گرفت. دسته دوم، داده‌های مربوط به عناصر اقلیمی دوره پایه است که شامل دما و بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک میمه است که نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه است. عنصر تبخیر و تعرق پتانسیل نیز با استفاده از روش تورنت وایت برای ایستگاه میمه محاسبه شد. دسته سوم از داده‌ها، داده‌های دما و بارش خروجی مدل HadCM₃ برای دوره تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۸۰-۲۰۹۹ بود که برای موقعیت ایستگاه میمه با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمای

داده‌های مورد استفاده: داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در مطالعه

| منبع | دوره آماری | نوع داده |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|
| سری زمانی ۱۹ چاه مشاهداتی | ۱۳۷۰-۱۳۹۸ | داده‌های سطح ایستابی |
| ایستگاه هواشناسی میمه | ۱۹۹۹-۲۰۱۸ | داده‌های اقلیمی دوره پایه |
| شبیه‌سازی HadCM ₃ ریزمقیاس نمایی آماری برای موقعیت ایستگاه میمه با مدل Lars-WG | ۲۰۸۰-۲۰۹۰ | داده‌های تغییر اقلیم |

$$Q = \text{Median} \left(\frac{w_j - w_i}{j - i} \right) \quad \forall j > i \quad (1)$$

که در آن، Q تخمین‌گر شیب خط روند و w_j و w_i به ترتیب میانگین تراز آب زیرزمینی دشت برخوار در سال t ام و t ام و زام است. مقادیر مثبت (منفی) Q نشان‌دهنده روند افزایشی (کاهشی) در سری است. کم‌رنگ سازی تاثیر داده‌های حدی (داده‌های پرت) از مهمترین مزایای این روش ناپارامتریک نسبت به رگرسیون خطی است (Sen, ۱۹۶۶). بعد از آشکارسازی شیب روند سری زمانی داده‌های میانگین فضایی سالانه سطح ایستابی آب دشت برخوار اصفهان (استخراج شده از میانگین ۵۴۳۷ چاه مشاهداتی)، اقدام به بررسی این موضوع شد که آیا روند آشکار شده در سطح اطمینان ۰/۹۵ ($P_value=0.05$) معنی‌دار است یا خیر. در این راستا، از آزمون ناپارامتریک من-کندال استفاده شد. این آزمون ناپارامتریک، به دلیل عدم محدودیت در توزیع سری زمانی از مناسب‌ترین آزمون‌های تحلیل روند برای سری‌های هیدرولوژیک است (Mann, ۱۹۴۵). آماره T آزمون من-کندال با استفاده از رابطه (۲)، محاسبه شد.

$$T = \frac{4p}{n(n-1)} \quad (2)$$

که در آن، T آماره کندال، n تعداد کل سال‌های آماری و P مجموع تعداد رتبه‌های بزرگتر از ردیف ni است که بعد از آن قرار می‌گیرد که صورت رابطه (۳)، به دست می‌آید.

$$P = \sum_{n=1}^n (n_i) \quad (3)$$

که در آن، n شماره ردیفی است که برای هر سال تعریف شده است (Choubin و همکاران، ۲۰۱۲).

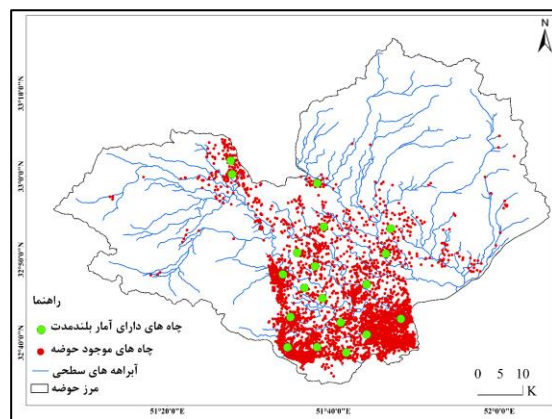
معنی‌داری آماره T نیز توسط رابطه (۴) آزمون می‌شود.

$$T_t = \pm t_g \sqrt{\frac{4n+10}{9n(n-1)}} \quad (4)$$

در این رابطه، t_g مقدار بحرانی توزیع نرمال است. این مقدار در سطح ۰/۰۵ برای آزمون دو دامنه برابر با ۱/۹۶ است (Mann, ۱۹۴۵). با توجه به مقدار بحرانی بدست آمده برای T_t ، حالات مختلفی مشاهده خواهد شد. اگر $-T_t < T < +T_t$ هیچگونه روند مهمی در سری‌ها مشاهده نمی‌شود و سری‌ها تصادفی هستند. همچنین، اگر $T < -T_t$

آماره Lars-WG برآورد شد و بر اساس دما شبیه‌سازی شده، مجدداً تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شد.

در شکل ۲، موقعیت چاه‌های موجود در دشت برخوار اصفهان ارائه شده است. بر اساس آمار سال ۱۳۹۵، شرکت مدیریت منابع آب استان اصفهان در آن سال، تعداد ۵۴۳۷ حلقه چاه فعال در دشت مذکور وجود دارد که از این تعداد، ۱۹ حلقه چاه دارای آمار بلندمدت ۲۸ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۸) بوده که در این مطالعه از داده‌های سطح ایستابی این چاه‌ها استفاده شد.



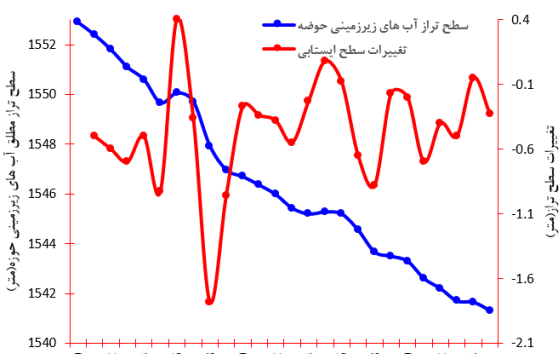
شکل ۲- چاه‌های مشاهداتی موجود در دشت برخوار اصفهان

ابتدا، اقدام به بررسی و تحلیل روند سری زمانی میانگین فضایی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار اصفهان، بر اساس چاه‌های مشاهداتی شد. آنالیز همبستگی پیرسون در سطح اطمینان ۰/۹۵ بین سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه و مولفه‌های دما، بارش و نیز تبخیر و تعرق پتانسیل (محاسبه شده به روش ترنت وایت) بررسی شد و بر اساس این تحلیل همبستگی، یک مدل رگرسیون چندمتغیره برای مدل کردن سری زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی سطح دشت برخوار در سطح اطمینان ۰/۹۵ در اقلیم دوره پایه ۲۰۱۸-۱۹۹۹ توسعه داده شد. برای آشکارسازی روند داده‌های میانگین فضایی سالانه سطح ایستابی آب دشت برخوار اصفهان (استخراج شده از میانگین ۵۴۳۷ چاه مشاهداتی) از آزمون ناپارامتریک تخمین‌گر شیب سن استفاده شد که به صورت رابطه (۱)، ارائه شده است (Sen, ۱۹۶۶).

جدول ۲- ویژگی‌های آمار توصیفی سطح ایستابی آب‌های

| زیرزمینی منطقه مورد مطالعه | | | |
|----------------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| دوره ۱۳۸۰-۱۳۹۰ | دوره ۱۳۸۰-۱۳۸۰ | دوره ۱۳۷۰-۱۳۸۰ | |
| ۱۳۹۸ | ۱۳۹۰ | ۱۳۷۰ | میانگین فضایی سطح ایستابی |
| ۱۴۵۲ | ۱۵۴۵ | ۱۵۵۰ | انحراف معیار فضایی سطح ایستابی |
| ۱/۳ | ۱/۲ | ۰/۸۵ | ضریب تغییرپذیری فضایی سطح ایستابی |
| ۰/۰۹ | ۰/۰۷ | ۰/۰۵ | ضریب تغییرپذیری فضایی سطح ایستابی |

تحلیل روند سری زمانی ۲۶ ساله، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (۱۳۷۰-۱۳۹۵) در شکل ۳، ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، روند ۲۶ ساله میانگین فضایی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوردار اصفهان که با استفاده از میانگین فضایی ۱۹ چاه مشاهداتی دشت به دست آمده است، طی دوره مورد بررسی، روند کاهشی داشته است. در کنار این روند کاهشی، میزان تغییرات سطح ایستابی سال به سال آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، نیز ارائه شده است.



شکل ۳- روند تغییرات سالانه سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت

برای تحلیل روند سری زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از دو آزمون آماری ناپارامتریک تخمین‌گر شیب سن، برای آشکارسازی روند

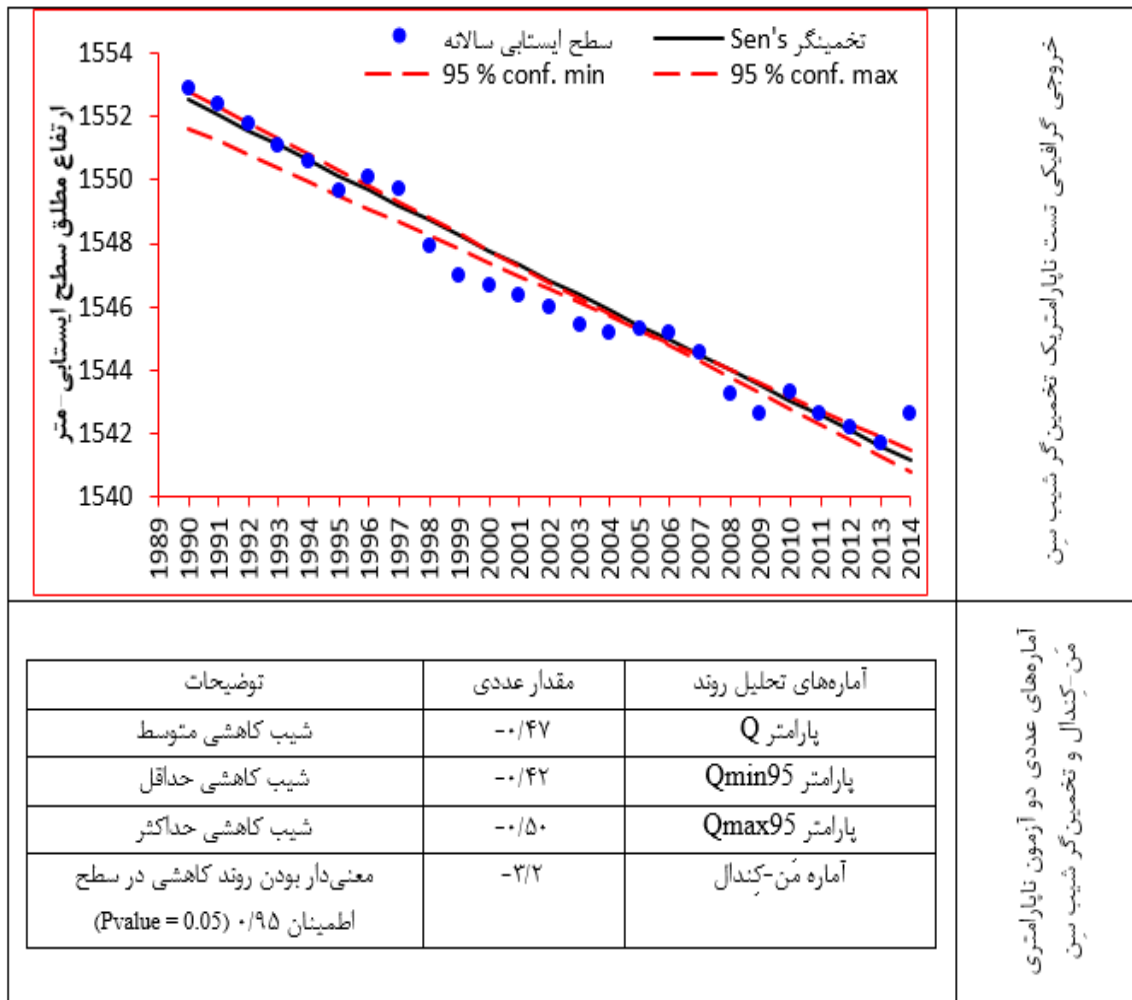
$T_t > T$ نشان‌دهنده روند مثبت در سری‌ها و اگر $T_t < T$ باشد، روند منفی در سری‌ها غالب خواهد بود (Mann, 1945). برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه، از خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و A1B استفاده شد. با توجه به اینکه، خروجی این نوع مدل‌های گردش عمومی از لحاظ رزلوشن فضایی بسیار بزرگ مقیاس هستند، برای استخراج داده‌های دما و بارش ماهانه موقعیت ایستگاه میمه، از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری Lars-WG استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی آینده این مدل ریزمقیاس‌نمایی، سری زمانی روزانه بارش، حداقل و حداکثر دما و ساعات آفتابی است. بعد از ریزمقیاس‌نمایی و تولید عناصر اقلیمی دما و بارش در مقیاس ماهانه برای دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ در ایستگاه میمه، با اجرای مجدد مدل رگرسیون چندمتغیره توسعه داده شده در اقلیم دوره پایه، برای مدل‌سازی سری زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی مجدداً بر اساس عناصر اقلیمی شبیه‌سازی شده دوره تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲، ویژگی‌های آمار توصیفی سطح ایستابی منطقه مورد مطالعه از داده‌های مربوط به ۱۹ چاه، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین فضایی سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت برخوردار بر اساس داده‌های سطح ایستابی چاه‌های مورد بررسی، طی سه دوره ارائه شده در جدول ۲، روند کاهشی داشته است. میانگین فضایی سطح ایستابی در دوره، ۱۳۸۰-۱۳۷۰، برابر ۱۵۵۰ متر (ارتفاع مطلق سطح ایستابی چاه‌ها از سطح دریا) در دوره ۱۳۸۰-۱۳۹۰، ارتفاع سطح ایستابی به ۱۵۴۵ متر و در دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۸ به ۱۴۵۲ متر رسیده است. در کنار افت سطح ایستابی دشت برخوردار طی دوره آماری مورد بررسی، ضریب تغییرپذیری فضایی سالانه سطح ایستابی منطقه، افزایش پیدا کرده است.

سری زمانی و آزمون من-کندال، برای آشکارسازی معنی داری روند، استفاده شد که نتایج به صورت جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج دو آزمون ناپارامتریک من-کندال و تخمین گر شیب سن



خروجی گرافیکی تست ناپارامتریک تخمین گر شیب سن

آماره‌های عددی دو آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر شیب سن

در جدول ۴، ماتریس تحلیل همبستگی پیرسون سری زمانی سالانه سطح ایستابی آب زیرزمینی چاه‌های منطقه، با عناصر اقلیمی دوره پایه (داده‌های دما و بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل محاسباتی ایستگاه سینوپتیک میمه) طی دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۹۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این ماتریس مشاهده می‌شود، دو فاکتور اقلیمی بارش، و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (محاسبه شده با استفاده از روش ترنت وایت) با ضریب همبستگی ۰/۷۶- و ۰/۷۰- بالاترین همبستگی معکوس معنی دار را با سری زمانی سطح ایستابی آب دشت برخوردار داشته‌اند.

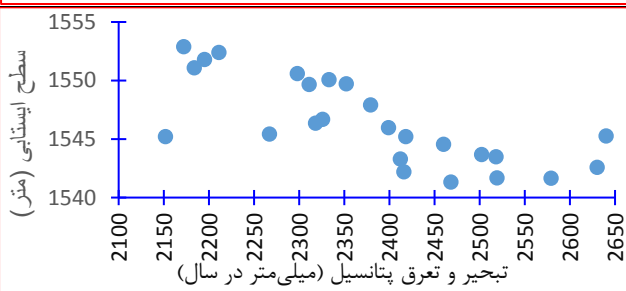
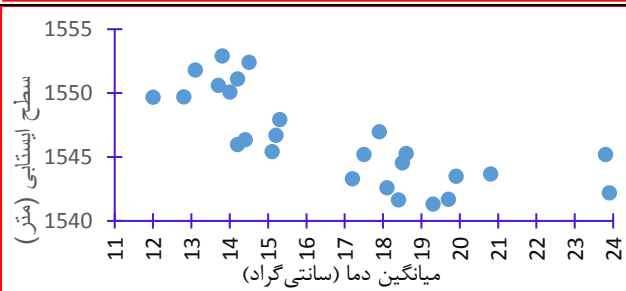
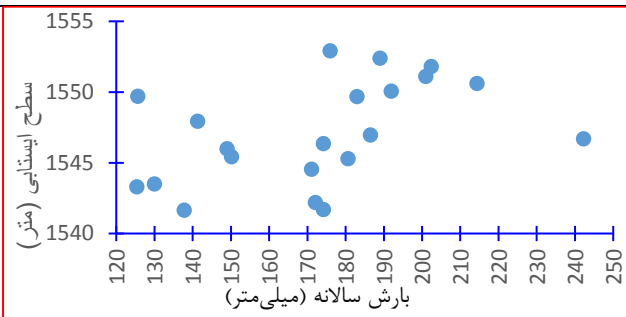
همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، روند سری زمانی میانگین فضایی سالانه سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت برخوردار طی دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۷۰ یک روند کاهشی با شیب متوسط ۰/۴۲- متر در سال داشته است. به عبارت دیگر، طی دوره مورد مطالعه سطح آب زیرزمینی دشت برخوردار با شیب سالانه ۴۲ سانتی‌متر افت کرده است که بر اساس آماره آزمون ناپارامتریک من-کندال، این روند نزولی در سطح اطمینان ۰/۹۵ (Pvalue=0.05) معنی دار بوده است.

معنی‌داری با تغییرات سالانه سطح ایستابی منطقه داشته‌اند و لذا، می‌توانند در یک مدل رگرسیون تخمین‌گر چندمتغیره به‌صورت معنی‌داری تغییرات سالانه سطح ایستابی را برآورد کنند. قبل از اجرای مدل رگرسیون تخمین‌گر، از نرمال بودن توزیع سری زمانی متغیرهای مورد استفاده بر اساس آزمون کلموگروف-اسمیرنوف اطمینان حاصل شد. لذا، بر اساس سه فاکتور اقلیمی مذکور یک مدل رگرسیونی تخمین‌گر سه متغیره توسعه داده شده که در جدول ۴، ارائه شده است.

میانگین دمای سالانه نیز با همبستگی مستقیم ۰/۵۶ با سری زمانی سالانه سطح ایستابی دشت مذکور، ارائه کرده است که بر اساس آماره معنی‌داری، هر سه متغیر اقلیمی در سطح اطمینان ۰/۹۵ ($P_value=0.05$) همبستگی معنی‌داری با سطح ایستابی دشت برخوردار داشته‌اند. آنالیز همبستگی نشان داد که سه فاکتور اقلیمی دما، بارش و تبخیر و تعرق تورنت وایت، همبستگی

جدول ۴- ماتریس همبستگی پیرسون بین داده‌های سری زمانی سطح ایستابی و عناصر اقلیمی و مدل تخمین‌گر چند متغیره

| | | همبستگی | معنی‌داری | | |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------|---------------------------------------------------------|
| توسعه مدل رگرسیون چند متغیره | آنالیز همبستگی پیرسون در سطح اطمینان ۰/۹۵ ($P_value=0.05$) | بارش سالانه (میلی‌متر) | -۰/۷۶ | ۰۰/۰۰ | پراکنش نگار |
| | | میانگین دمای سالانه (سلسیوس) | ۰/۵۶ | ۰۰/۰۰ | سطح ایستابی (متر) |
| | | تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر) | -۰/۷۰ | ۰۰/۰ | سطح ایستابی (متر) |
| | اجزای مدل بارودرگر | ضرایب خام | T-Value | P_value | تحلیل معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۹۵ ($P_value=0.05$) |
| | β | 1577.4 | 226.0 | 5E-37 | معنی‌داری ضریب ثابت |
| | دما | -0.562 | -4.6 | 1E-04 | تخمین‌گر معنی‌دار |
| | بارش | 0.013 | 1.3 | 2E-01 | عدم معنی‌داری |
| | تبخیر و تعرق | -0.01 | -3.8 | 1E-03 | تخمین‌گر معنی‌دار |
| | اعتبارسنجی مدل چند متغیره | | Adjusted R Square=۰/۷۵ | | R Square=۰/۷۸ |



نقش معنی‌داری در این ترکیب خطی در برآورد سطح ایستابی ایفا نکرده است.

برای شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 سه عنصر اقلیمی دما میانگین ماهانه، بارش ماهانه در دو سناریوی A₂ و A1B استخراج شده و با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری Lars-WG برای ایستگاه میمه ریزمقیاس شد. در نهایت، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل مجدداً با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده برای دوره ۲۰۸-۲۰۹۹ محاسبه شد (جدول ۵).

بر اساس این مدل تخمین‌گر چند متغیره، در یک ترکیب خطی سه متغیره، سه فاکتور اقلیمی دما میانگین سالانه، مجموع بارش سالانه و مجموع تبخیر و تعرق بالقوه سالانه توانسته‌اند، ۰/۷۵ درصد از تغییرات سالانه سری زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه را مدل‌سازی کنند ($Adjusted R^2 = 0.75$). نتایج حاصل از دو آماره P-value و T-value مدل که در جدول ۴، ارائه شده است، این بود که دو متغیر اقلیمی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌صورت معنی‌داری در مدل‌سازی سطح ایستابی ایفای نقش کرده‌اند. اما تخمین‌گر دمای سالانه،

جدول ۵- داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای انتشار و دوره پایه

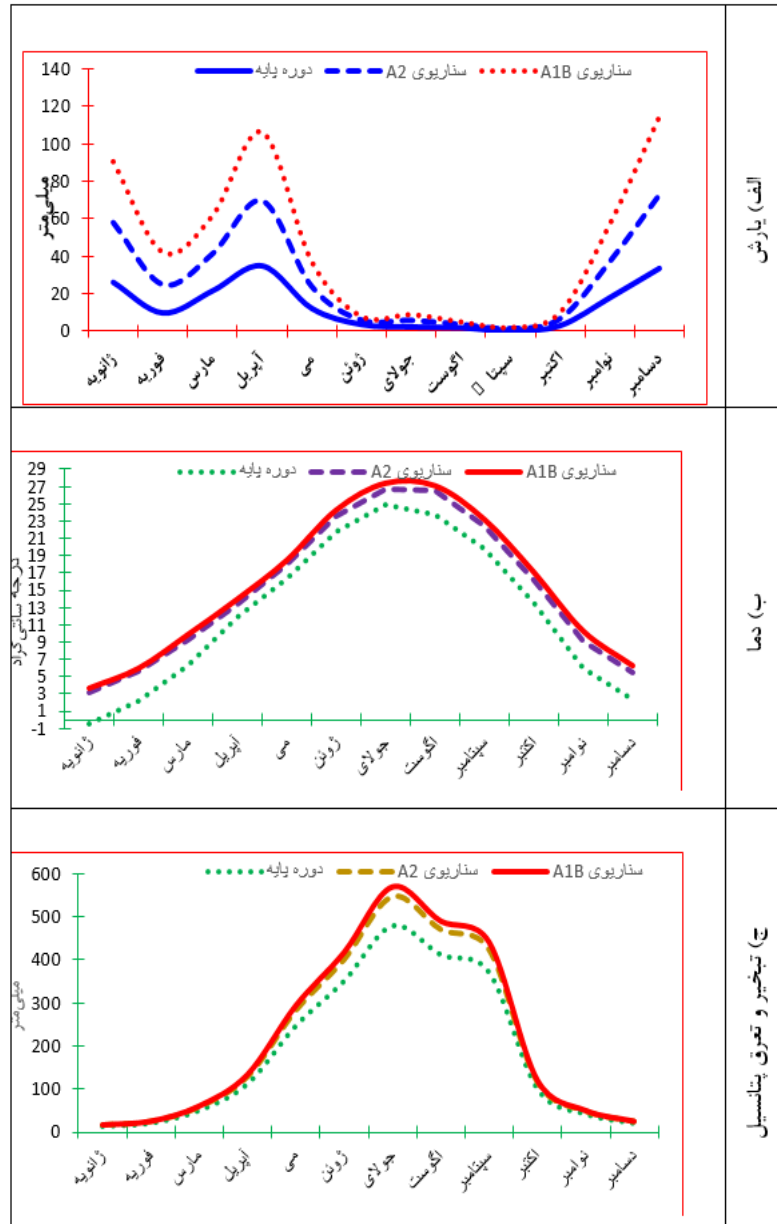
| ماه | دوره پایه | | | سناریوی A ₂ | | | سناریوی A1B | | |
|---------|-----------------|------------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| | بارش (میلی‌متر) | دما (سانتی‌گراد) | تبخیر و تعرق (میلی‌متر) | بارش (میلی‌متر) | دما (سانتی‌گراد) | تبخیر و تعرق (میلی‌متر) | بارش (میلی‌متر) | دما (سانتی‌گراد) | تبخیر و تعرق (میلی‌متر) |
| ژانویه | ۲۶ | -۱ | ۱۴ | ۳۲ | ۳ | ۱۶ | ۳۲ | ۴ | ۱۷ |
| فوریه | ۱۰ | ۲ | ۲۱ | ۱۵ | ۶ | ۲۴ | ۱۷ | ۶ | ۲۵ |
| مارس | ۲۱ | ۶ | ۵۱ | ۲۰ | ۹ | ۵۸ | ۲۰ | ۱۰ | ۶۰ |
| آوریل | ۳۵ | ۱۲ | ۱۱۲ | ۳۵ | ۱۳ | ۱۲۸ | ۳۶ | ۱۴ | ۱۳۴ |
| می | ۱۲ | ۱۶ | ۲۴۷ | ۱۲ | ۱۸ | ۲۸۲ | ۱۳ | ۱۸ | ۲۹۴ |
| ژوئن | ۳ | ۲۲ | ۳۵۱ | ۲ | ۲۴ | ۴۰۰ | ۲ | ۲۴ | ۴۱۸ |
| جولای | ۲ | ۲۵ | ۴۷۹ | ۳ | ۲۷ | ۵۴۳ | ۳ | ۲۷ | ۵۷۰ |
| اگوست | ۲ | ۲۴ | ۴۱۲ | ۲ | ۲۷ | ۴۷۰ | ۲ | ۲۷ | ۴۹۰ |
| سپتامبر | ۰ | ۲۰ | ۳۷۱ | ۱ | ۲۲ | ۴۲۳ | ۱ | ۲۳ | ۴۴۱ |
| اکتبر | ۳ | ۱۴ | ۱۰۱ | ۴ | ۱۶ | ۱۱۵ | ۳ | ۱۷ | ۱۲۰ |
| نوامبر | ۱۸ | ۶ | ۴۲ | ۲۰ | ۹ | ۴۸ | ۲۰ | ۱۰ | ۵۰ |
| دسامبر | ۳۳ | ۲ | ۲۱ | ۴۰ | ۵ | ۲۴ | ۴۱ | ۶ | ۲۵ |
| سالانه | ۱۶۴ | ۱۲ | ۲۲۲۲ | ۱۸۶ | ۱۵ | ۲۵۳۳ | ۱۹۱ | ۱۶ | ۲۶۴۴ |

دو سناریو عنصر بارش در دوره تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. در کنار این عنصر دو عنصر اقلیمی دما، و نیز تبخیر و تعرق پتانسیل نیز افزایش داشته‌اند. میانگین بارش سالانه در دوره پایه،

در نمودارهای شکل ۵، توزیع ماهانه هرکدام از عناصر اقلیمی برای دوره پایه و دوره تغییر اقلیم یعنی سال ۲۰۸۰-۲۰۹۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودارها (شکل ۵ و جدول ۳) مشاهده می‌شود، در هر

سانتی‌گراد بوده است. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل نیز در دوره پایه برابر ۲۲۲۲ میلی‌متر در سال بوده است که در دوره تغییر اقلیم (۲۰۸۰-۲۰۹۹)، در دو سناریوی مذکور به ترتیب به ۲۵۳۳ و ۲۶۴۴ میلی‌متر در سال رسیده است.

۱۶۴ میلی‌متر بوده است که در دوره تغییر اقلیم در سناریوی A2 به ۱۸۶ و در سناریوی A1B به ۱۹۱ میلی‌متر رسیده است، میانگین دمای سالانه نیز در دوره پایه برابر ۱۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. در حالی که، در دو سناریوی مذکور به ترتیب برابر ۱۵ و ۱۶ درجه



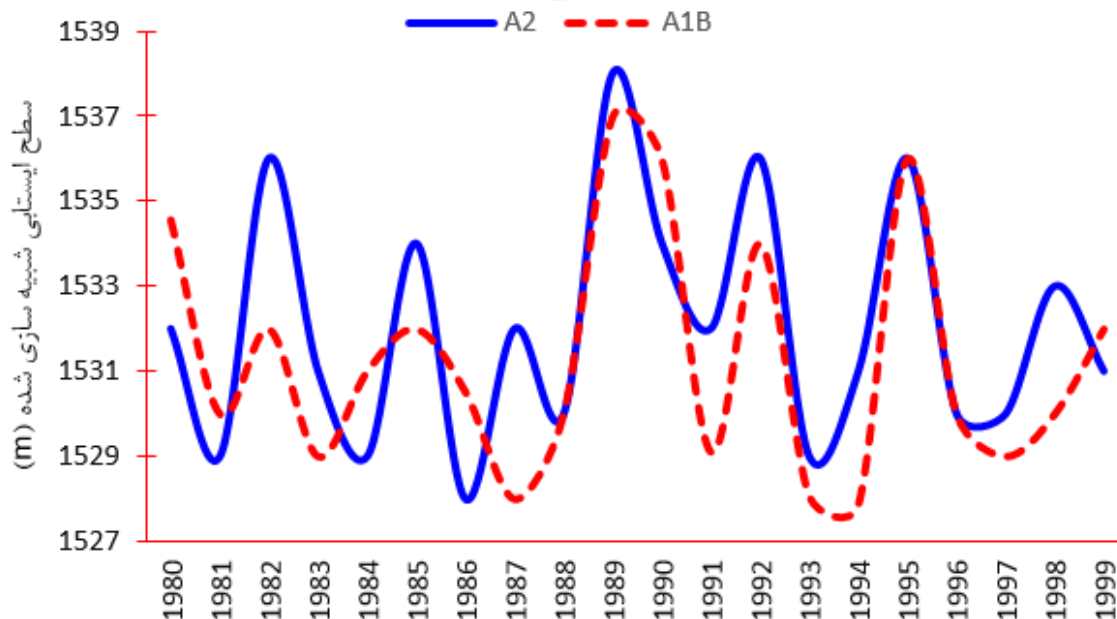
شکل ۵- عناصر اقلیمی شبیه‌سازی شده در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ با استفاده از مدل HadCM3

در اقلیم دوره پایه، حال برای عناصر اقلیمی دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ مجدداً تنظیم و اجرا شد که بر اساس آن،

بعد از شبیه‌سازی فاکتورهای اقلیمی دوره تغییر اقلیم (۲۰۸۰-۲۰۹۹)، مدل رگرسیونی توسعه داده شده

۲۰۸۰-۲۰۹۹، علی‌رغم این‌که دارای ضریب تغییرپذیری سالانه بالایی بوده است، اما روند صعودی یا نزولی خاصی نداشته است.

سطح ایستابی آب زیرزمینی در دو سناریوی A₁B و A₂ برای دوره آماری ۲۰۸۰-۲۰۹۹ مدل‌سازی انجام شد. همان‌طور که در روندنگار مشاهده می‌شود، به‌طور کلی، سطح ایستابی سالانه دشت برخوار طی دوره آماری



شکل ۶- روند سری زمانی سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت برخوار تحت دو سناریوی A₁B و A₂

۱۵۳۵ و در سناریوی A₁B به ۱۵۳۳ متر رسیده است. بنابراین، در دوره تغییر اقلیم در هر دو سناریو سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار بر اساس خروجی مدل گردش عمومی HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری Lars-WG کاهش بین ۱۵ تا ۱۷ متر نشان داده است.

در جدول ۶، میانگین سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار در دوره پایه و دوره تغییر اقلیم (۲۰۸۰-۲۰۹۹)، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح ایستابی دشت مورد بررسی در دوره پایه برابر ۱۵۵۰ متر بوده است. در حالی‌که در دوره تغییر اقلیم در سناریوی A₂ سطح ایستابی دشت برخوار به

جدول ۶- ویژگی‌های آماری عناصر اقلیمی و سطح ایستابی شبیه‌سازی شده برای دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹

| سناریوی A ₁ B | سناریوی A ₂ | دوره پایه | |
|--------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------------------|
| ۱۶ | ۱۵ | ۱۲ | میانگین دمای سالانه (سانتی‌گراد) |
| ۱۹۱ | ۱۸۶ | ۱۶۴ | مجموع بارش سالانه (میلی‌متر) |
| ۲۶۴۴ | ۲۵۳۳ | ۲۲۲۲ | مجموع سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر) |
| ۱۵۳۳ | ۱۵۳۵ | ۱۵۵۰ | میانگین فضایی سطح ایستابی (متر) |
| ۱/۲ | ۱/۴ | ۱ | انحراف معیار فضایی سطح ایستابی (متر) |

نتیجه گیری

امروزه تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در کل جهان به شمار می‌روند. تغییر اقلیم نه تنها مقادیر آب در دسترس قابل استفاده برای مصارف مختلف جوامع بشری از قبیل کشاورزی، شرب، صنعت را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه الگوهای مصرف آب را نیز تحت تاثیر قرار خواهد داد. در محدوده آبخوان مورد مطالعه، با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی بیش از پنج متر است، تبخیر از سطح آبخوان صورت نمی‌گیرد. تغییر در ذخیره آبخوان از مجموع حاصل ضرب تغییرات درازمدت سطح تراز ایستابی در متوسط ضریب ذخیره و مساحت آبخوان به دست می‌آید. متوسط کاهش سطح تراز آبخوان حدود ۰/۴۶ متر در سال است و متوسط ضریب ذخیره برابر ۱۱ درصد است و لذا، با توجه به مساحت آبخوان، تغییرات حجم ذخیره یا همان بیلان منفی آبخوان تقریباً ۸۱ میلیون مترمکعب در سال است. در این مطالعه، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت برخوار اصفهان که بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در سال ۱۳۹۵ تعداد ۵۴۳۷ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق در آن به صورت فعال و نیمه‌فعال وجود دارد، یکی از دشت‌های کشاورزی استان اصفهان است که از لحاظ سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دچار افت محسوسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی سطح ایستابی دشت طی دوره ۱۳۹۵-۱۳۷۰ نشان داد که سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در این دشت به صورت معنی‌داری با شیب ۴۷ سانتی‌متر در سال روند نزولی داشته است. شبیه‌سازی شرایط اقلیمی دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹، با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 و ریزمقیاس‌نمایی مدل آماری

Lars-WG بیانگر آن است که سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت برخوار در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ به‌طور متوسط در سناریوهای A₁B و A₂ علی‌رغم افزایش بارش، حدود ۱۵ تا ۱۷ متر افت خواهد داشت. افت سطح ایستابی آب منطقه علی‌رغم، افزایش بارش می‌تواند به دلیل افزایش دما باشد که ظرفیت تبخیر و تعرق پتانسیل را به شدت افزایش خواهد داد. با توجه به اینکه ساختار اقتصادی این دشت کشاورزی بوده و استفاده اصلی آب زیرزمینی برای مصرف کشاورزی است، لذا افزایش تبخیر و تعرق به واسطه افزایش دما (بین سه تا چهار درجه سانتی‌گراد در دو سناریوی مذکور) می‌تواند میزان آب مورد نیاز گیاه را به شدت افزایش داده (افزایش تعرق) و علاوه بر آن، میزان بارش موثر (نسبتی از بارش که تبخیر نمی‌شود) را به شدت کاهش دهد و به این‌صورت بارشی که صرف تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌شود، بسیار محدود خواهد بود. به این‌صورت، افزایش تبخیر و تعرق در دوره تغییر اقلیم نه تنها تاثیر افزایش بارش را در شارژ منابع آب زیرزمینی دشت برخوار خنثی کرده است، بلکه حتی باعث افت ۱۵ تا ۱۷ متری سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی منطقه نیز شده است. نتایج مطالعه حاضر، با نتایج Goodarzi و Mortazavizadeh (۲۰۲۰) هم‌خوانی دارد. در پژوهش مذکور، افت سطح تراز آب در حد حدود ۱۷ متر اثبات شده است. همچنین، این یافته‌ها با نتایج پژوهش Alavinia و همکاران (۲۰۲۲) در یک راستا بوده، به عبارت دیگر، تغییر اقلیم موجب افت سطح سفره آب زیرزمینی شده است و نیز با نتایج مطالعات Ghafari و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد و با فرض ثابت بودن مصارف، افت سفره ناشی از کاهش بارش است.

منابع مورد استفاده

1. Rezaee Zaman, M., S. Morid and M. Delavar. 2013. Assessment of climate change impacts on hydroclimatic variables in Siminehrud Basin. *Journal of Water and Soil*, 27(6): 1247-1259.
2. Jalili, Kh., H. Moradi and O. Bozorg Hadad. 2016. Study on climate change impacts on ground water resources in Eslamabad Plain in order to level allocation optimization. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 11(5): 117-131.
3. Mohamadi Qalenei, M., K. Ebrahimi and Sh. Araqinejad. 2012. Assessing climatic factors impacts on groundwater resources deficit, a case study on Saveh Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(4):189-203.

4. IPCC. 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, USA, 10 Pages.
5. Sen, P. 1966. Estimate of the regression coefficients based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.
6. Rahmani, M., M. Jami Alahmadi, A. Shahidi and M. Hadizade Azghadi. 2015. Effects of climate change on length of growth stages and water requirement of wheat and barley, case study: Cirjand Plain. *Journal of Agriculture*, 7(4):1-16.
7. Mann, H. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13: 245-259.
8. Kendall, M. 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin, London, 272 pages.
9. Chen H., C.Y. Xu and S. Guo. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434-435: 36-45.
10. Artlert, K., C. Chaleeraktragoon and V.T.V. Nguyen. 2013. Modeling and analysis of rainfall processes in the context of climate change for Mekong, Chi, and Mun River Basins (Thailand). *Journal of Hydro-Environment Research*, 7(1): 2-17
11. Sefenler, A., W. Gossel and P. Wycisk. 2015. Groundwater management options in an arid environment: The Nubian Sandstone Aquifer System, Eastern Sahara. *Journal of Arid Environments*, 122: 46-58.
12. Shrestha, S., T.V. Bach and V.P. Pandey. 2016. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61: 1-13
13. Rezaei Banafsheh, M., T. Jalali Ansaroodi, M. Zarghami and A. Asghari Moghaddam. 2015. Investigate of climate change impacts on groundwater level in Tasuj Basin by statistical downscaling method. *Iran-Water Resources Research*, 11: 106-116.
14. Goodarzi, M. and F. Mortazavizadeh. 2020. Assessing climate change impacts on groundwater fluctuations using RCP scenarios. *Journal of Ecohydrology*, 7(3): 801-814.
15. Goodarzi, M., S.A. Hosseini and E. Mesgari. 2015. Climate models. Azar Kelk Publications, Zanjan, Iran, 271 pages.
16. Goodarzi, M., B. Shirohamadi and Z. Nejati Jahromi. 2018. Modeling with GMS. Salam Sepahan and Miras Kohan Publishing Center, Isfahan, Iran, 120 pages.
17. Leong Tan, M., A.B. Latiflbrahim, Z. Yusop, V. Chua and N. WengChan. 2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189: 1-10.
18. Lotfi, M., G.A. Kamali, A.H. Meshkatee and V. Varshavian. 2020. Study on the impact of climate change on evapotranspiration in west of Iran. *Arab Journal Geosciences*, 13(722): 1-13.
19. Dracup, J.A. and S. Vicuna. 2007. An overview of hydrology and water resources studies on climate change, the California experience. *World Water and Environmental Resources Congress*, Alaska, United States..
20. Taei Semiro, S., H. Moradi and M. Khodaghali. 2013. Evaluation change in Nayshabour Bar River flow under different climate change scenarios. *Human and Environment*, 12(2): 1-19.
21. Poormohamadi, S., M.T. Dastorani, H. Jafari, M.O.H. Rahimian, M. Goodarzi, Z. Mesmarian and F. Baqeri. 2015. Investigation of groundwater balance in Tuserkan Plain of Hmaedan using MODFLOW. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(4): 371-382.
22. Ghafari, S., H. Moradi and R. Modares. 2018. Comparison of temporal and spatial changes of groundwater level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan plains. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(1): 141-160.
23. Alavinia, S.H. and M. Zarei. 2022. Climate change trends analysis using by extreme indices of long-term rainfall and temperature in southeast of Iran. *Regional Planning*, 11(44): 119-134.
24. Choubin, B., F. Sajedi-Hosseini, A. Azareh and F. Soleimani-Sardoo. 2016. Assessment of climate change at 2055 horizon on groundwater resources in Kerman-Baghin Plain. *Desert Management*, 4(7): 1-11.
25. Zareian, M.J., S.S. Eslamian and H.R. Safavi. 2016. Investigating the effects of sustainability of climate change on the agriculture water consumption in the Zayandeh-Rud River Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 78(20): 113-128.
26. Kouhestani, N., M. Meftah Halghi, A.A. Dehghani and M.E. Yakhkeshi. 2009. A review on consumption management of surface and groundwater resources. *Proceedings of 2nd National Conference of Water, Behbahan, Iran*.

27. Karamouz, M., A. Abolpour and S. Nazif. 2011. Assessment of climate change impacts on groundwater resources: a case study in Rafsanjan Plain. Proceedings of 4th Conferences on Water Resources Management, Tehran, Iran.
28. Shahnourian, M.M., M. Hesam, Kh. Ghorbani and M. Zakerinia. 2012. Prediction of seasonal changes of climatic parameters in future two decades downscaling Hadcm3, a case study: Gorgan synoptic station. Proceedings of 3rd National Conference on Comprehensive Water Resources Management, Sari, Iran.
29. Ferreira, R.N., M.R. Nissenbaum and T.M. Rickenbach. 2018. Climate change effects on summertime precipitation organization in the southeast United States. *Atmospheric Research*, 214: 348-363.
30. Pulido-Velazquez, M., S. Peña-Haro, A. García-Prats, A.F. Mocholi-Almudever, L. Henríquez-Dole, H. Macian-Sorribes and A. Lopez-Nicolas. 2015. Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental System (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4): 1677-1693.
31. Kidmose, J., J.C. Refsgaard, L. Trolborg, L.P. Seaby and M.M. Escrivà. 2013. Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1619-1634.
32. Forouzandeh Shahraki, I. 2013. Assessing climate change impacts on groundwater resources, a case study in Ardabil Plain. MSc Thesis, University of Tabriz, 149 pages.

Assessing climate change impacts on groundwater fluctuation in Borkhar Plain, Isfahan

Babak Homayounpour¹, Massoud Goodarzi^{2*}, Gholamreza Zehtabian³, Baharak Motamedvaziri⁴ and Hasan Ahmadi⁵

¹ PhD student, Watershed Management Engineering, Faculty of Environment and Natural resources, Islamic Azad university, Science and Research Branch, Tehran, Iran ^{2*} Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), AREEO, Tehran, Iran ³ Professor, Faculty of Natural Resources, Tehran University, ⁴ Assistant Professor,, Department of Forest, Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran and ⁵ Retired Professor, Faculty of Natural Resources, Tehran University

Received: 10 January 2021

Accepted: 17 February 2021

Abstract

Nowadays, global climate change has been observed which had an impact on both surface and groundwater resources management. The main objective of this research is change detection of groundwater fluctuation caused by climate change in Borkhar Plain, Isfahan Province. In this way, both Mann-Kendal and Sen's slope non-parametric analysis were used using 19 piezometric wells data for the period of 1991-2019. Pearson correlation matrix along with correlation between climatic elements including temperature, precipitation and evapotranspiration (Thornwhite) with water table levels were determined. Based on this, a multivariate regression model was developed to model the annual time series at a confidence level of 0.95. Climatic factors of 2080-2099 period were simulated using the output of HadCM₃ model through Lars-WG downscaling model for Maymeh Station under two scenarios A₂ and A₁B and based on the developed regression model, the water level of Borkhar Plain was simulated. The results showed that in the base period, the water table in the study area has been decreased with an annual slope of 47 cm per year. Correlation analysis showed that the three climatic elements of precipitation, temperature and evapotranspiration in a linear composition modeled 0.75 of the annual groundwater changes in the plain. The results of the exponential microscale model implemented on HadCM₃ data showed that in the period 2080-2099 under both scenarios, the groundwater level of the region will decrease between 15 to 17 meters compared to the base period.

Keywords: Evapotranspiration, Maymeh, Precipitation, Trend analysis, Water table

* Corresponding author: mgoodarzi@scwmri.ac.ir