



مدیریت آب و آبادان

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۳۴۷-۳۶۸

DOI: 10.22059/jwim.2022.341590.982

مقاله پژوهشی:

بررسی و تحلیل اثر خشکسالی بر سفره‌های آب زیرزمینی در ایران (مطالعه موردی: دشت شهرکرد)

فرهاد بهزادی^۱, سامان جوادی^{۲*}, حسین یوسفی^۳, علی مریدی^۴, سید مهدی هاشمی شاهدانی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و اوریجان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و اوریجان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰ | تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

چکیده

آب زیرزمینی همواره یکی از بالرzesht ترین منابع آبی در هر منطقه بهشمار می‌رود و در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نظیر کشور ایران، اصلی‌ترین منبع جهت تأمین نیازهای شرب و کشاورزی محسوب می‌شود. در سالیان اخیر، با افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش پرداشت از آبخوانها و تغییرات اقلیمی، تراز آب زیرزمینی در بسیاری از آبخوانهای ایران همواره نزولی بوده و بسیاری از آبخوانهای کشور در شرایط خیم قرار دارند و این شرایط در بسیاری از آبخوانهای کشور ادامه‌دار بوده یا شرایط در حال بدترشدن است. در همین راستا همواره پاش منظم وضعیت آبخوانها از اهمیت بالایی برخوردار است و با اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب می‌توان از آسیب‌دیدن هرچه بیشتر آبخوانها جلوگیری کرد و همواره خسارت را کاهش داد. هدف این پژوهش تعیین خشکسالی‌های دوره آلتی و تعیین تأثیر آن بر آبخوان دشت شهرکرد می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 در ابتدا متغیرهای اقلیمی نظری براندگی و دما برای دوره آلتی شیوه‌سازی شده و وضعیت بارندگی در منطقه تا سال ۲۱۰۰ تعیین شده است. در ادامه با استفاده از مدل ANFIS، عمق آب زیرزمینی در پنج پیزومتر منتخب در سطح دشت تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی شده است. با توجه به نتایج این پژوهش، وضعیت آبخوان دشت شهرکرد تا سال ۲۰۵۰ تعیین شده و مشخص شده است در برخی از نقاط دشت شهرکرد، عمق آب زیرزمینی تا ۲۶ متر افزایش پیدا خواهد کرد. از این‌رو، با توجه به تغییرات محتمل در آینده‌ای نه چنان‌دور و به‌منظور جلوگیری از وخیم‌ترشدن شرایط و افزایش خسارت‌ها، باید تصمیم‌های مدیریتی مناسبی در این منطقه اتخاذ شود.

کلیدواژه‌ها: بارندگی، دما، ANFIS، GRI، SPI

Investigation and analysis the effect of drought on groundwater aquifers in Iran (Case study: Shahrekord plain)

Farhad Behzadi¹, Saman Javadi^{2*}, Hossein Yousefi³, Ali Moridi⁴, S. Mehdy Hashemy Shahdany²

1. M.Sc. Student of Water Resources, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Ph.D. Student of Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Received: April 13, 2022

Accepted: July 01, 2022

Abstract

Groundwater is the most valuable water resources in any region and in many arid and semi-arid regions of the world, such as Iran, is the main source for drinking and agricultural needs. In recent years, with the increase in population and as a result of increasing withdrawals from aquifers and climate change, many of aquifers are in poor condition, and these conditions continue or are deteriorating. In this regard, regular monitoring of aquifers is always very important and by making appropriate management decisions, it is possible to prevent more damage to aquifers and reduce the damage. The purpose of this study is to determine the droughts of the future and to determine its impact on the aquifer of Shahrekord plain. In this study, using the output of CMIP6 models, climatic variables such as rainfall and temperature for the next period are simulated and the rainfall situation in the region until 2100 has been determined. Then, using the ANFIS model, groundwater depth in five selected piezometers in the plain is predicted by 2050. According to the results of this study, the aquifer condition of Shahrekord plain has been determined by 2050 and it has been determined that in some parts of Shahrekord plain, the groundwater depth will increase to 26 meters. Due to possible changes in the future in order to prevent the situation from deteriorating and increasing the damage, appropriate management decisions must be made in this regard.

Keywords: ANFIS, GRI, Precipitation, SPI, Temperature.

مقدمه

برد. معمولاً خشکسالی با ویژگی‌هایی نظیر شدت، مدت و فراوانی بیان می‌شود. خشکسالی یکی از بزرگترین بلایای طبیعی است که خسارت‌های هنگفتی را به همراه دارد. خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که متغیرهای هیدرولوکلیماتیکی نظیر بارش، منابع آب در دسترس، رطوبت خاک و سایر متغیرهای مرتبط، در یک دوره معین کمتر از میزان نرمال آن باشند (Javadinejad *et al.*, 2019). پژوهش‌های گسترده‌ای در سراسر ایران و جهان به منظور تعیین خشکسالی آب زیرزمینی صورت گرفته است. Khosravi *et al.* (2017)، به منظور پیش‌بینی خشکسالی آب زیرزمینی در دشت شهرکرد، از شاخص GRI در مقیاس زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه و مدل زنجیره مارکوف بهره گرفته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد طولانی‌ترین دوره خشکسالی در دشت شهرکرد از مردادماه ۱۳۸۷ شروع شده و تا انتهای دوره ۱۳۹۴ ادامه می‌یابد. Ahmadi Akhormeh *et al.* (2015)، به منظور بررسی مکانی و زمانی دقیق خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان محدوده مطالعاتی مروودشت خرامه، از شاخص GRI استفاده کرده‌اند. Roshun *et al.* (2018) در راستای بررسی تغییرات زمانی خشکسالی آب زیرزمینی در دشت ساری-نکا در مقیاس زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه از شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی بهره گرفته‌اند. Javadinejad *et al.* (2020)، با استفاده از شاخص‌های GRI، SPI و SWI ازوع خشکسالی را در آبخوان اصفهان-برخوار را تا سال ۲۰۴۰ مورد بررسی قرار داده‌اند. Schreiner-McGraw & Ajami (2021)، با استفاده از یادگیری ماشین تأثیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی آب زیرزمینی در منطقه‌ای فاقد مدیریت فعال آبخوان را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با وقوع خشکسالی‌های چندساله، به طور متوسط سه سال طول خواهد کشید تا ذخیره ازدست‌رفته آبخوان

سفره‌های آب زیرزمینی به عنوان منابع حیاتی تأمین آب آشامیدنی جهان محسوب می‌شوند و نقشی اساسی در پایداری کشاورزی آبی در یک منطقه دارند. هم‌چنین این منابع در مناطقی که از منابع آب سطحی مناسبی برخوردار نیستند، اصلی‌ترین منبع تأمین نیازهای شرب و صنعت محسوب می‌شوند. در سالیان اخیر، با افزایش جمعیت، افزایش نیاز آبی، ظهور تغییرات اقلیمی و ...، فشار بر آبخوان‌ها به طرز چشم‌گیری افزایش یافته است. در نتیجه، سامانه‌های آب زیرزمینی با سرعت بسیار بالایی در حال تخلیه می‌باشند و سفره‌های آب زیرزمینی از شرایط نامناسبی برخوردار هستند. اگرچه برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی اصلی‌ترین دلیل کاهش کیفیت و کمیت این منابع می‌باشد، اما پژوهش‌های گسترده در سطح جهانی و کشور نشان داده است تغییرات اقلیمی وضعیت را در آینده بدتر خواهد کرد. تغییر اقلیم با افزایش گازهای گلخانه‌ای ظاهر می‌شود و منجر به تغییرات قابل توجهی در سامانه هیدرولوژیکی منابع آب جهان می‌شود (Gerten & Lucht, 2008). طبق گزارش‌های هیأت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، تغییر اقلیم سبب تغییرات گسترده‌ای در دما، بارش، تبخیر و تعریق و ... در یک منطقه می‌شود که به طور به طور قابل توجهی تأثیرات مستقیمی بر جنبه‌های اجتماعی-اقتصادی، زیست محیطی و کشاورزی می‌گذارد (Brêda *et al.*, 2020). بررسی‌ها نشان داده است یکی از معضلات به وجود آمده به واسطه تغییر اقلیم، خشکسالی است. خشکسالی یک حادثه طبیعی است که به طور فراوان در سراسر جهان رخ می‌دهد، اما مدیریت آن به سرعت مدیریت سایر پدیده‌ها نظیر سیل، طوفان و حتی زلزله نمی‌باشد و کاهش شدت اثرات آن نیز به مرور صورت می‌گیرد و نمی‌توان با سرعت بالا آثار مخرب آن را از بین

مدیریت آب و آسیاری

دوره ۱۴۰۱ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحل شرق چین موردنرسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نتایج هر دو مدل از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند و Saeedi (2021) نتایج هر دو مدل از مدل ANN برتر می‌باشد. Razavi *et al.* (2021)، بهمنظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دشت عجب‌شیر از مدل منطق فازی و شبکه عصبی طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۵ استفاده کرده‌اند. در این پژوهش پارامترهای بارندگی، دما، دبی جریان و تراز سطح ایستابی در دوره زمانی قبل به عنوان ورودی و تراز سطح ایستابی در در دوره موردنظر به عنوان خروجی مدل در مقیاس ماهانه انتخاب شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مدل منطق فازی می‌تواند تراز سطح ایستابی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید.

در این پژوهش بهمنظور تعیین خشکسالی‌های آینده در منطقه دشت شهرکرد، از مدل‌های اقلیمی بهمنظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و از شاخص‌های بارش استانداردشده (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) بهمنظور پایش خشکسالی در دوره آینده این منطقه استفاده شده است. در ادامه بهمنظور پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی در منطقه از مدل ANFIS استفاده شده است. در پایان این پژوهش، تغییرات بارندگی در دشت شهرکرد طی دو دوره نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۲) و دوره دور (۲۱۰۰-۲۰۵۱)، تغییرات عمق آب زیرزمینی طی دوره نزدیک (۲۰۵۱-۲۰۲۲) و وضعیت خشکسالی هواشناسی تا سال ۲۱۰۰ تعیین می‌شود.

مواد و روش‌ها

شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI)

با توجه به نقش پر اهمیت بارش در تعادل منابع آب، شاخص بارش استانداردشده (SPI) بهمنظور پایش وضعیت خشکسالی توسعه داده شد (McKee *et al.*, 1982).

جبران شود. این مدت می‌تواند با توجه به دوره زمانی خشکسالی و شدت خشکسالی حتی تا ۱۵ سال افزایش یابد. Hassan *et al.* (2020)، بهمنظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آبخوان Umm Er Rahuma در غرب صحرای عراق، از برونداد مدل CanESM2 و دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۹۹، طبق دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، بارندگی به ترتیب $\frac{9}{2}$ و $\frac{14}{1}$ درصد کاهش خواهد یافت و تغذیه آبخوان طی همین دوره و دو سناریوی نامبرده شده به ترتیب $\frac{13}{6}$ و $\frac{21}{2}$ درصد کاهش CSIRO (2021)، با استفاده از مدل MODFLOW و MK 6-CM پنجاب در هند که منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک محاسب می‌شود، موردنرسی قرار داده‌اند. در این پژوهش از دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بهمنظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی تا سال ۲۱۰۰ استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تغییر اقلیم اثر نامطلوبی بر آبخوان مدنظر خواهد داشت. طبق دو سناریوی نامبرده شده و تحت دو شرایط تعریف شده A و B، تراز آب زیرزمینی در این آبخوان به ترتیب $\frac{4}{3}$ و $\frac{57}{5}$ متر کاهش خواهد یافت. Emamgholizadeh *et al.* (2014)، با توجه به اهمیت تراز آب زیرزمینی در مدیریت آبخوان بسطام، پتانسیل دو مدل هوشمند شبکه عصبی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) را در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت بسطام موردنرسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هر دو مدل ANN و ANFIS دارای عملکرد مناسبی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی هستند، اما مدل ANFIS با خطای کمتر و دقت بالاتر دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل ANN می‌باشد. Wen *et al.* (2015)، عملکرد مدل تلفیقی موجک-فازی (WANFIS) و ANFIS را در پیش‌بینی نوسانات هفتگی

$$H(x) = b + (1 - b)G(x) \quad (رابطه ۵)$$

محاسبه این شاخص با برازش و برآورد پارامترهای تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی کل برای یک ایستگاه می‌باشد. پس از محاسبه احتمال تجمعی، تغییر شکل تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک اعمال می‌شود (McKee *et al.*, 1993).

$$SPI = z = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (رابطه ۶)$$

در رابطه (۶)، \bar{P} میانگین بارش در ماه، σ انحراف معیار و P_i مقدار بارش در گام زمانی یا ماه است. این شاخص در هر مقیاس زمانی قابل محاسبه است (Hayes *et al.*, 1999).

جدول (۱) طبقه‌بندی شاخص SPI را نشان می‌دهد.

Table 1. SPI and GRI classification

GRI value	SPI value	Class
≤ -2	≥ 2	Extremely wet
-1.99 to -1.5	1.5 to 1.99	Very wet
-1.49 to -1	1 to 1.49	Moderately wet
-0.99 to 0.99	-0.99 to 0.99	Near normal
1 to 1.49	-1.49 to -1	Moderately dry
1.5 to 1.99	-1.99 to -1.5	Severely dry
≥ 2	≤ -2	Extremely dry

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

شاخص (GRI) به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شده است. مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه (۷) تعیین می‌شود (Bloomfield & Marchant 2013).

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{y,m}}{\sigma_{y,m}} \quad (رابطه ۷)$$

که در آن، $D_{y,m}$ ارزش سطح ایستابی آب در ماه m و سال y ، $\mu_{y,m}$ میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال و $\sigma_{y,m}$ انحراف از معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال می‌باشد. طبقه‌بندی شاخص GRI نیز مانند شاخص SPI است و می‌توان از جدول (۱) برای طبقه‌بندی این شاخص استفاده کرد.

(۱۹۹۳). در این پژوهش برای تعیین این شاخص، ابتدا توزیع احتمال گاما به داده‌های برازش داده می‌شود، سپس تابع توزیع تجمعی از طریق احتمالات برابر به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. درنهایت، داده‌های تبدیل شده به توزیع نرمال برای محاسبه مقادیر SPI استفاده می‌شود.

مقادیر z (معادله ۶) که از سری زمانی نرمال استاندارد داده‌ها به دست می‌آید، همان شاخص SPI است

(Guenang & Mkankam Kamga, 2014).

مقادیر مثبت SPI بیشتر از میزان متوسط بارندگی و مقادیر منفی کمتر از آن هستند. رابطه (۱) تابع توزیع چگالی احتمال گاما را نشان می‌دهد (Guenang & Mkankam Kamga, 2014):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0 \quad (رابطه ۱)$$

که در آن، α پارامتر شکل پذیری و β پارامتر مقیاس‌پذیری است و هر دو بزرگ‌تر از صفر هستند و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002) می‌باشد. به منظور برازش پارامترهای شکل پذیری و Maximum likelihood (ML) مقیاس‌پذیری از تخمین (ML) استفاده شده است که مطابق روابط (۲) و (۳) می‌باشد:

(Guenang & Mkankam Kamga, 2014)

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (رابطه ۲)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - n^{-1} \sum \ln(x) \quad (رابطه ۳)$$

با توجه به روابط (۱)، (۲) و (۳)، تابع احتمال تجمعی گاما به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود. توزیع گاما برای $x=0$ تعریف نشده است، لذا با مشیت درنظرگرفتن احتمال بارش صفر ($b=p(x=0)$)، تابع احتمال تجمعی با رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Guenang & Mkankam Kamga, 2014).

$$g(x) = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (رابطه ۴)$$

ابزاری کارآمد به شمار می‌رود. در این میان شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند ابزاری به دلیل قابلیت آموزش پذیری و با استفاده از الگوهای مختلفی آموزشی می‌تواند ارتباط مناسبی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد نماید. لذا استفاده ترکیبی از سیستم استنتاج فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند ابزار قدرتمندی را تحت عنوان سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی به وجود آورد. در این روش ترکیبی، بخش فازی، رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را ایجاد کرده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به وسیله شبکه عصبی بهینه می‌شود. در سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی ابتدا ساختار یک مدل با پارامترهای مشخص که متناسب ورودی‌ها، درجه عضویت و قوانین است، انتخاب می‌شود. سپس بخشی از داده‌های موجود که در برگیرنده تمامی خصوصیات داده‌ها (بیشینه و کمینه) باشد، انتخاب شده و در مرحله آموزش با حداقل کردن میزان خطا، پارامترهای مدل به مقادیر واقعی نزدیک می‌شود. پس از آموزش سیستم و انتخاب پارامترهای مناسب، نیاز به بررسی صحت‌سننجی مدل است. از رو بخشی از داده‌ها که در مرحله آموزش به کار نرفته است، به عنوان ورودی در مرحله صحت‌سننجی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از ANFIS دقت و اعتبار مدل اطمینان حاصل شود. مدل ANFIS غالباً با استفاده از یک سیستم فازی تاکاجی-سوگنو به صورت ساختار شبکه‌ای پیش‌رونده و دارای پنج لایه است. به عنوان نمونه یک مدل ANFIS مرتبه اول سوگنو با دو ورودی، یک خروجی و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱) فرض شده است که سیستم فازی دارای ورودی α و β و یک خروجی با نام f است. برای چنین مدلی می‌توان قوانین معمولی را با درنظرگرفتن دو قانون فازی اگر-آنگاه به صورت زیر تعریف کرد:

شاخص‌های آماری

به منظور بررسی دقیق نتایج مدل‌های GCM و ANFIS در پیش‌بینی متغیرها، از پنج معیار آماری شامل میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، آماره اریب (BIAS) و نمایه IA جهت انتخاب مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین مدل به داده‌های واقعی کشور استفاده شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N P_i O_i}{\sum_{i=1}^N P_i^2 \sum_{i=1}^N O_i^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| ||O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

ANFIS مدل

به طور کلی برای پیش‌بینی رفتار پدیده‌های هیدرولوژیکی که بیشتر قوانین احتمالات بر آن‌ها حاکم است، در اکثر موارد متغیرها به صورت سری زمانی در نظر گرفته شده و روند تجزیه و تحلیل به گونه‌ای است، که از اطلاعات گذشته سری در جهت ایجاد الگو یا مدل پیش‌بینی‌کننده سری زمانی آینده بهره‌گیری می‌شود. در همین راستا در این پژوهش از ساختار شبکه عصبی فازی تطبیقی استفاده شده است. یک سیستم فازی، سیستمی منطبق بر قواعد اگر-آنگاه است که با تئوری‌های احتمال کلاسیک قابل تحلیل نیست. نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی، به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی است. بنابراین، داشتن روشی که با استفاده از آن بتوان اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد را تعیین کرد به عنوان

متر در ارتفاعات آن می‌باشد. مسیل‌های واقع در این محدوده دائمی بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه جهان‌بین تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین رودخانه در این محدوده رودخانه آب جهان‌بین (خررود) بوده که یکی از شاخه‌های مهم رودخانه کیار می‌باشد. از ۵۴ کیلومترمربع از وسعت محدوده دشت، ۳۷۵/۲ کیلومترمربع را آبخوان آبرفتی تشکیل می‌دهد. این دشت دارای ۴۱۷ حلقه چاه کشاورزی، ۵۹ حلقه چاه آب شرب، ۱۵۹ حلقه چاه آب صنعتی، ۷۹ رشتہ قنات، ۴۰ دنه چشم‌فعال و ۳۴ حلقه چاه مشاهده‌ای می‌باشد، که برای تدوین این گزارش از داده‌های ماهانه عمق آب زیرزمینی پیزومترهای منطقه با دوره مشترک استفاده شده است. دشت شهرکرد در سال‌های اخیر با خشکسالی‌های پی‌درپی و شدید مواجه بوده است که باعث ایجاد خسارت به بخش‌های مختلف شده است. این خشکسالی‌ها باعث کاهش منابع آب سطحی و به‌دلیل آن افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شده است. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و پیزومترهای مورداستفاده در این پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.

Rule1: If α is A_1 and β is B_1 then $f_1 = p_1\alpha + q_1\beta + r_1$
Rule2: If α is A_2 and β is B_2 then $f_2 = p_2\alpha + q_2\beta + r_2$

که متغیرهای A_1 و B_1 و A_2 و B_2 به ترتیب توابع p_1 ، r_1 ، p_2 و q_2 پارامترهای تابع خروجی هستند. بنابراین در حالت، فرمول‌بندی ANFIS از یک آرایش شبکه عصبی پنج لایه پیش‌رو پیروی می‌کند.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی شهرکرد یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۴۴ کیلومترمربع می‌باشد که در قسمت شرق حوضه و شمال استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. این محدوده تحت پوشش سازمان آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری قرار دارد. میزان ۵۴۱ کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات و ۷۰۳ کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. دشت شهرکرد بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه قرار دارد. ارتفاع این دشت از سطح آزاد دریا بین حداقل ۳۲۶۰ متر در بخش‌های خروجی حوضه و حداقل ۱۹۹۶

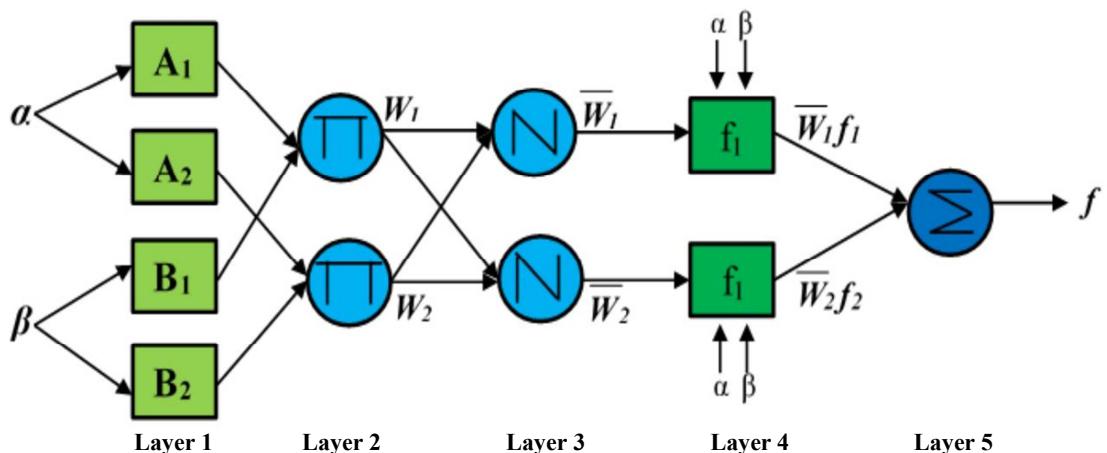


Figure 1. ANFIS structure derived from two inputs-one output first-order Sugeno FIS

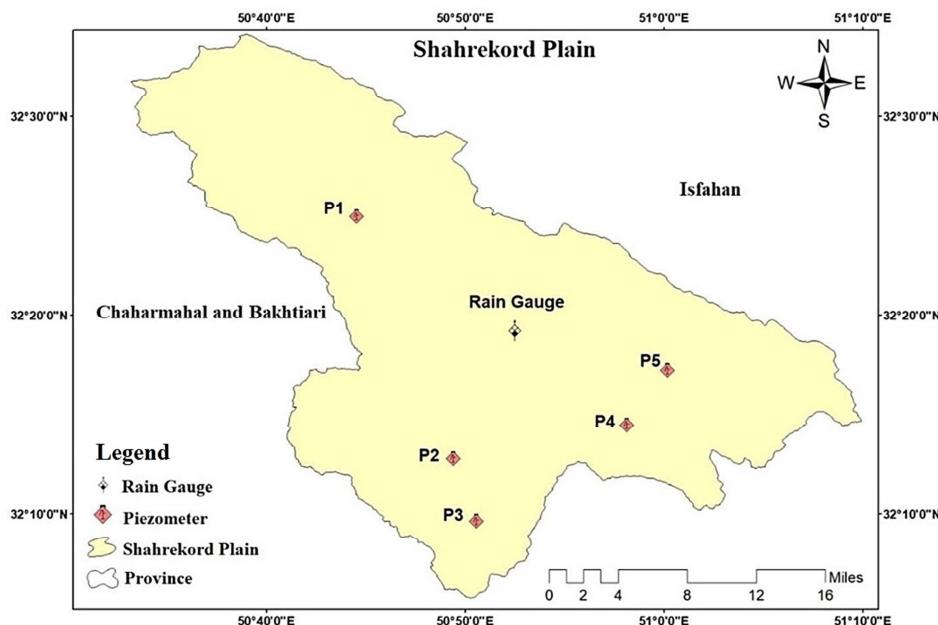


Figure 2. Study area, rain gauge station and piezometers

بارندگی سالانه از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۷۰ کاهش یافته است و میانگین بارندگی سالانه در منطقه ۲۹۶ میلی‌متر می‌باشد و سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷۵، ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۱، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ بارشی کمتر از میانگین داشته‌اند. همچنین بهمنظور بررسی خشکسالی هواشناسی در منطقه، از شاخص بارندگی استانداردشده (SPI) در مقیاس سه‌ماهه، ششم‌ماهه و ۱۲ ماهه در منطقه استفاده شده و نتایج آن در شکل (۴) قابل مشاهده است. همان‌طورکه در شکل (۴) مشخص است، طبق شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه، طولانی‌ترین خشکسالی هواشناسی رخ داده در منطقه ۳۷ ماه دوام داشته است و در سال‌های آبی ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۳۸۰-۸۱ رخ داده است و بزرگ‌ترین شدت خشکسالی نیز مربوط به همین دوره بوده و شدت آن ۴۵/۷۷ می‌باشد.

Table 2. Annual and seasonal precipitation (base period)

	Average precipitation in rain gauge (mm)				
Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly	
91.42	133.19	75.34	1.79	296.15	

به‌منظور بررسی وضعیت آب زیرزمینی در آبخوان دشت شهرکرد، از داده‌های عمق آب زیرزمینی پنج پیزومتر که در جنوب، مرکز و شمال این آبخوان پراکنده شده‌اند، طی دوره مهرماه ۱۳۷۰ الی شهریورماه ۱۳۹۷ (سال آبی ۹۶-۹۷ تا ۷۰-۷۱)، داده‌های بارندگی ایستگاه باران‌سنگی شهرکرد در حوزه رودخانه جهان‌بین و داده‌های برداشت از چاه‌ها طی دوره آماری ذکر شده استفاده شده است (شکل ۲).

نتایج و بحث

شرایط کنونی

با استفاده از داده‌های ماهانه بارندگی ایستگاه شهرکرد، وضعیت بارندگی در دشت شهرکرد به صورت سالانه و فصلی موردنبررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۲) و شکل (۳) قابل مشاهده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، میانگین بارندگی سالانه در منطقه دارای یک روند نزولی با شیب کم است و

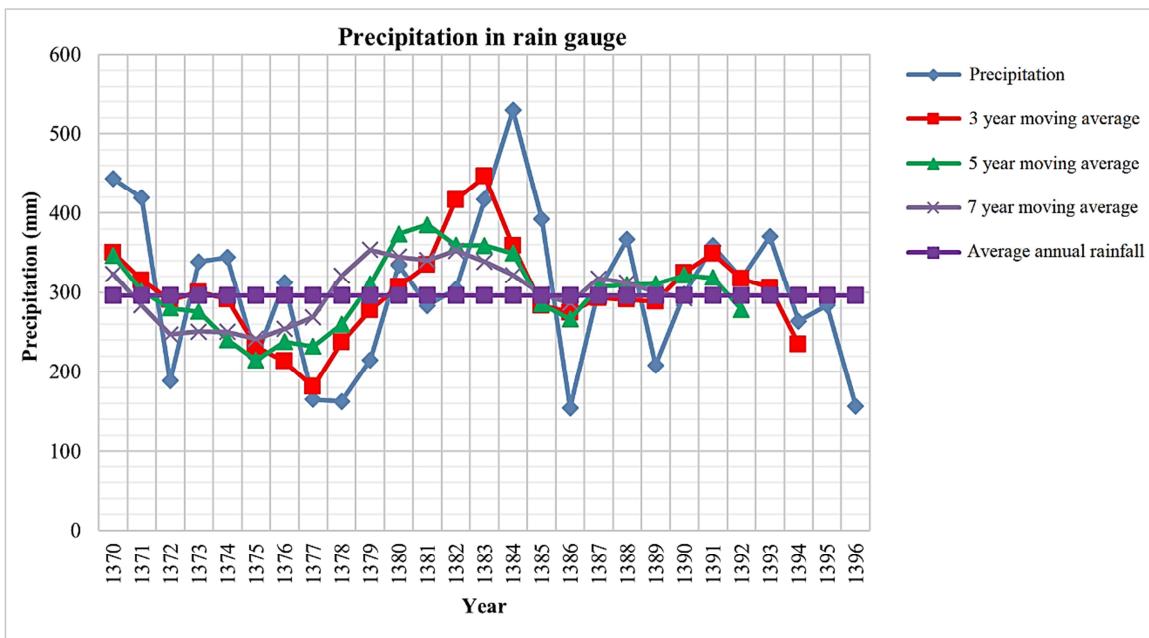


Figure 3. Average annual rainfall with 3, 5 and 7 year moving average (base period)

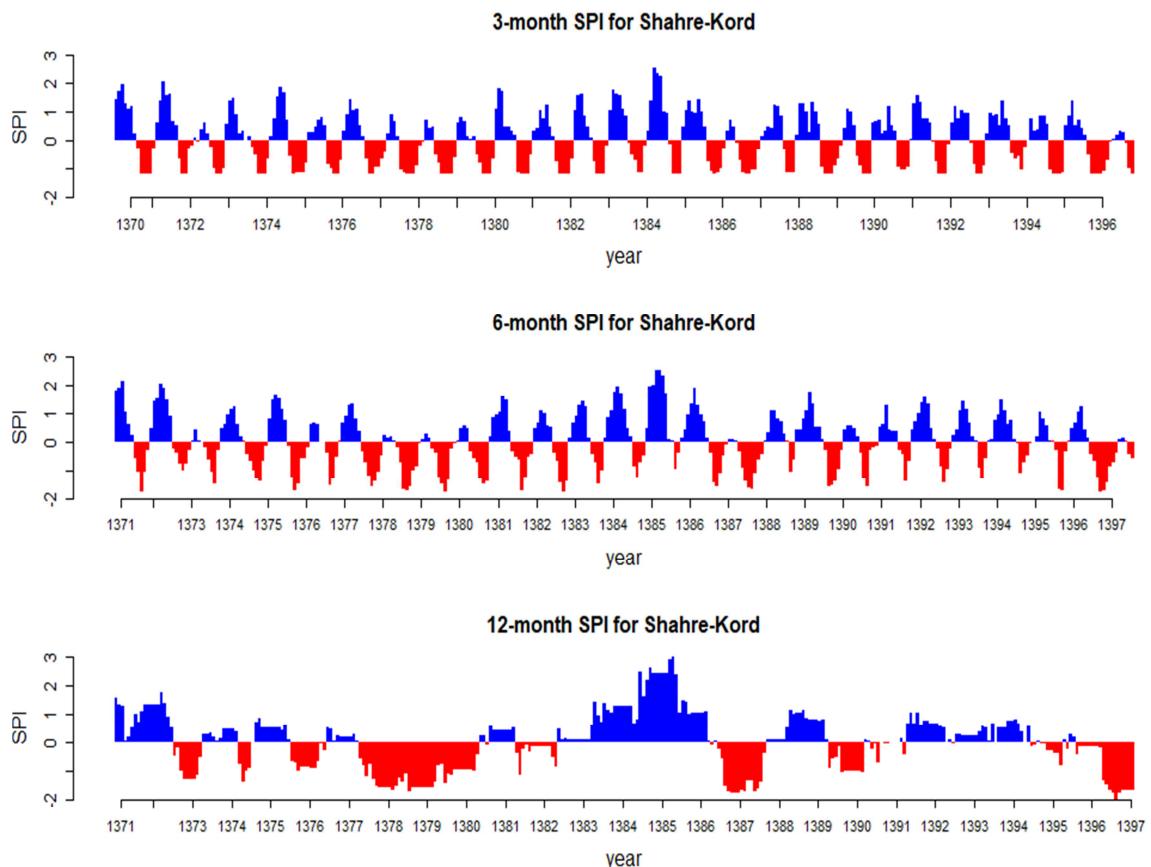


Figure 4. SPI in 3, 6 and 12-month scale (base period)

Table 4. Location of selected piezometers in Shahrekord plain

Piezometer ID	Name	Lon	Lat
1	Nafech-Pirbaloot	50.74218	32.41652
2	No abad	50.82319	32.21293
3	Shams abad	50.84243	32.16127
4	Shooranbche	50.96821	32.2413
5	Boroujen-Esfahan	51.0026	32.28729

همان‌طورکه در شکل (۵) مشخص است، رفتار هر پنج پیزومتر مشابه یکدیگر بوده و همگی آن‌ها دارای روند مشابه می‌باشند. در تمامی پیزومترها با این‌که برداشت از آبخوان از سال آبی ۱۳۷۰-۷۱ تا ۱۳۹۶-۹۷ روندی کاهشی داشته و نزول یافته است، اما مشخص است که هم‌چنان برداشت در مقابل تغذیه برتری داشته و همین امر سبب افزایش عمق آب زیرزمینی در منطقه شده است. شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه نشان داد که شدیدترین و طولانی‌ترین خشکسالی در منطقه طی دوره ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۳۸۰-۸۱ رخ داده است، که همین خشکسالی تأثیر خود را در افزایش عمق آب زیرزمینی نشان داده است و عمق آب زیرزمینی در منطقه در همین دوره بهشدت افزایش یافته است و پیزومترها تا ۲۹ متر افزایش را نشان می‌دهند. همچنین در شکل (۶) شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی (GRI) نشان داده است.

وضعیت دمای حداقل و حداکثر در دشت شهرکرد نیز موردنبررسی قرار گرفته است و نتایج در جدول (۳) مشخص شده است.

Table 3. Annual and seasonal maximum and minimum temperature (base period)

	Average temperature (c)				
	Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
Tmin	1.61	-5.94	3.74	11.12	2.63
Tmax	19.58	7.71	20.55	31.99	19.96

همان‌طورکه نشان داده شده است، متوسط دمای حداقل و حداکثر در دشت شهرکرد در دوره مشاهداتی در دشت شهرکرد به ترتیب ۲/۶۳ و ۱۹/۹۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین به‌منظور تعیین شرایط کنونی آب زیرزمینی در منطقه، از داده‌های عمق آب زیرزمینی پنج پیزومتر در سطح دشت که مشخصات آن‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است و به‌منظور تعیین خشکسالی آب زیرزمینی در منطقه از شاخص GRI استفاده شده است و نتایج در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است که این پنج پیزومتر، به نحوی انتخاب شده‌اند تا در هر منطقه از آبخوان، پیزومتری برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان در آینده و تعیین اثر تغییر اقلیم وجود داشته باشد.

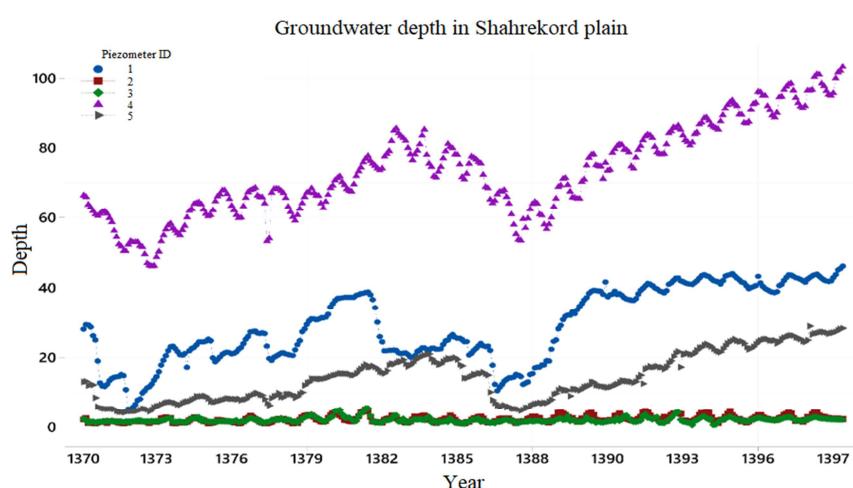


Figure 5. Groundwater depth in five selected piezometers in Shahrekord plain (base period)

SPI و تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر آبخوان دشت شهرکرد تا سال ۲۰۵۰ از نتایج مدل‌های GCM استفاده شده است. در همین راستا بهمنظور ارزیابی عملکرد ۱۰ مدل اقلیمی مورداستفاده که در شبیه‌سازی دوره آینده در دشت شهرکرد مورداستفاده قرار گرفته‌اند (جدول ۵)، از مقایسه نتایج شاخص‌های اقلیمی نظری روزهای خشک متوالی (CDD)، نمایه ساده شدت روزانه (SDII)، حداکثر بارش یکروزه (Rx1Day) و روزها با بارش سنگین (Rx10mm) برای دوره مشاهداتی و دوره تاریخی مدل‌ها استفاده شد که نتایج رتبه‌بندی مدل‌ها در هر یک از شاخص‌های نامبرده شده در جدول (۶) مشخص شده است.

همان‌طورکه مشخص است، پیزومترها تنابع خشک‌سالی و تر سالی را در منطقه نشان می‌دهند (برخلاف شاخص SPI، مقادیر منفی شاخص GRI نشان‌دهنده تر سالی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده خشک‌سالی است).

نتایج مدل‌های گردش عمومی

بهمنظور بررسی خشک‌سالی و تأثیر تغییر اقلیم در این پژوهش از نتایج مدل‌های CMIP6 و دو سناریوی گزارش RCP2.6 و SSP5 ششم تغییر اقلیم که از ترکیب سناریوی SSP1 با RCP8.5 استفاده شده است. بهمنظور تعیین تغییرات بارش ایران طی دو دوره نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۵۰) و دوره دور (۲۰۵۱-۲۱۰۰) در ایران، محاسبه شاخص

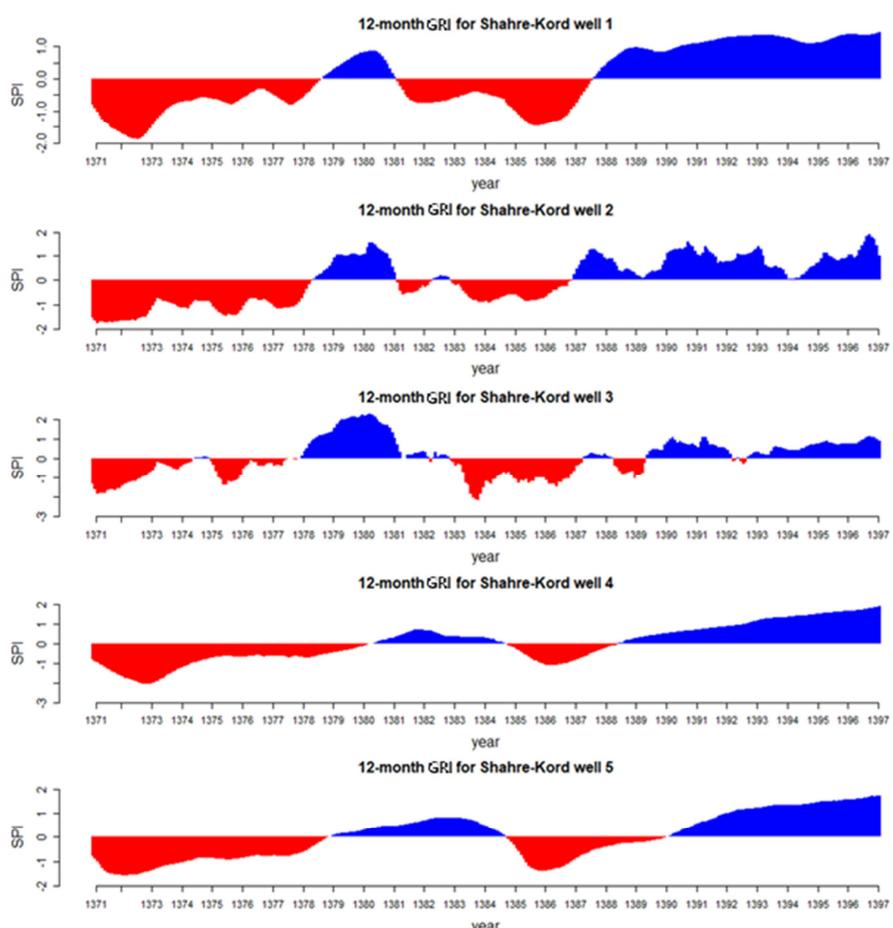


Figure 6. GRI in 12-month scale for five selected piezometers (base period)

همان‌طورکه در جدول (۶) مشخص شده است، مدل GFDL-ESM4 در ارزیابی با استفاده از هر سه شاخص آماری نتایج بهتری دارد و بهتر از سایر مدل‌ها توانسته است داده‌های مشاهداتی را برای دوره تاریخی شبیه‌سازی کند. از همین‌رو، مدل GFDL-ESM4 به عنوان مدل برتر انتخاب شده تا از داده‌های آن برای شبیه‌سازی بارندگی در دشت شهرکرد تا سال ۲۱۰۰ و عمق آب زیرزمینی تا سال ۲۰۵۰ استفاده شود. لازم به ذکر است که ترکیب نتایج مدل‌ها نیز از عملکرد قابل قبولی برخوردار نبوده است و از همین‌رو صرفاً از داده‌های مدل GFDL-ESM4 در این پژوهش استفاده شده است.

$$Z_i = F_{0i}^{-1}(F_{Si}(Y_i)) \quad (رابطه ۱۳)$$

نتایج مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی
در ادامه به منظور تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر آبخوان شهرکرد و تعیین تغییرات عمق آب زیرزمینی پیزومترهای منتخب تا سال ۲۰۵۰ از مدل ANFIS استفاده شد.

همان‌طورکه در جدول (۶) مشخص شده است، مدل GFDL-ESM4 در ارزیابی با استفاده از هر سه شاخص آماری نتایج بهتری دارد و بهتر از سایر مدل‌ها توانسته است داده‌های مشاهداتی را برای دوره تاریخی شبیه‌سازی کند. از همین‌رو، مدل GFDL-ESM4 به عنوان مدل برتر انتخاب شده تا از داده‌های آن برای شبیه‌سازی بارندگی در دشت شهرکرد تا سال ۲۱۰۰ و عمق آب زیرزمینی تا سال ۲۰۵۰ استفاده شود. لازم به ذکر است که ترکیب نتایج مدل‌ها نیز از عملکرد قابل قبولی برخوردار نبوده است و از همین‌رو صرفاً از داده‌های مدل GFDL-ESM4 در این پژوهش استفاده شده است.

همان‌چنان به منظور تصحیح سوگیری و ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل انتخاب شده، از روش نگاشت چندک (Quantile Mapping) استفاده شده است. روش نگاشت چندک (QM) با استفاده از چندک پیش‌بینی به اصلاح پیش‌بینی‌ها با توجه به مشاهدات تاریخی می‌پردازد. برای این منظور،تابع احتمال تجمعی

Table 5. CMIP6 models

Institute	Country	Model	ID
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	ACCESS-CM2	1
Beijing Climate Center Ocean-atmosphere Coupled Model	China	BCC-CSM2-MR	2
Canadian Earth System Model	Canada	CanESM5	3
The Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere extension	USA	CESM2-WACCM	4
Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System	China	FGOALS-f3-L	5
National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-ESM4	6
third Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled configuration	UK	HadGEM3-GC31-MM	7
Indian Institute of Tropical Meteorology ESM	India	IITM-ESM	8
National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration	South Korea	KACE-1-0-G	9
Korea Institute of Ocean Science and Technology	South Korea	KIOST-ESM	10

Table 6. Ranking of CMIP6 models in basic period simulation

Rank	Model	Ranking of CMIP6 models in terms of performance			Model	BIAS
		IA	Model	RMSE		
1	GFDL-ESM4	0.51	GFDL-ESM4	0.41	IITM-ESM	32.01
2	CanESM5	0.41	ACCESS-CM2	0.41	GFDL-ESM4	33.30
3	FGOALS-g3	0.35	IITM-ESM	0.43	ACCESS-CM2	33.70
4	ACCESS-CM2	0.35	CESM2-WACCM	0.46	CESM2-WACCM	36.03
5	BCC-ESM1	0.32	BCC-ESM1	0.50	BCC-ESM1	39.57
6	IITM-ESM	0.31	KACE-1-0-G	0.53	KACE-1-0-G	42.43
7	KIOST-ESM	0.31	HadGEM3-GC31-MM	0.58	HadGEM3-GC31-MM	47.88
8	HadGEM3-GC31-MM	0.31	CanESM5	0.59	CanESM5	48.78
9	KACE-1-0-G	0.28	FGOALS-g3	0.61	FGOALS-g3	54.19
10	CESM2-WACCM	0.23	KIOST-ESM	0.73	KIOST-ESM	65.28

هم‌چنین نتایج مدل ANFIS آموزش دیده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌های مشاهداتی در شکل (۸) و جدول (۷) نشان داده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل به خوبی قادر است دوره مشاهداتی را شبیه‌سازی کند و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. از همین‌رو، مدل آماده شده است و می‌توان از آن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی در دوره آینده استفاده کرد. همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، مدل ANFIS در پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی ماه آینده از دقت خوبی برخوردار است و می‌توان از نتایج آن استفاده کرد. هم‌چنین به منظور تعیین عملکرد مدل، از شاخص‌های آماری R²، RMSE و MSE در مراحل TRAIN و TEST استفاده شده است که نتایج آن در جدول (۷) نشان داده شده است.

در همین راستا از داده‌های بارش ماه قبل، بارش ماه فعلی، عمق چاه در ماه فعلی، عمق چاه در ماه قبلی و برداشت در ماه فعلی به عنوان ورودی مدل استفاده شد و خروجی مدل هم تنها عمق آب زیرزمینی در ماه بعد تعیین شد. با توجه به داده‌های موجود از سال آبی ۱۳۷۰-۷۱ الی ۱۳۹۶-۹۷، ۷۰ درصد به عنوان داده‌های بخش آموزش و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های بخش آزمودن مدل انتخاب شدند. جهت مدل‌سازی ANFIS از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB بهره‌گیری شد. هم‌چنین در راستای خوشبندی داده‌های ورودی به منظور تسهیل محاسبات و افزایش دقت مدل، از روش خوشبندی فازی (C-Means) استفاده شد. ساختار کلی مدل در شکل (۷) نمایش داده شده است.

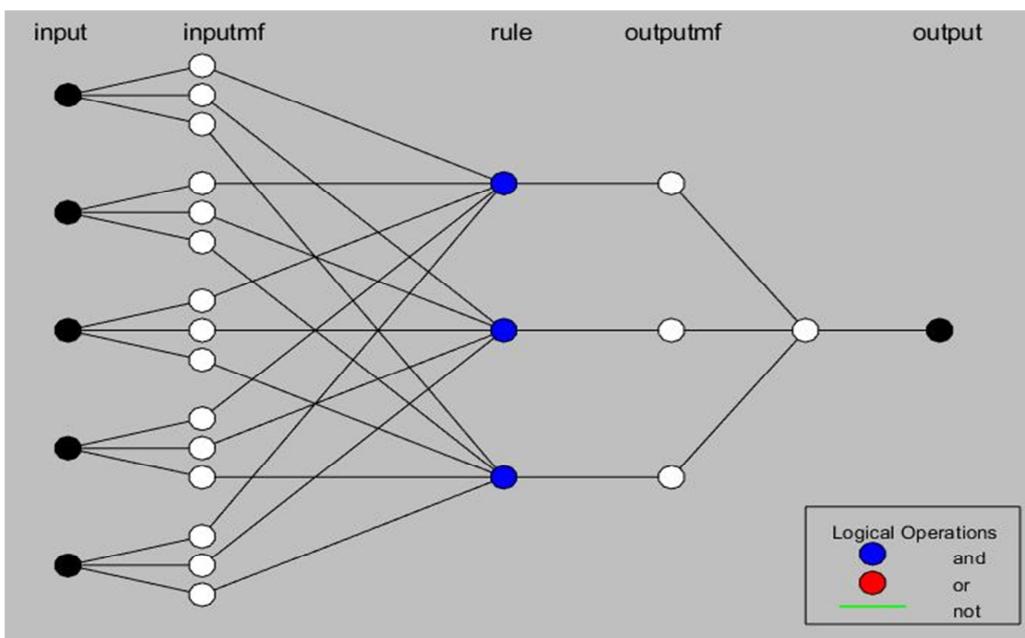


Figure 7. ANFIS model structure in groundwater depth prediction

Table 7. ANFIS performance in train and test period

Piezometer Name	Piezometer ID	ANFIS Results					
		TRAIN R2	TRAIN RMSE	TRAIN MSE	TEST R2	TEST RMSE	TEST MSE
Nafech-Pirbaloot	1	0.99	0.43	0.19	0.95	2.48	6.17
No abad	2	0.83	0.32	0.1	0.61	0.65	0.42
Shams abad	3	0.81	0.3	0.09	0.43	0.45	0.21
Shooranbche	4	0.85	1.16	1.36	0.76	2.17	4.7
Boroujen-Esfahan	5	0.99	0.28	0.08	0.92	1.53	3.2

بررسی و تحلیل اثر خشکسالی بر سفره‌های آب زیرزمینی در ایران (مطالعه موردنی: دشت شهرکرد)

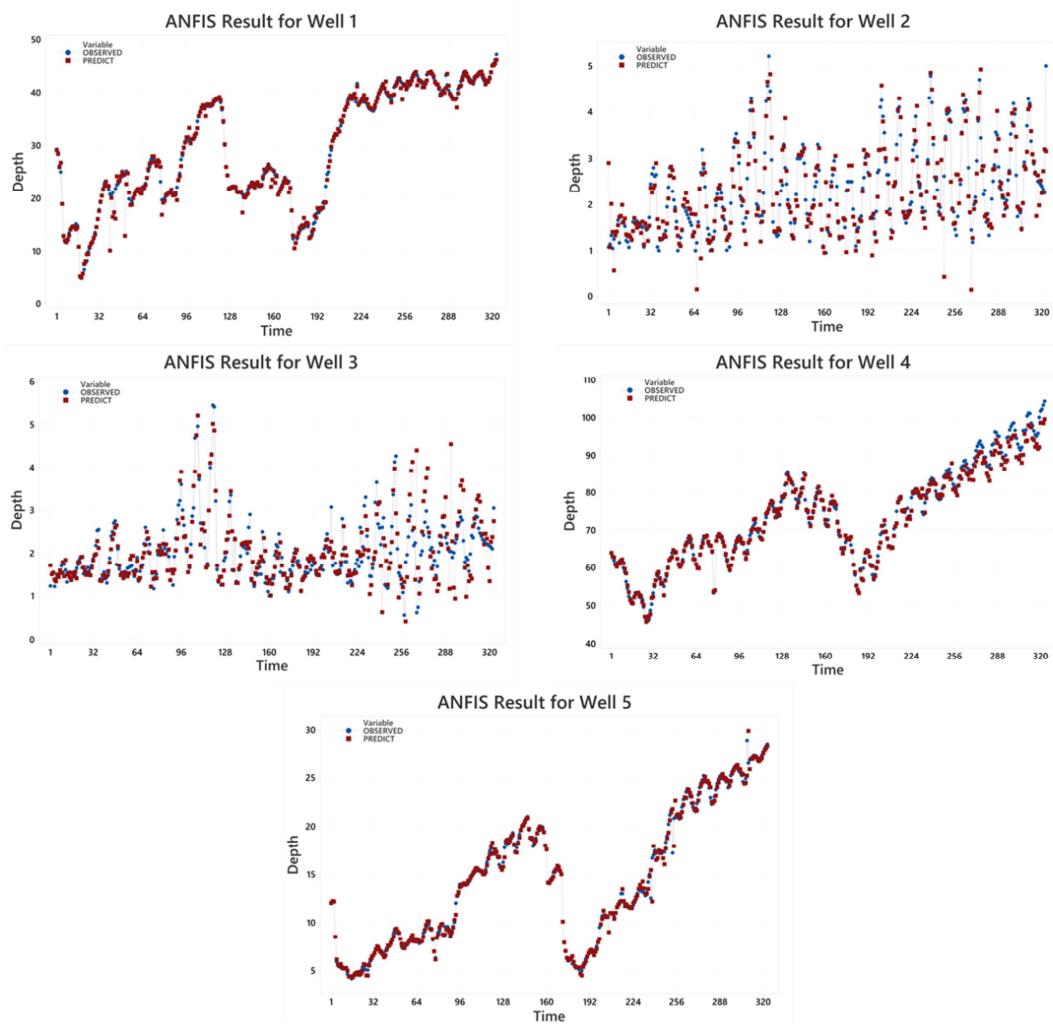


Figure 8. Time series generated by ANFIS model in the base period

۳۰۱/۰۵ و ۲۷۴/۸۱ افزایش و کاهش پیدا می‌کند. همچنین به‌منظور بررسی خشکسالی هواشناسی در دوره آینده، دوباره شاخص SPI برای دوره آینده در سه مقیاس سه‌ماهه، شش‌ماهه و ۱۲ ماهه محاسبه شده است که نتایج در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. طبق شاخص SPI ۱۲ ماهه، نتایج نشان می‌دهد در سناریوی خوش‌بینانه SSP126، طولانی‌ترین خشکسالی رخداده در منطقه، ۵۲ ماه خواهد بود و شدیدترین خشکسالی نیز در همین دوره رخ می‌دهد و اندازه آن ۵۹/۳۲ خواهد بود که در سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۹ رخ می‌دهد. همچنین در سناریوی بدینانه SSP585

شرایط آینده

پس از انتخاب مدل GFDL-ESM4، برونداد مدل استخراج شده و با توجه به داده‌های بارندگی ماهانه دوره مشاهداتی، برونداد مدل ریزمقیاس نمایی شد. در همین راستا بارندگی استخراج شده از مدل تحت دو سناریوی SSP126 (خوب‌بینانه) و SSP585 (بدینانه) تا سال ۲۱۰۰ در شکل (۹) و جدول (۸) نشان داده شده است. طبق نتایج ذکر شده در جدول (۸) مشخص می‌شود که متوسط بارندگی تحت سناریوی SSP126 با افزایش و در سناریوی SSP585 با کاهش رو به رو می‌شود و از مقدار ۲۹۶/۱۵ به ترتیب به

Table 8. Annual and seasonal precipitation under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2100

	Average precipitation in rain gauge (mm)	Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
SSP1-2.6	89.96	118.18	91.89	1.03	301.05	
SSP5-8.5	88.84	111.06	74.06	0.85	274.81	

۷۰ ماه دوام خواهد داشت و بزرگ‌ترین شدت خشکسالی
نیز با اندازه ۸۶/۵۹ در همین دوره و در سال‌های ۲۰۲۹ تا
۲۰۳۵ به‌وقوع خواهد پیوست.

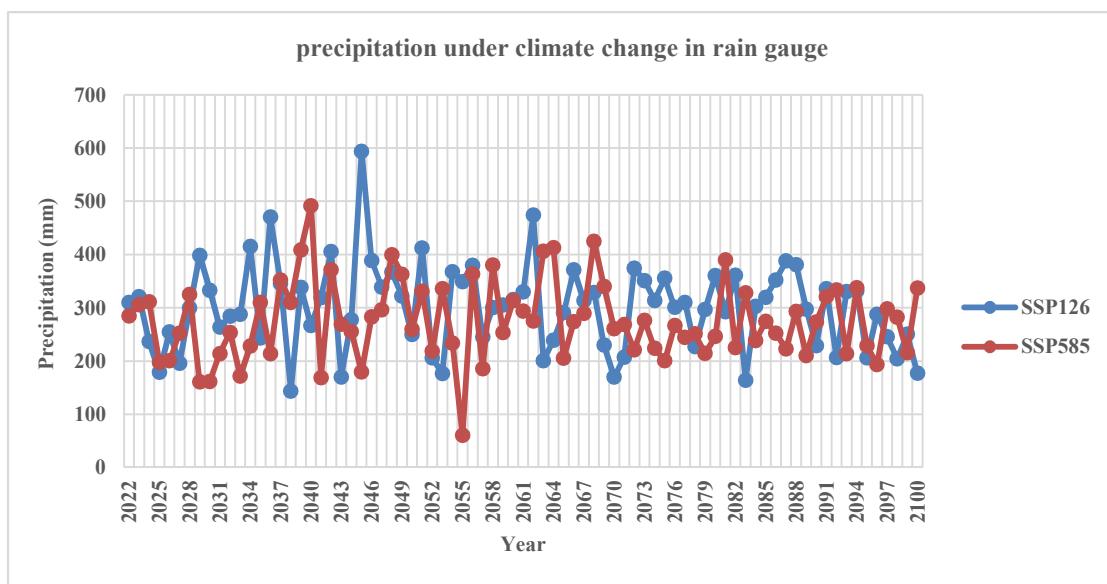


Figure 9. Annual precipitation in Shahrekord under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 until 2100

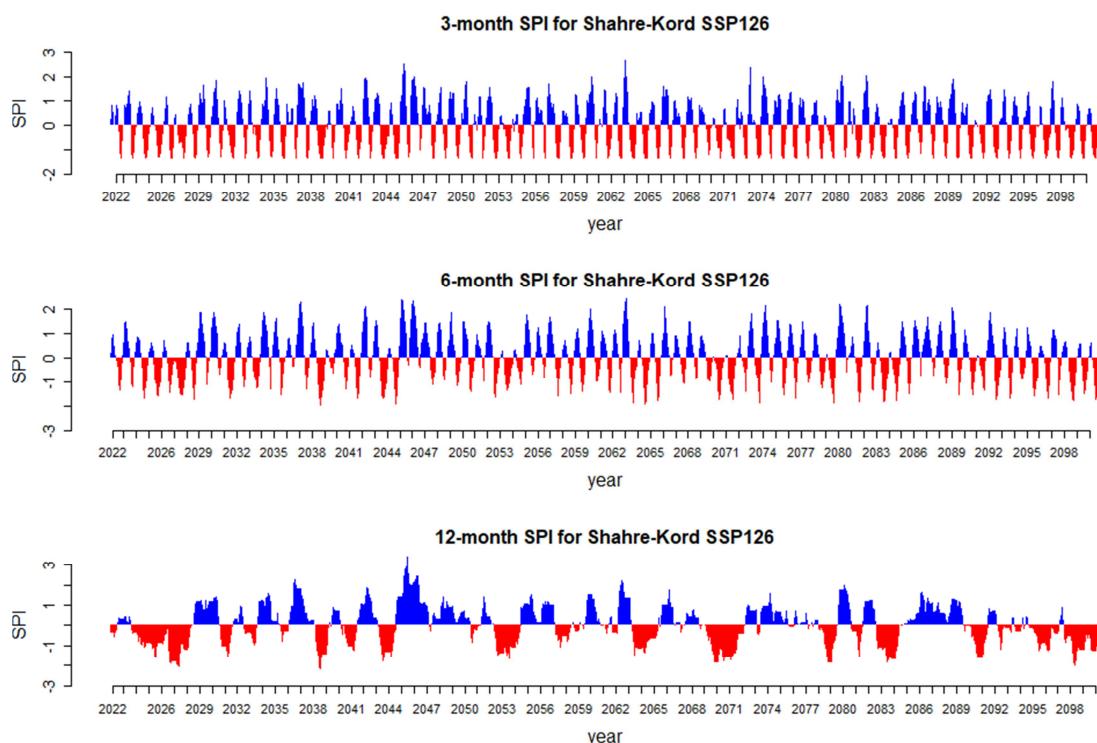


Figure 10. SPI in 3, 6 and 12-month scale (SSP1-2.6)

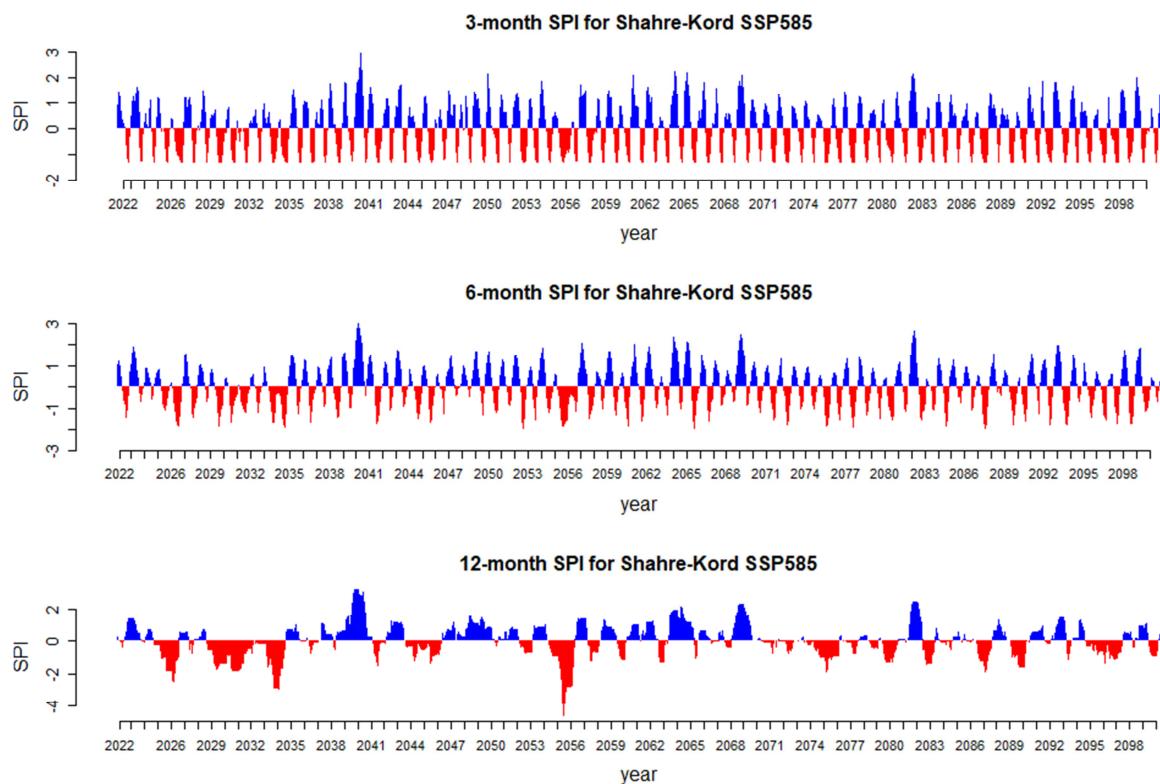


Figure 11. SPI in 3, 6 and 12-month scale (SSP5-8.5)

Table 9. Annual and seasonal temperature under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2100

	Average temperature (c)					
	Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly	
SSP1-2.6	Tmin	2.09	-5.41	2.28	12.29	2.81
	Tmax	19.48	8.01	18.4	32.65	19.63
SSP5-8.5	Tmin	3.44	-4.16	3.38	13.97	4.16
	Tmax	21.35	9.61	20.28	34.55	21.45

پس از تعیین وضعیت بارندگی و دما حدائق و حداکثر در منطقه تحت دو سناریوی خوشبینانه و بدیننانه، و تعیین خشکسالی هواشناسی تا سال ۲۱۰۰، با درنظرگرفتن برداشتی ثابت و مشابه برداشت سال‌های آخر در هر پیزومتر، وضعیت هر پیزومتر تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل ANFIS پیش‌بینی شد که نتایج در شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عمق آب زیرزمینی در پیزومتر ۱، از ۴۵ متر به ۷۰/۳۹ در سناریوی SSP126 و ۶۶/۰۳ متر در سناریوی SSP585 در سال ۲۰۵۰ می‌رسد که نشان

همچنین پس از ریزمقیاس نمایی داده‌های دما حدائق و حدائق با استفاده از داده‌های دوره مشاهداتی، تغییرات دمای دشت شهرکرد تا سال ۲۱۰۰ نیز تعیین شد. نتایج متوسط دمای حدائق و حدائق دشت شهرکرد طی دوره ۲۰۲۲ تا ۲۱۰۰ در جدول (۹) نشان داده شده است. طبق سناریوی ۱۲۶SSP، متوسط دما حدائق و حدائق تا سال ۲۱۰۰ به ترتیب برابر با ۲/۸۱ و ۱۹/۶۳ درجه سانتی‌گراد خواهد بود و نسبت به دوره مشاهداتی، دما حدائق ۰/۱۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و دما حدائق در همین دوره -۰/۸۳ درجه سانتی‌گراد کاهش خواهد یافت. همچنین برای سناریوی SSP585، دما حدائق و حدائق تا سال ۲۱۰۰ به ترتیب برابر با ۴/۱۶ و ۲۱/۴۵ درجه سانتی‌گراد خواهد بود و نسبت به دوره مشاهداتی، دما حدائق ۱/۵۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و دما حدائق نیز در همین دوره ۱/۴۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

پیزومتر ۲ و ۳) و حول عمق ۱۲۰ متر (در پیزومتر ۴) در هر دو سناریو خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در پیزومتر ۵ که دارای روند صعودی می‌باشد، به این روند ادامه می‌دهد و در سال ۲۰۵۰ برای سناریوهای 126 و SSP126 و SSP585 به ترتیب به ۳۷/۸۶ و ۳۸/۰۸ خواهد رسید.

می‌دهد عمق آب زیرزمینی در این پیزومتر حداقل ۲۱ و حداًکثر ۲۵/۳۹ متر تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده می‌شود عمق آب زیرزمینی در پیزومترهای ۲، ۳ و ۴ تغییر چندانی نخواهد داشت و رفتار آینده این پیزومترها مانند دوره مشاهداتی خواهد بود و همواره نوساناتی را بین عمق ۱ تا ۵ متر (در

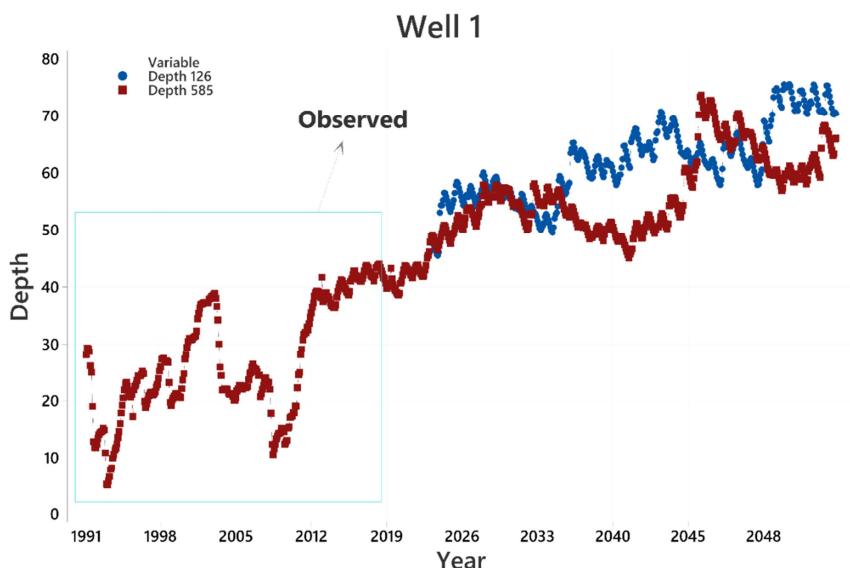


Figure 12. Piezometer 1 depth under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2050

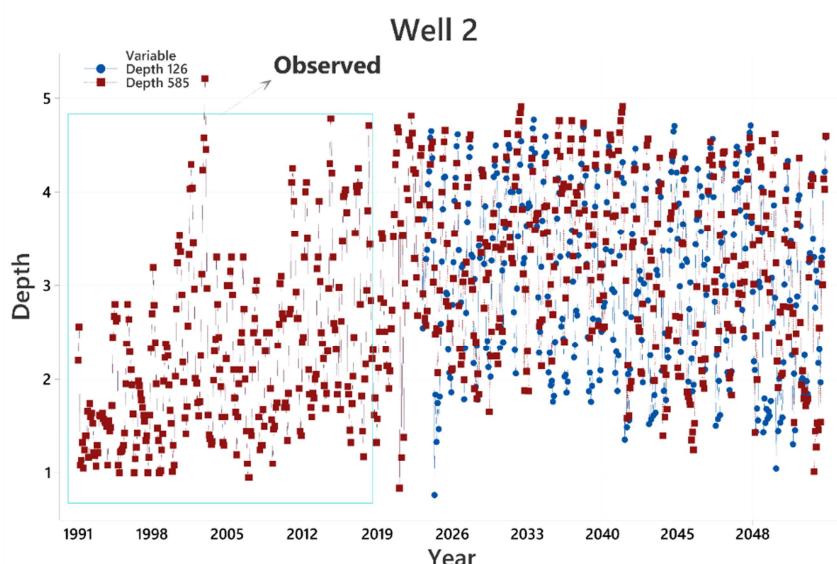


Figure 13. Piezometer 2 depth under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2050

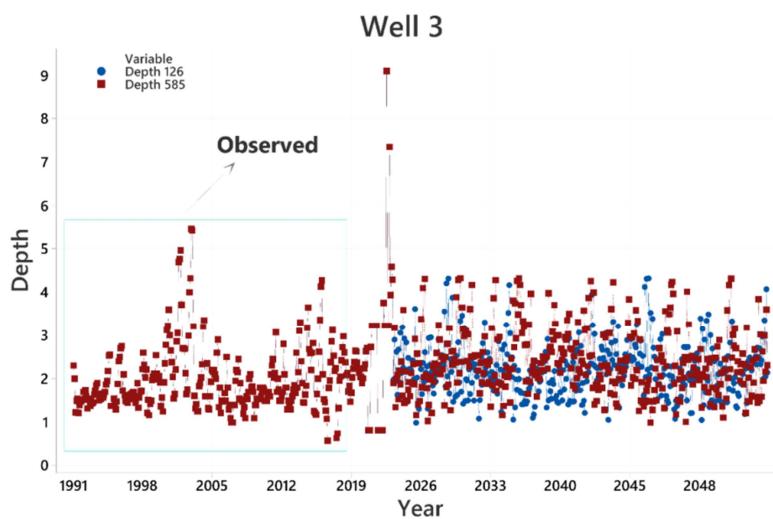


Figure 14. Piezometer 3 depth under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2050

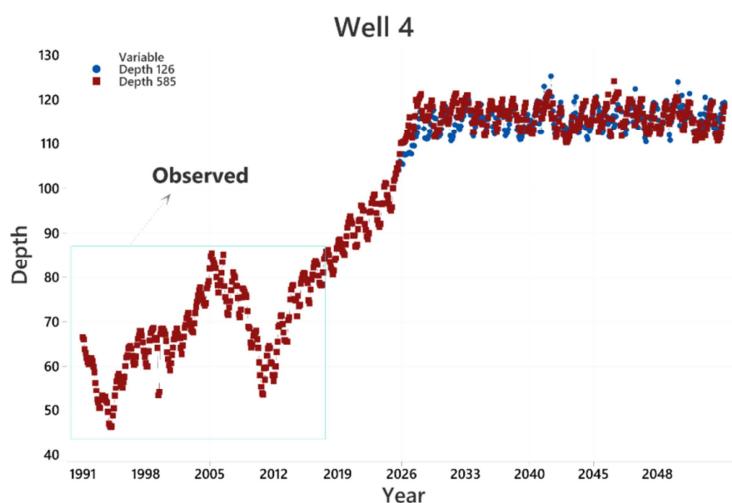


Figure 15. Piezometer 4 depth under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2050

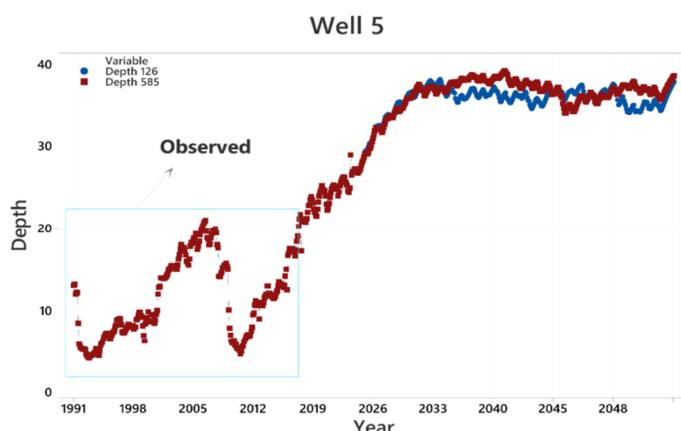


Figure 16. Piezometer 5 depth under climate change (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) until 2050

مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی نظری برآش در دوره آینده، محاسبه شاخص SPI تا سال ۲۰۵۰ و استفاده از نتایج آن در شبیه‌سازی عمق آب زیرزمینی در دوره آینده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش را می‌توان در سه بخش خلاصه کرد. ۱- شرایط کنونی، ۲- توسعه مدل‌ها و ۳- شرایط آینده. با بررسی شرایط فعلی مشخص شد که دشت شهرکرد با میانگین بارندگی سالانه $296/15$ از بارندگی بالاتری از متوسط بارندگی در ایران برخوردار است. هم‌چنین مشخص شد در دوره آماری $1370-71$ تا $1396-97$ ، شدیدترین خشکسالی منطقه دوام داشته و شدت آن $45/77$ بوده است و در سال‌های در سال‌های آبی $1377-78$ و $1380-81$ رخ داده است. هم‌چنین مشاهده شد که در دوره پایه، روند عمق چاه در منطقه صعودی بوده و عمق چاه‌ها در حال افزایش است و این افزایش در در سال‌های آبی $1377-78$ و $1380-81$ تا $1380-81$ که منطقه دچار شدیدترین خشکسالی بوده است، بطوری که بیشترین نرخ را به خود اختصاص داده است، به‌طوری که در پیزومتر، عمق آب زیرزمینی 29 متر افزایش یافته است. در ادامه، با تعیین شرایط دوره پایه، به‌منظور پیش‌بینی دوره آینده، 10 مدل GCM مورد بررسی قرار گرفت که از میان تمامی مدل‌ها، مدل GFDL-ESN4 به‌دلیل دقت بالا در پیش‌بینی دوره پایه، به عنوان برترین مدل انتخاب شد و هم‌چنین مشخص شد که نتایج این مدل به‌نهایی از ترکیب تمامی مدل‌ها با یکدیگر از دقت قابل قبول‌تری برخوردار است. در ادامه با تعیین مدل پیزومتر در ماه فعلی و ماه گذشته، برداشت در ماه فعلی و بارندگی در ماه فعلی و گذشته به عنوان ورودی مدل و

این پژوهش در راستای پاسخ به این سؤال که تغییر اقلیم چه اثری بر آبخوان دشت شهرکرد خواهد گذاشت صورت گرفته است. در راستای پاسخ به این سؤال، برای اولین بار با استفاده از برونداد GFDL-ESM4، بارندگی در دشت شهرکرد تا سال 2050 شبیه‌سازی شده و با استفاده از مدل ANFIS، تغییرات عمق آب زیرزمینی در چاه‌های دشت شهرکرد شبیه‌سازی شده و با استفاده از شاخص SPI خشکسالی هواشناسی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییر اقلیم آثار نامطلوبی بر منطقه وارد خواهد کرد. طبق نتایج شاخص SPI در مقیاس 12 ماهه، شدت و مدت خشکسالی در منطقه تحت دو سناریوهای SSP585 و SSP126 افزایش پیدا خواهد کرد. طبق نتایج، در حالت خوش‌بینانه مدت شدیدترین خشکسالی خشکسالی به اندازه 15 ماه و شدت آن به اندازه $13/55$ واحد افزایش پیدا خواهد کرد و در حالت بدینانه مدت خشکسالی به اندازه 33 ماه و شدت آن به اندازه $40/82$ واحد افزایش پیدا خواهد کرد. نتایج مدل ANFIS نیز نشان می‌دهد روند افزایشی عمق چاه در چاه‌های شماره یک، چهار و پنج تا سال 2050 ادامه‌دار خواهد بود و وضعیت آبخوان بدتر خواهد شد. در پژوهش حاضر، شیوه محاسبه شاخص و پایش خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SPI و GRI با Sanginabadi *et al.* (2020) (Zandifar *et al.*, 2019) (Javidnejad *et al.*, 2014) (Guenang & Mkankam Kamga (2020) و در راستای پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با پژوهش‌های Saeedi Razavi (2014) (Emamgholizadeh *et al.*, 2019) & Arab (2015) (Wen *et al.* (2015) دارای مطابقت‌هایی می‌باشد، اما آنچه سبب مزیت پژوهش حاضر نسبت به موارد مشابه در سطح ایران و جهان می‌شود، استفاده از برونداد

مدیریت آب و آسیاری

پیزومتر^۱، از ۴۵ متر به ۷۰/۳۹ در سناریوی ۱۲۶ و ۶۷/۰۳ متری در سناریوی ۵۸۵ در سال ۲۰۵۰ می‌رشد که نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در این پیزومتر حداقل ۲۱ و حداقل ۲۵/۳۹ متر تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده می‌شود عمق آب زیرزمینی در پیزومترهای ۲، ۳ و ۴ تغییر چندانی نخواهد داشت و رفتار آینده این پیزومترها مانند دوره مشاهداتی خواهد بود و همواره نوساناتی را بین عمق ۱ تا ۵ متر (در پیزومتر ۲ و ۳) و حول عمق ۱۲۰ متر (در پیزومتر ۴) در هر دو سناریو خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در پیزومتر ۵ که دارای روند صعودی می‌باشد، به این روند ادامه می‌دهد و در سال ۲۰۵۰ برای سناریوهای ۱۲۶ و ۵۸۵ به ترتیب به ۳۷/۸۶ و ۳۸/۰۸ خواهد رسید.

در نهایت باید اشاره کرد در این مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از برونداد مدل GFDL-ESM4 که یکی از مدل‌های CMIP6 می‌باشد و تحت دو سناریوی گزارش ششم تغییر اقلیم با نام‌های ۱۲۶ و ۵۸۵ صورت گرفته است. مدل انتخاب شده دارای توانمندی بالایی در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی نظری باشد و به طور بالقوه‌ای با استفاده از برونداد این مدل می‌توان خشکسالی را پایش کرد. اما ذکر این نکته دارای اهمیت است که عدم قطعیت‌های مختلف تقریباً در تمام مطالعاتی که وضعیت آینده را در نظر می‌گیرند یا آینده را شبیه‌سازی می‌کنند، وجود دارد. عدم قطعیت ناشی از تغییرپذیری داخلی پارامترسازی‌های سناریوهای SSP شبیه‌سازی‌های مدل‌های GCM، پیش‌بینی با استفاده از ANFIS و انتخاب شاخص خشکسالی و روش و فرایند محاسبه آن نیز عدم قطعیت‌های این پژوهش را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش در راستای در دسترس نبودن داده‌های مدنظر، تنها شاخص خشکسالی SPI و GRI مورد بررسی قرار گرفته است.

عمق پیزومتر در ماه آینده به عنوان تنها خروجی مدل انتخاب شد و مدل با این ساختار طراحی شد. نتایج مدل ANFIS نشان داد که این مدل قادر است با دقت بالا و قابل قبولی دوره پایه را شبیه‌سازی کند. از این‌رو، پس از طراحی مدل ANFIS و آموزش آن با داده‌های مشاهداتی، مدل برای هر پنج پیزومتر به طور جداگانه طراحی شد تا در راستای پیش‌بینی دوره آینده مورد استفاده قرار گیرد.

پس از تعیین مدل GFDL-ESM4 به عنوان برترین مدل GCM در این پژوهش، بارندگی برای دو دوره نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۲) و دوره دور (۲۰۵۱-۲۱۰۰) تحت دو سناریوی اقلیمی خوش‌بینانه (SSP126) و سناریو بدینانه (SSP585) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد متوسط بارندگی سالانه در دشت شهرکرد تحت سناریوی ۱۲۶ افزایش و تحت سناریوی ۵۸۵ کاهش پیدا خواهد کرد و به ترتیب برابر با ۳۰/۱۰۵ و ۲۷۴/۸۱ خواهد شد. همچنین به‌منظور بررسی خشکسالی هواشناسی در دوره آینده، دوباره شاخص SPI برای دوره آینده در سه مقیاس سه‌ماهه، شش‌ماهه و ۱۲ ماهه محاسبه شد. طبق شاخص SPI ۱۲ ماهه، نتایج نشان می‌دهد در سناریو خوش‌بینانه ۱۲۶، طولانی‌ترین خشکسالی رخ داده در منطقه ۵۲ ماه خواهد بود و شدیدترین خشکسالی نیز در همین دوره رخ می‌دهد و اندازه آن ۵۹/۳۲ خواهد بود که در سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۹ رخ می‌دهد. همچنین در سناریوی بدینانه ۵۸۵، ۷۰ ماه دوام خواهد داشت و بزرگ‌ترین شدت خشکسالی نیز با اندازه ۸۶/۵۹ در همین دوره و در سال‌های ۲۰۲۹ تا ۲۰۳۵ به‌وقوع خواهد پیوست. پس از پیش‌بینی بارندگی برای دوره آینده، بارندگی تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدینانه تا سال ۲۰۵۰، همراه با برداشت ثابت و مشابه برداشت سال‌های آخر در منطقه، مدل ANFIS برای پیش‌بینی دوره آینده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل ANFIS نشان می‌دهد که عمق آب زیرزمینی در

- of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4327-4344.
10. Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ... & Vuichard, N. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), e2019MS002010.
11. Brêda, J. P. L. F., de Paiva, R. C. D., Collischon, W., Bravo, J. M., Siqueira, V. A., & Steinke, E. B. (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, 159(4), 503-522.
12. Costa, D., Zhang, H., & Levison, J. (2021). Impacts of climate change on groundwater in the Great Lakes Basin: A review. *Journal of Great Lakes Research*, 47(6), 1613-1625.
13. Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66-95.
14. Ekrami, M., Fathimaj, A., Barkhordaei, J. (2015). Assessment Agricultural Drought Vulnerability In Arid and S-arid climates using GIS and AHP, A Case Study for Taft Township, Yazd province, Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 5(4), 107-117. (In Persian)
15. Emamgholizadeh, S., Moslemi, K., & Karami, G. (2014). Prediction the groundwater level of bastam plain (Iran) by artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Iranian Journal of Water Resources Management*, 28(15), 5433-5446. (In Persian)
16. Gerten, D., Rost, S., von Bloh, W., & Lucht, W. (2008). Causes of change in 20th century global river discharge. *Geophysical Research Letters*, 35(20).
17. Guenang, G. M., & Mkankam Kamga, F. (2014). Computation of the standardized precipitation index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2310-2324.
18. Hassan, W. H. (2020). Climate change impact on groundwater recharge of Umm er Radhuma unconfined aquifer Western Desert, Iraq. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 10(4), 392-412.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده‌گان وجود ندارد.

منابع

1. Akinsanola, A. A., Ongoma, V., & Kooperman, G. J. (2021). Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation over Eastern Africa. *Atmospheric Research*, 254, 105509.
2. Ahmadi Akhormeh, M., Nohegar, A., Soleimani Motlagh, M., & Taie Samiromi, M. (2015). Groundwater Drought Investigating using SWI and GRI Indices) Case Study: Marvdasht Kharameh Aquifer). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 6(1), 105-118. (In Persian)
3. Klutse, N. A. B., Quagrainé, K. A., Nkrumah, F., Quagrainé, K. T., Berkoh-Oforiwa, R., Dzrobi, J. F., & Sylla, M. B. (2021). The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 25-41.
4. Ashraf, S., AghaKouchak, A., Nazemi, A., Mirchi, A., Sadegh, M., Moftakhari, H. R., ... & Mallakpour, I. (2019). Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic Change*, 152(3), 379-391.
5. Auer, C., Kriegler, E., Carlsen, H., Kok, K., Pedde, S., Krey, V., & Müller, B. (2021). Climate change scenario services: From science to facilitating action. *One Earth*, 4(8), 1074-1082.
6. Bağcacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenli, E., & Yilmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576.
7. Bhardwaj, K., & Mishra, V. (2021). Drought detection and declaration in India. *Water Security*, 14, 100104.
8. Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 4769-4787.
9. Bloomfield, J. P., Marchant, B. P., Bricker, S. H., & Morgan, R. B. (2015). Regional analysis

19. Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571-1592.
20. Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J. S. (2021). Future Projections and Uncertainty Assessment of Precipitation Extremes in Iran from the CMIP6 Ensemble. *Atmosphere*, 12(8), 1052.
21. Hosseinzadeh, M. M., & Nohegar, A. (2011). Studying the Effect of Drought on Water Resources over Two Decades and Occurrences of the Sinking Phenomenon in Minab Plain. *Iranian Journal of Environmental Science*, 9(1), 75-98. (In persian)
22. Huang, J., Cao, L., Yu, F., Liu, X., & Wang, L. (2021). Groundwater drought and cycles in Xuchang City, China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 831.
23. Javadinejad, S., Dara, R., & Jafary, F. (2020). Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical and future droughts and their impact on groundwater. *Resources Environment and Information Engineering*, 2(1), 71-83.
24. Kamworapan, S., Thao, P. T. B., Gheewala, S. H., Pimonsree, S., & Prueksakorn, K. (2021). Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon*, 7(11), e08263.
25. Kaur, N., Kaur, S., Kaur, P., & Aggarwal, R. (2021). Impact of climate change on groundwater levels in Sirhind Canal Tract of Punjab, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 15, 100670.
26. Kaur, N., Tech, M., Kaur, S., Kaur, P., Ph, D., & Aggarwal, R. (2021). Groundwater for Sustainable Development Impact of climate change on groundwater levels in Sirhind Canal Tract of. *Groundwater for Sustainable Development*, 15(August 2020), 100670.
27. Khosravi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H., & Ghasemi Dastgerdi, A. R. (2019). Monitoring and Forecasting of Groundwater Drought Using Groundwater Resource Index (GRI) and First to Third-Order Markov Chain Models (Case study: Boroujen Plain). *Iranian Journal of Water and Soil Conservation*, 26(2), 117-136. (In Persian)
28. Kumar, R., Musuza, J. L., Van Loon, A. F., Teuling, A. J., Barthel, R., Ten Broek, J., ... & Attinger, S. (2016). Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(3), 1117-1131.
29. Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571-1592.
30. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183. Boston.
31. Mechoso, C. R., Arakawa, A., & Angeles, L. (2015). General Circulation Models. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* 2nd Edition (Second Edition, Vol. 4). Elsevier.
32. Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302.
33. Mesbah Zadeh, T., & Soleymani Sardoo, F. (2018). Assessment of the temporal and spatial pattern of meteorology and hydrogeology drought in arid and desert regions (Case study: Bam plain). *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 25(2), 366-377. (In Persian)
34. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). Review paper A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
35. Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0°C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble. *Atmospheric Research*, 265, 105908.
36. Nayyeri, M., Hosseini, S. A., Javadi, S., & Sharafati, A. (2021). Spatial differentiation characteristics of groundwater stress index and its relation to land use and subsidence in the Varamin Plain, Iran. *Natural Resources Research*, 30(1), 339-357.
37. Ritchie, M., Frazier, T., Johansen, H., & Wood, E. (2021). Early climate change indicators in the Arctic: A geographical perspective. *Applied Geography*, 135, 102562.
38. Roshun, S. H., & Habibnejad Roshan, M. (2018). Monitoring of temporal and spatial variation of groundwater drought using GRI and SWI indices (Case study: Sari-Neka plain). *Iranian Journal of Watershed Management Research*, 9(17), 269-279. (In Persian)
39. Saeedi Razavi, B., & Arab, A. (2019). Groundwater Level Prediction of Ajabshir Plain using Fuzzy Logic, Neural Network Models and Time Series. *Iranian Journal of Hydrogeology*, 3(2), 69-81. (In Persian)
40. Sanginabadi, H., Saghabian, B., & Delavar, M. (2019). Monitoring and assessing the characteristics of groundwater drought in aquifers with negative balance. *Iranian Journal of Iran-Water Resources Research*, 15(3), 155-166. (In Persian)

41. Schreiner-McGraw, A. P., & Ajami, H. (2021). Delayed response of groundwater to multi-year meteorological droughts in the absence of anthropogenic management. *Journal of Hydrology*, 603, 126917.
42. Sharafi, L., Zarafshani, K., Keshavarz, M., Azadi, H., & Van Passel, S. (2020). Drought risk assessment: Towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran. *Ecological Indicators*, 114, 106276.
43. Seidenfaden, I. K., Jensen, K. H., & Sonnenborg, T. O. (2021). Climate change impacts and uncertainty on spatiotemporal variations of drought indices for an irrigated catchment. *Journal of Hydrology*, 601, 126814.
44. Sobhani, B., Eslahi, M., & Babaeian, I. (2017). Comparison of statistical downscaling in climate change models to simulate climate elements in Northwest Iran. *Iranian Journal of Physical Geography Research Quarterly*, 49(2), 301-325. (In Persian)
45. Song, Z., Xia, J., She, D., Li, L., Hu, C., & Hong, S. (2021). Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China. *Journal of Hydrology*, 601, 126643.
46. Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., ... & Winter, B. (2019). The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873.
47. Trambauer, P., Maskey, S., Werner, M., Pappenberger, F., Van Beek, L. P. H., & Uhlenbrook, S. (2014). Identification and simulation of space-time variability of past hydrological drought events in the Limpopo River basin, southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 2925-2942.
48. Tramblay, Y., Koutoulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., ... & Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210, 103348. Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., & Sheikholeslami, J. (2019). The future of extreme climate in. *Scientific Reports*, December 2018, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
49. Van Lanen, H. A. (2006). *Drought propagation through the hydrological cycle*. IAHS publication, 308, 122.
50. Venturini, A. (2022). Climate change, risk factors and stock returns: A review of the literature. *International Review of Financial Analysis*, 79, 101934.
51. Wanders, N., van Lanen, H. A., & van Loon, A. F. (2010). Indicators for drought characterization on a global scale (No. 24). Wageningen Universiteit.
52. Wang, D., Liu, J., Shao, W., Mei, C., Su, X., & Wang, H. (2021). Comparison of CMIP5 and CMIP6 Multi-Model Ensemble for Precipitation Downscaling Results and Observational Data: The Case of Hanjiang River Basin. *Atmosphere*, 12(7), 867.
53. Wang, T., Tu, X., Singh, V. P., Chen, X., & Lin, K. (2021). Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. *Journal of Hydrology*, 596, 126091.
54. Wen, X., Feng, Q., Yu, H., Wu, J., Si, J., Chang, Z., & Xi, H. (2015). Wavelet and adaptive neuro-fuzzy inference system conjunction model for groundwater level predicting in a coastal aquifer. *Neural Computing and Applications*, 26(5), 1203-1215.
55. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.
56. Xu, Y., Zhang, X., Hao, Z., Hao, F., & Li, C. (2021). Projections of future meteorological droughts in China under CMIP6 from a three-dimensional perspective. *Agricultural Water Management*, 252, 106849.
57. Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M., & Khosroshahi, M. (2020). Spatiotemporal variations of groundwater drought indices, Case study: Zohreh-Jarrahi watershed. *Iranian Journal of Hydrogeology*, 4(2), 108-130. (In Persian)
58. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 643-660.
59. Zhang, G., Su, X., Singh, V. P., & Ayantobo, O. O. (2021). Appraising standardized moisture anomaly index (S2I) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100898.
60. Zhao, X., Huang, G., Li, Y., Lin, Q., Jin, J., Lu, C., & Guo, J. (2021). Projections of meteorological drought based on CMIP6 multi-model ensemble: A case study of Henan Province, China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 243, 103887.