



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

فردوس کریمی^۱، سامان جوادی^{۲*}، مهدی سلامی^۳، محمد گل محمدی^۴، فرهاد بهزادی^۵

دانشجوی دکتری، شرکت آب منطقه ای چهار محال و بختیاری، شهرکرد، ایران

دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شرکت آب منطقه ای چهار محال و بختیاری، شهرکرد، ایران

دانشجوی دکتری مدیریت منابع آب، دانشگاه علوم و تحقیقات، شرکت آب منطقه ای چهار محال و بختیاری، شهرکرد، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکدهگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

آب زیرزمینی همواره یکی از با ارزش‌ترین منابع آبی در هر منطقه به شمار می‌رود و در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک جهان نظیر کشور ایران، اصلی‌ترین منبع جهت تامین نیازهای شرب و کشاورزی محسوب می‌شود. در سالیان اخیر، با افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش برداشت از آبخوان‌ها و تغییرات اقلیمی، تراز آب زیرزمینی در بسیاری از آبخوان‌های ایران همواره نزولی بوده و بسیاری از آبخوان‌های کشور در شرایط وخیم قرار دارند و این شرایط در بسیاری از آبخوان‌های کشور ادامه‌دار بوده یا شرایط در حال بدتر شدن است. در همین راستا همواره پایش منظم وضعیت آبخوان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و با اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب می‌توان از آسیب دیدن هرچه بیشتر آبخوان‌ها جلوگیری کرد و همواره خسارت را کاهش داد. هدف این پژوهش تعیین خشکسالی‌های دوره آتی و تعیین تاثیر آن بر آبخوان دشت شهرکرد می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 در ابتدا متغیرهای اقلیمی نظیر بارندگی و دما برای دوره آتی شبیه‌سازی شده و وضعیت بارندگی در منطقه تا سال ۲۱۰۰ تعیین شده است. در ادامه با استفاده از مدل ANFIS، عمق آب زیرزمینی در پنج پیژومتر 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 این رو با توجه به تغییرات محتمل در آینده‌ای نه چندان دور و به منظور جلوگیری از وخیم‌تر شدن شرایط و افزایش خسارات، باید تصمیمات مدیریتی مناسبی در این منطقه اتخاذ شود.

کلیدواژه‌ها: بارندگی، دما، ANFIS، GRI، SPI



مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی به عنوان منابع حیاتی تامین 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 تامین 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 تحقیقات 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, and Lucht, 2008). طبق گزارشات هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، تغییر اقلیم سبب تغییرات گسترده در دما، بارش، تبخیر و تعریق و ... در یک منطقه می‌شود که بطور 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 بطور 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 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 هیدروکلیماتیکی 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). تحقیقات گسترده‌ای در سرتاسر 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 مرودشت 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 SPI، GRI و SWI انواه خشکسالی را در آبخوان اصفهان-برخوار را تا سال ۲۰۴۰ مورد بررسی قرار داده‌اند. Schreiner-McGraw and 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، بطور متوسط سه سال طول خواهد کشید تا آخرین دست رفته آبخوان جبران شود. این مدت می‌تواند با توجه به دوره زمانی خشکسالی و شدت خشکسالی حتی تا ۱۵ سال افزایش یابد. Hassan et al. (2020)، به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آبخوان Umm Er Rahuma در غرب صحرای عراق، از پرونداد مدل CanESM2 و دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کرده‌اند.



نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۹۹، طبق دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5، بارندگی به ترتیب ۹/۲ و ۱۴/۱ درصد کاهش خواهد یافت و تغذیه آبخوان طی همین دوره و دو سناریو نام برده شده به ترتیب ۱۳/۶ و ۲۱/۲ درصد کاهش می‌یابد. (Kaur et al. (2021). با استفاده از مدل CSRIO-MK 6-CM و MODFLOW، تاثیر تغییر اقلیم بر آبخوان پنجاب در هند که منطقه‌ای خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش از دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به منظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی تا سال ۲۱۰۰ استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تغییر اقلیم اثری سو بر آبخوان مد نظر خواهد داشت. طبق دو سناریو نام برده شده و تحت دو شرایط تعریف شده A و B، تراز آب زیرزمینی در این آبخوان به ترتیب ۴/۳ و ۵۷/۵ 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 مورد بررسی 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 نواسانات هفتگی تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحل شرق چین مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نتایج هر دو مدل از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند و نتایج هر دو مدل از مدل ANN برتر می‌باشد. (Saeedi Razavi et al. (2021). به منظور 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 دوره مورد نظر 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.

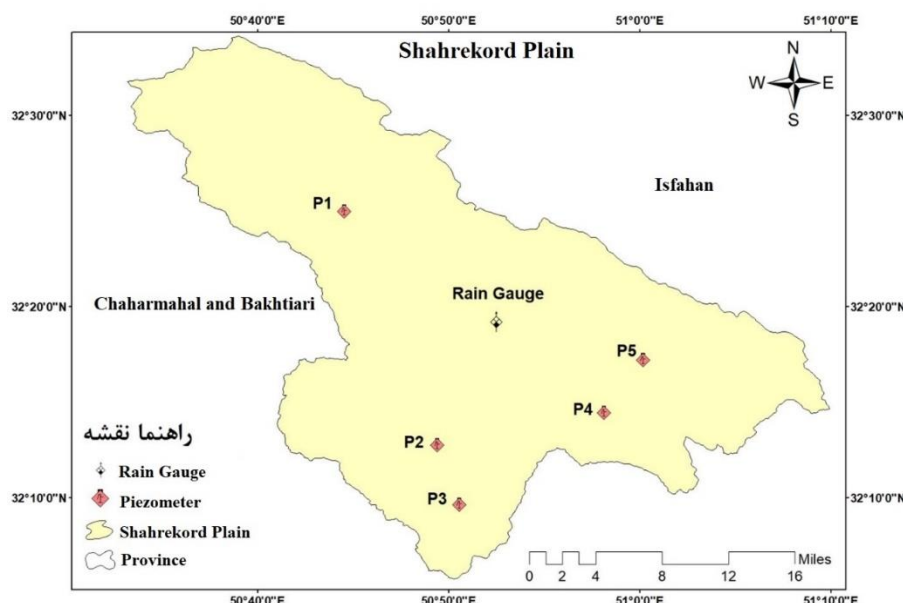
در این پژوهش به منظور تعیین خشکسالی آب زیرزمینی در دوره آینده در منطقه دشت شهرکرد، از مدل‌های اقلیمی به منظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) به منظور پایش خشکسالی در دوره آینده این منطقه استفاده شده است. در ادامه به منظور پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی در منطقه از مدل ANFIS استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی شهرکرد یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۴۴ کیلومتر مربع 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. ۵۴۱ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت و ۷۰۳ کیلومتر مربع 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 ۱۹۹۶ متر در بخش‌های خروجی حوضه و حداکثر ۳۲۶۰ متر در ارتفاعات آن می‌باشد. مسیل‌های واقع در این محدوده دائمی بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه جهان بین تشکیل می‌دهد. مهمترین رودخانه در این محدوده رودخانه آب جهان بین (خررود) بوده که یکی از شاخه‌های مهم رودخانه کیار می‌باشد. از ۵۴۱ کیلومتر مربع از وسعت محدوده دشت، ۳۷۵/۲ کیلومتر مربع

را آبخوان آبرفتی تشکیل می‌دهد. این دشت دارای ۴۱۷ حلقه چاه کشاورزی، ۵۹ حلقه چاه آب شرب، ۱۵۹ حلقه چاه آب صنعتی، ۷۹ رشته قنات، ۴۰ دهنه چشمه فعال 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 به دنبال آن افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شده است. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و پیزومترهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (دشت شهرکرد)

به منظور 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 مهر ۱۳۷۰ الی شهریور ۱۳۹۷ (سال آبی ۷۱-۷۰ تا ۹۷-۹۶)، داده‌های بارندگی ایستگاه بارانسنجی شهرکرد در حوزه رودخانه جهان‌بین و داده‌های برداشت از چاه‌ها طی دوره آماری ذکر شده استفاده شده است (شکل ۱).

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

شاخص (GRI) توسط مهندس و همکاران به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شده است. مقدار شاخص GRI با استفاده از معادله ۱ تعیین می‌شود (Bloomfield and Marchant, 2013):

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{y,m}}{\sigma_{y,m}} \quad (1)$$



که در آن، $D_{y,m}$ ارزش سطح ایستابی آب در ماه m و سال y ، 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.

جدول ۲- SPI and GRI

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

مدل ANFIS

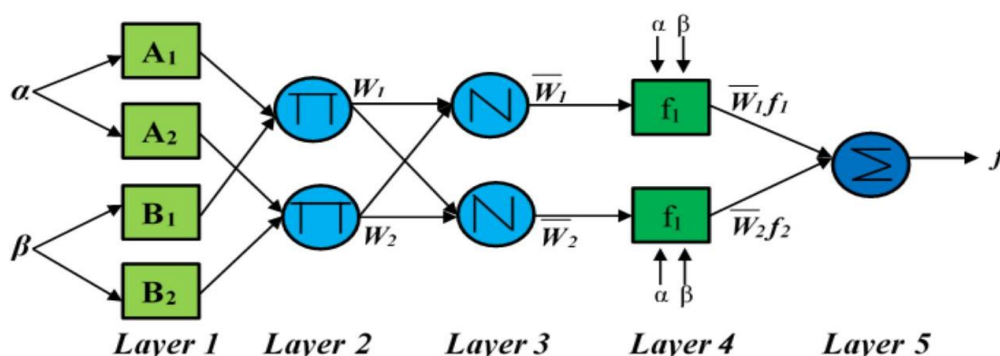
بطور کلی برای پیش‌بینی رفتار پدیده‌های هیدرولوژیکی که بیشتر قوانین احتمالات بر آن‌ها حاکم است، در اکثر موارد متغیرها بصورت سری زمانی در نظر گرفته شده و روند تجزیه و تحلیل به گونه‌ای است که از اطلاعات گذشته سری در جهت ایجاد الگو یا مدل پیش‌بینی کننده سری زمانی آینده بهره‌گیری می‌شود. در همین راستا در 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 ابزاری کارآمد به شمار می‌رود. در این میان شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند ابزاری به دلیل قابلیت آموزش پذیری و با استفاده از الگوهای مختلف 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 دربرگیرنده 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 صحت‌سنجی مدل است. از رو بخشی از داده‌ها که در مرحله آموزش به کار نرفته است، به عنوان ورودی در مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا از دقت و اعتبار مدل اطمینان حاصل شود. مدل ANFIS غالباً با استفاده از یک سیستم فازی تاکاجی-سوگنو به صورت ساختار شبکه‌ای پیش رونده 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 (۲)

نشان داده شده است. مطابق شکل (۲) فرض گردیده است که سیستم فازی دارای ورودی α و β و یک خروجی با نام f است. برای چنین مدلی می‌توان قوانین معمولی را با در نظر گرفتن دو قانون فازی اگر-آنگاه بصورت زیر تعریف کرد:

{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 A_2 ، B_1 و B_2 به ترتیب توابع عضویت برای ورودی‌های α و β هستند و p_1 ، p_2 ، q_1 و q_2 پارامترهای تابع خروجی هستند. بنابراین در حالت، فرمول‌بندی ANFIS از یک آرایش شبکه عصبی پنج لایه پیشرو پیروی می‌کند.



شکل ۲- ساختار مدل ANFIS با دو ورودی و یک خروجی

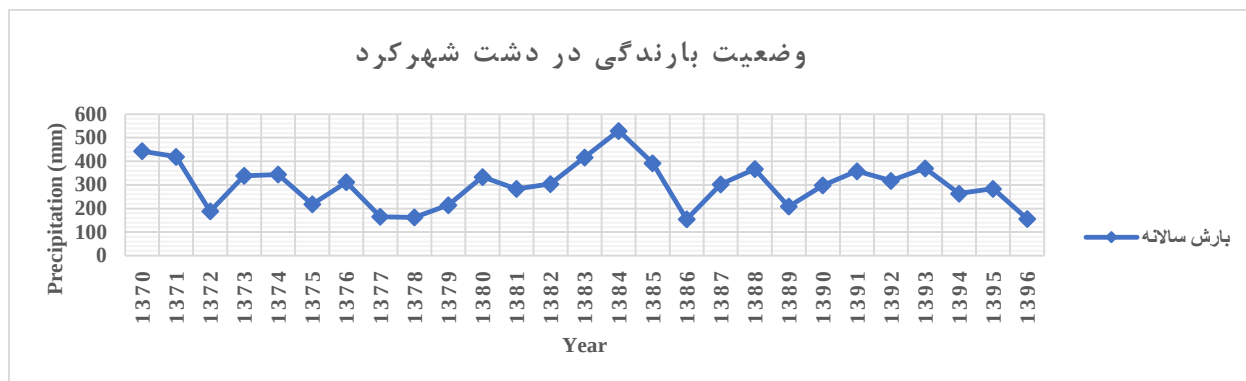
نتایج

وضعیت کنونی

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

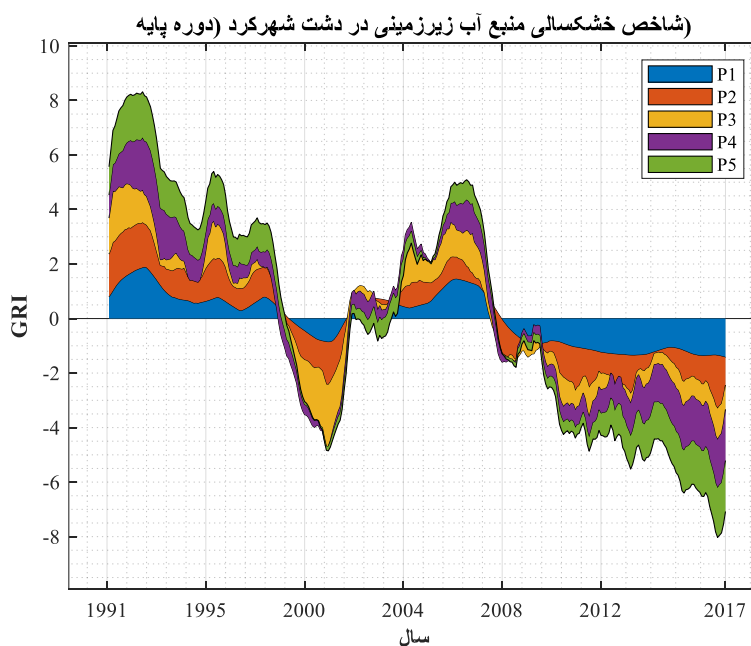
جدول ۲- بارندگی فصلی و سالانه (دوره پایه)

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



شکل ۳- تغییرات بارندگی در دشت شهرکرد (دوره پایه)

همچنین شاخص GRI در مقیاس ۱۲ ماهه در شکل (۴) نشان داده شده است.



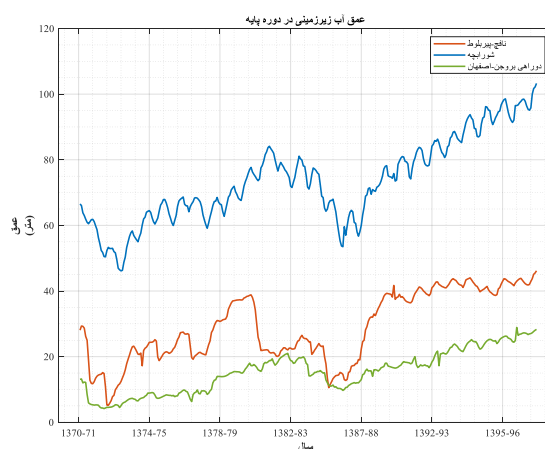
شکل ۴- شاخص GRI در مقیاس ۱۲ ماهه برای پنج پیزومتر منتخب در دوره پایه

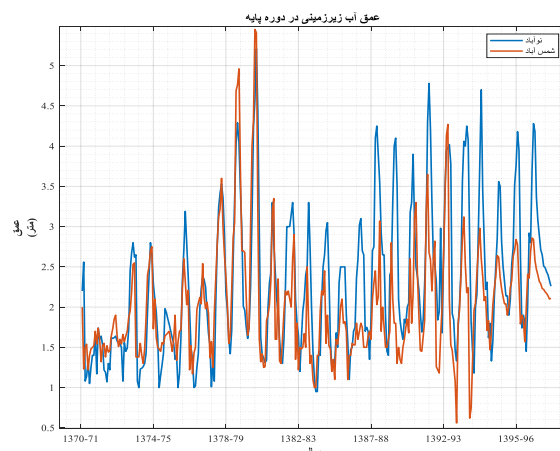
همچنین به منظور تعیین شرایط کنونی آب زیرزمینی در منطقه، از داده‌های عمق آب زیرزمینی پنج پیزومتر در سطح دشت که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) ارائه شد، استفاده شده است.

جدول ۳- موقعیت مکانی پیزومترهای انتخابی در دشت شهرکرد

پیزومترهای انتخابی			
شماره پیزومتر	نام	Lon	Lat
۱	نافج - پیر بلوط	50.74218	32.41652
۲	نواباد	50.82319	32.21293
۳	شمس آباد	50.84243	32.16127
۴	شورابچه	50.96821	32.2413
۵	دوراهی بروجن - اصفهان	51.0026	32.28729

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. همانطور که در شکل (۵) مشخص است، رفتار سه پیزومتر نافج-پیربلوط، شورابچه و دوراهی اصفهان بروجن که به ترتیب در شمال و شرق آبخوان قرار گرفته‌اند مشابه یکدیگر بوده و همگی آن‌ها دارای روند مشابه می‌باشند. در تمامی پیزومترهای نام برده شده با اینکه برداشت از آبخوان از سال آبی ۷۱-۱۳۷۰ تا ۹۷-۱۳۹۶ 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 ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۱-۱۳۸۰ رخ داده است که همین خشکسالی تاثیر خود را در افزایش عمق آب زیرزمینی نشان داده است و عمق آب زیرزمینی در منطقه در همین دوره بشدت افزایش یافته است و پیزومترها تا ۲۹ متر افزایش را نشان می‌دهند.





شکل ۵- عمق آب زیرزمینی در پنج پیزومتر انتخابی در دشت شهرکرد در دوره پایه

نتایج مدل‌های گردش عمومی (General Circulation Model)

به منظور بررسی خشکسالی و تاثیر تغییر اقلیم در این پژوهش از نتایج مدل‌های گردش عمومی جو CMIP6 (GCM) و دو سناریو گزارش ششم تغییر اقلیم که از ترکیب سناریو SSP1 با RCP2.6 و SSP5 با RCP8.5 استفاده شده است. به منظور تعیین تغییرات بارش ایران طی دو دوره نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۵۰) و دوره دور (۲۱۰۰-۲۰۵۱) در ایران و تعیین تاثیر تغییر اقلیم بر آبخوان دشت شهرکرد تا سال ۲۰۵۰ از نتایج مدل‌های GCM استفاده شده است. در همین راستا به منظور ارزیابی عملکرد ۱۰ مدل اقلیمی مورد استفاده که در شبیه‌سازی دوره آینده در دشت شهرکرد مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از مقایسه نتایج شاخص‌های اقلیمی نظیر روزهای خشک متوالی (CDD) و نمایه ساده شدت روزانه (SDII) برای دوره مشاهداتی و دوره تاریخی مدل‌ها استفاده شد که نتایج رتبه‌بندی مدل‌ها در هر یک از شاخص‌های نام برده شده در جدول (۴) مشخص شده است.

همانطور که در جدول (۷) 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 همین رو مدل GFDL-ESM4 به عنوان مدل برتر انتخاب گردیده تا از داده‌های آن برای شبیه‌سازی بارندگی در دشت کرد 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 همین رو صرفاً از داده‌های مدل GFDL-ESM4 در این پژوهش استفاده شده است.

جدول ۴- رتبه‌بندی مدل‌های GCM در شبیه‌سازی دوره پایه بر اساس شاخص‌های آماری

رتبه‌بندی مدل‌های اقلیمی از نظر عملکرد						
رتبه	مدل	IA	مدل	RMSE	مدل	BIAS
۱	GFDL-ESM4	0.51	GFDL-ESM4	0.41	IITM-ESM	32.01
۲	CanESM5	0.41	ACCESS-CM2	0.41	GFDL-ESM4	33.30

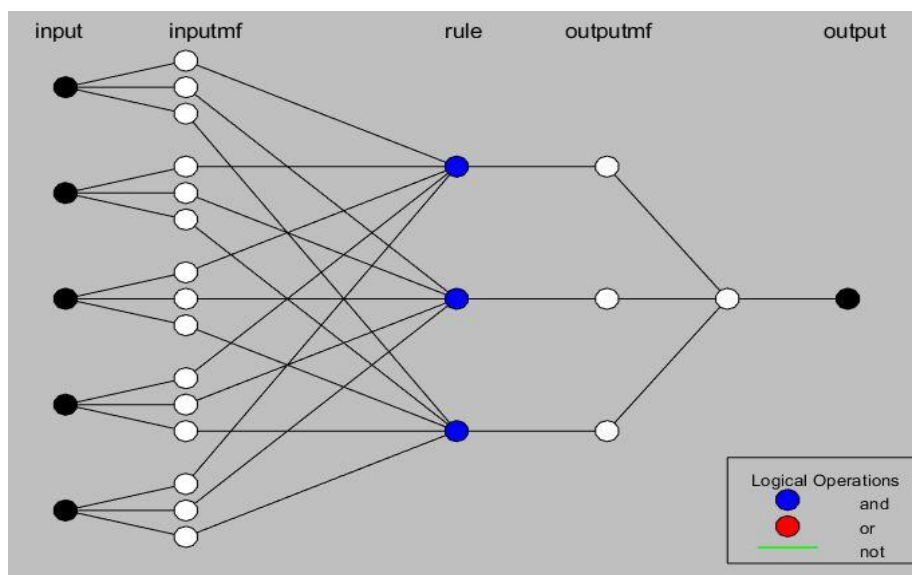


۳	FGOALS-g3	0.35	IITM-ESM	0.43	ACCESS-CM2	33.70
۴	ACCESS-CM2	0.35	CESM2-WACCM	0.46	CESM2-WACCM	36.03
۵	BCC-ESM1	0.32	BCC-ESM1	0.50	BCC-ESM1	39.57
۶	IITM-ESM	0.31	KACE-1-0-G	0.53	KACE-1-0-G	42.43
۷	KIOST-ESM	0.31	HadGEM3-GC31-MM	0.58	HadGEM3-GC31-MM	47.88
۸	HadGEM3-GC31-MM	0.31	CanESM5	0.59	CanESM5	48.78
۹	KACE-1-0-G	0.28	FGOALS-g3	0.61	FGOALS-g3	54.19
۱۰	CESM2-WACCM	0.23	KIOST-ESM	0.73	KIOST-ESM	65.28

نتایج مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

در ادامه به منظور تعیین تاثیر تغییر اقلیم بر آبخوان شهرکرد و تعیین تغییرات عمق آب زیرزمینی پیرومترهای منتخب تا سال ۲۰۵۰ از مدل ANFIS استفاده شد. 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 ۷۱-۱۳۷۰ الی ۹۷-۱۳۹۶، ۷۰ درصد به عنوان داده‌های بخش آموزش و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های بخش تست مدل انتخاب شدند. جهت مدلسازی ANFIS از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB بهره‌گیری شد. همچنین در راستای خوشه‌بندی داده‌های ورودی به منظور تسهیل محاسبات و افزایش دقت مدل، از روش خوشه‌بندی فازی (Fuzzy C-Means) استفاده شد. ساختار کلی مدل در شکل (۶) نمایش داده شده است.

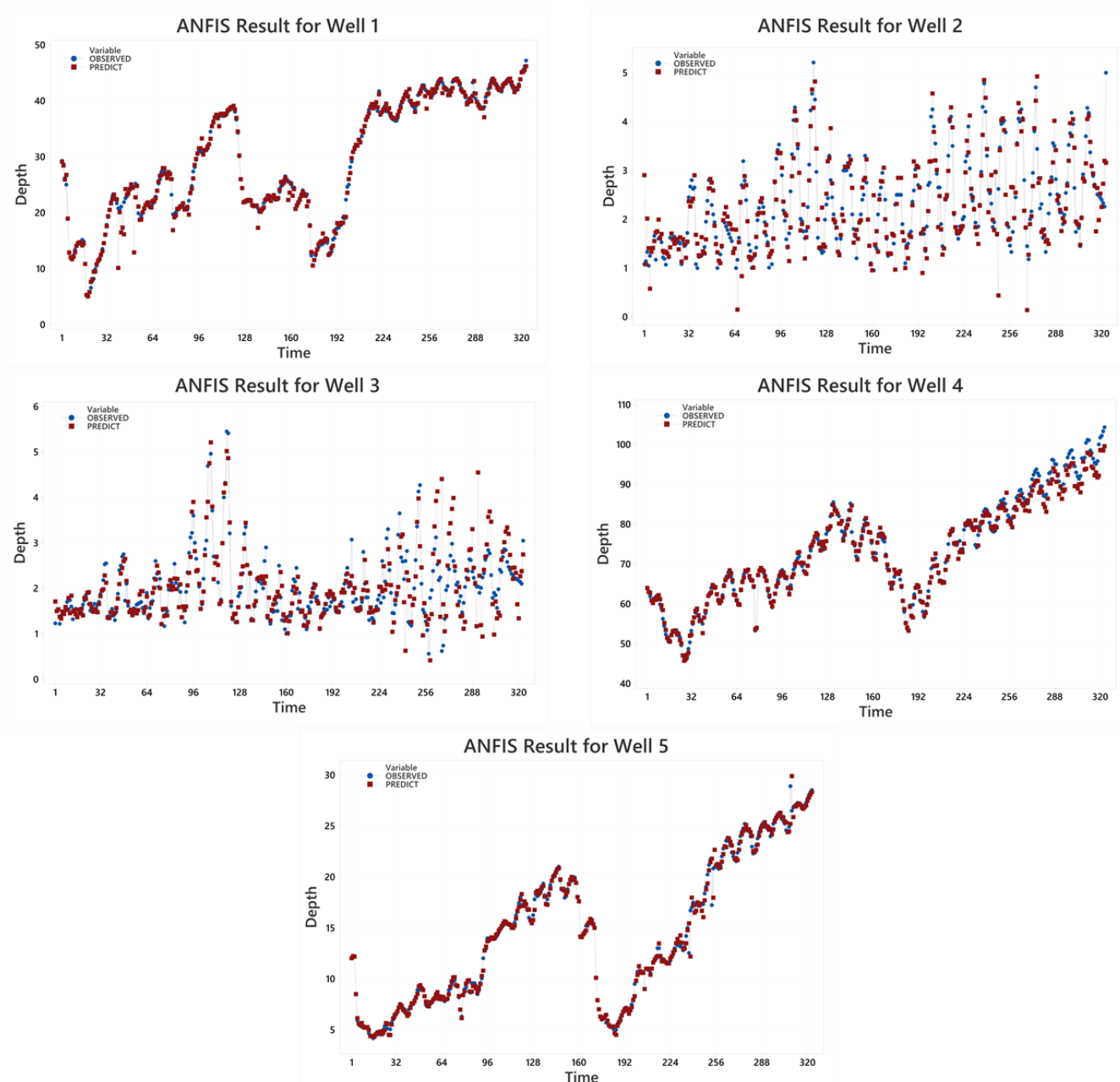
همچنین نتایج مدل ANFIS آموزش دیده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌های مشاهداتی در شکل (۷) و جدول (۵) نشان داده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل به خوبی قادر است دوره مشاهداتی را شبیه‌سازی کند و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. از همین رو مدل آماده شده است و می‌توان از آن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی در دوره آینده استفاده کرد. همانطور که در شکل (۷) 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 RMSE، R2 و MSE در مراحل TRAIN و TEST استفاده شده است که نتایج آن در جدول (۸) نشان داده شده است.



شکل ۶- ساختار مدل ANFIS در پیش‌بینی عمق آب زیرزمینی

جدول ۵- دقت مدل ANFIS در دوره آموزش و تست

ANFIS Results							
Station Name	Station ID	TRAIN			TEST		
		R2	RMSE	MSE	R2	RMSE	MSE
نافج - پیر بلوط	۱	0.99	0.91	0.85	0.99	1.44	2.08
نوآباد	۲	0.93	0.32	0.1	0.91	0.42	0.17
شمس آباد	۳	0.91	0.31	0.09	0.82	0.40	0.16
شورابچه	۴	0.99	1.26	1.59	0.99	1.49	2.22
دوراهی بروجن - اصفهان	۵	0.99	0.59	0.35	0.99	0.85	0.73



شکل ۷- سری زمانی تولید شده توسط مدل ANFIS در دوره پایه

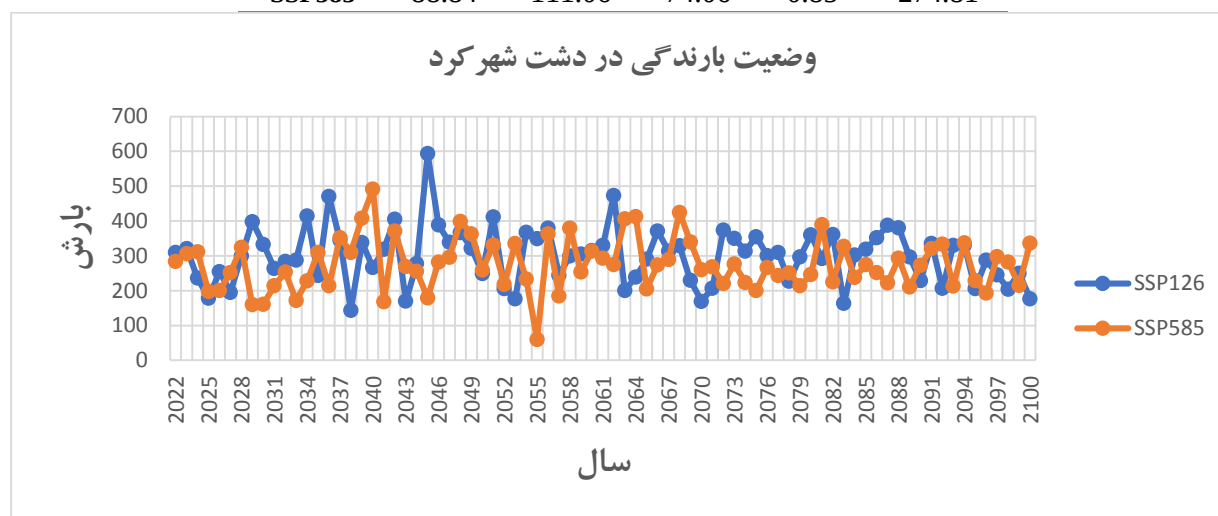
شرایط آینده

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 سناریو SSP126 (خوشبینانه) و SSP585 (بدبینانه) تا سال ۲۱۰۰ در شکل (۸) و جدول (۶) نشان داده شده است. طبق نتایج ذکر شده در جدول (۶) مشخص می‌شود که متوسط بارندگی

تحت سناریو SSP126 با افزایش و در سناریو SSP585 با کاهش روبرو می‌شود و از مقدار ۲۹۶/۱۵ به ترتیب به ۳۰۱/۰۵ و ۲۷۴/۸۱ افزایش و کاهش پیدا می‌کند.

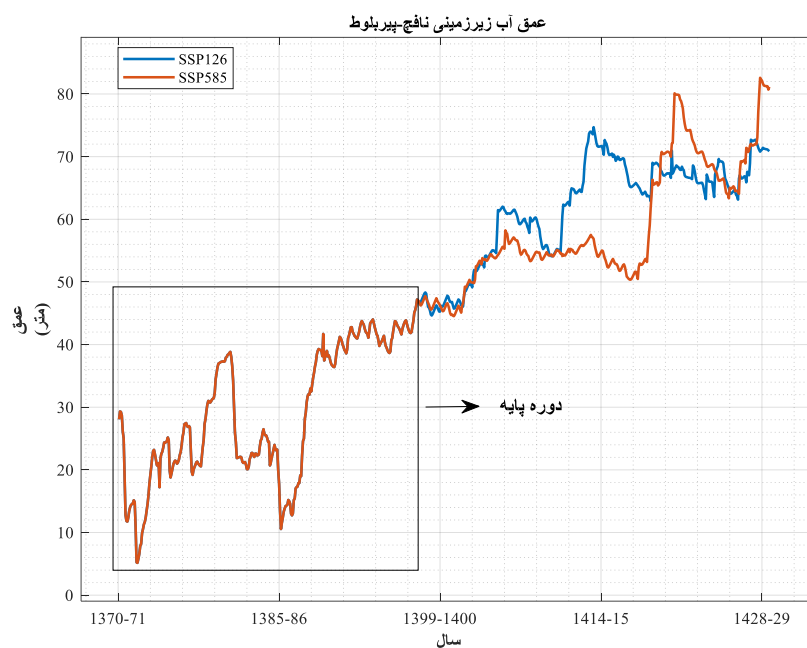
جدول ۶- وضعیت بارندگی در دوره آینده تحت دو سناریو SSP126 و SSP585

میانگین بارندگی دشت شهرکرد (mm)					
سالانه	تابستان	بهار	زمستان	پاییز	
SSP126	1.03	91.89	118.18	89.96	
SSP585	0.85	74.06	111.06	88.84	

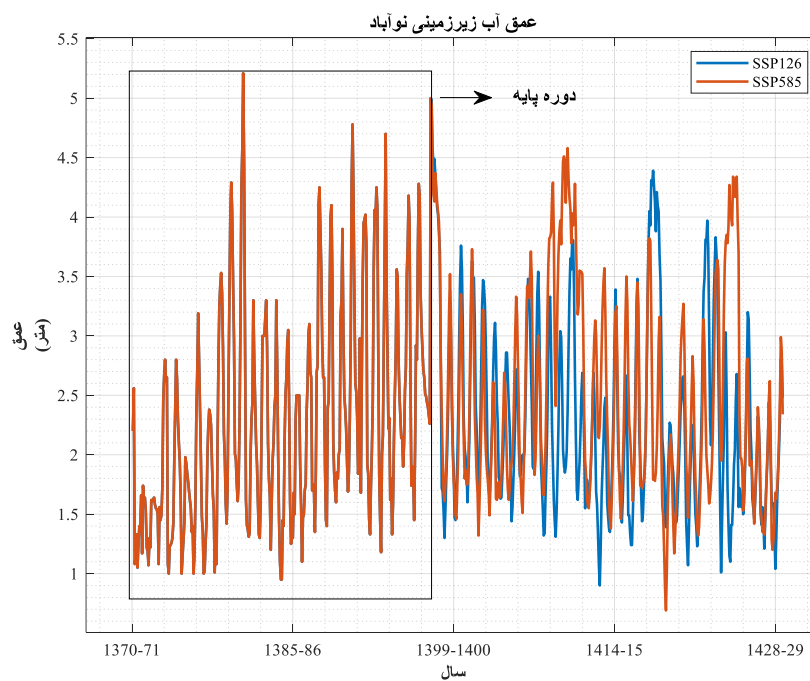


شکل ۸- بارندگی سالانه دشت شهرکرد تحت دو سناریو SSP126 و SSP585 تا سال ۲۱۰۰

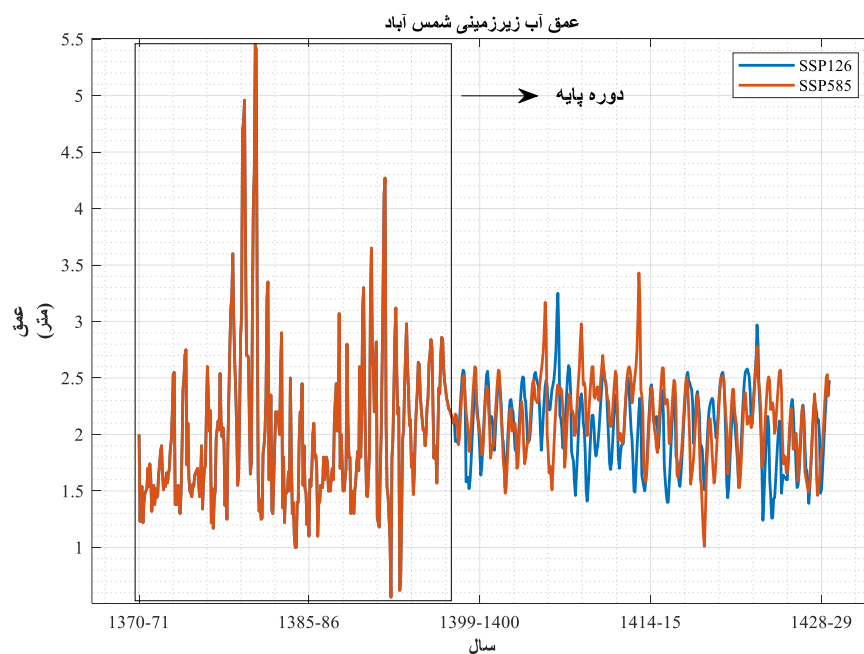
وضعیت هر پیزومتر تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل ANFIS پیش‌بینی شد که نتایج در شکل‌های (۹) تا (۱۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عمق آب زیرزمینی در پیزومتر ۱ (نافچ-پیربلوط)، از ۴۵ متر به ۷۰/۸۷ در سناریو SSP126 و ۸۱/۱۳ متری در سناریو SSP585 در سال ۲۰۵۰ می‌رسد که نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در این پیزومتر حداقل ۲۵/۸۷ و حداکثر ۳۶/۱۳ متر تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده می‌شود عمق آب زیرزمینی در پیزومترهای ۲ و ۳ (نواباد و شمس‌آباد) 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 هر دو سناریو خواهند داشت. برای پیزومتر شماره ۴ (شورابچه) عمق آب زیرزمینی از ۱۰۴ متر به ۱۴۱/۵۲ در سناریو SSP126 و ۱۴۳/۷۶ متری در سناریو SSP585 در سال ۲۰۵۰ می‌رسد که نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در این پیزومتر حداقل ۳۷/۵۲ و حداکثر ۳۹/۷۶ متر تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در پیزومتر ۵ (دوراهی اصفهان-بروجن) که دارای روند صعودی می‌باشد، به این روند ادامه می‌دهد و در سال ۲۰۵۰ برای سناریو SSP126 و SSP585 به ترتیب به ۴۶/۸۸ و ۵۴ متر خواهد رسید.



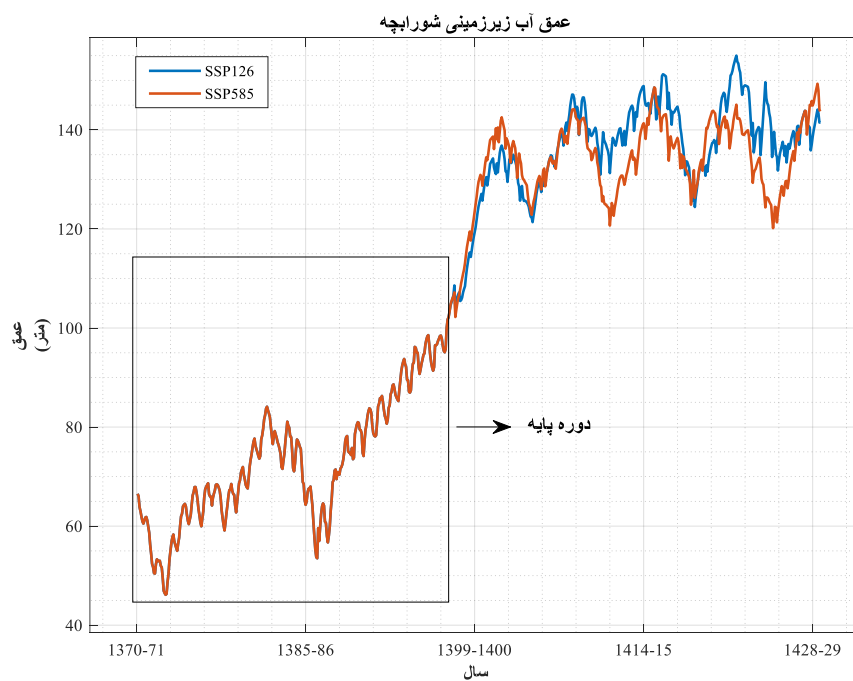
شکل ۹- عمق پیزومتر ۱ تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



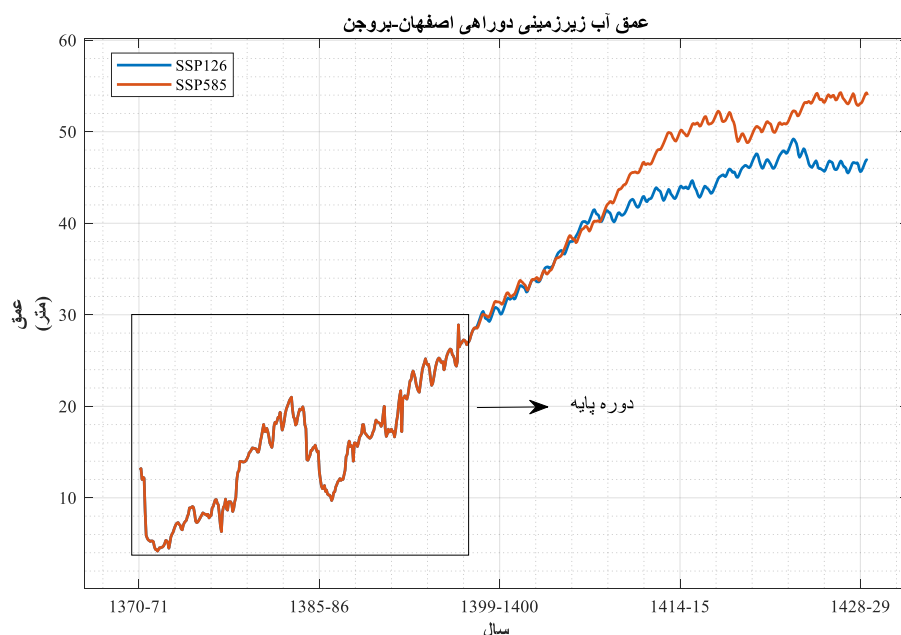
شکل ۱۰- عمق پیزومتر ۲ تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



شکل ۱۱- عمق پیزومتر ۳ تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585

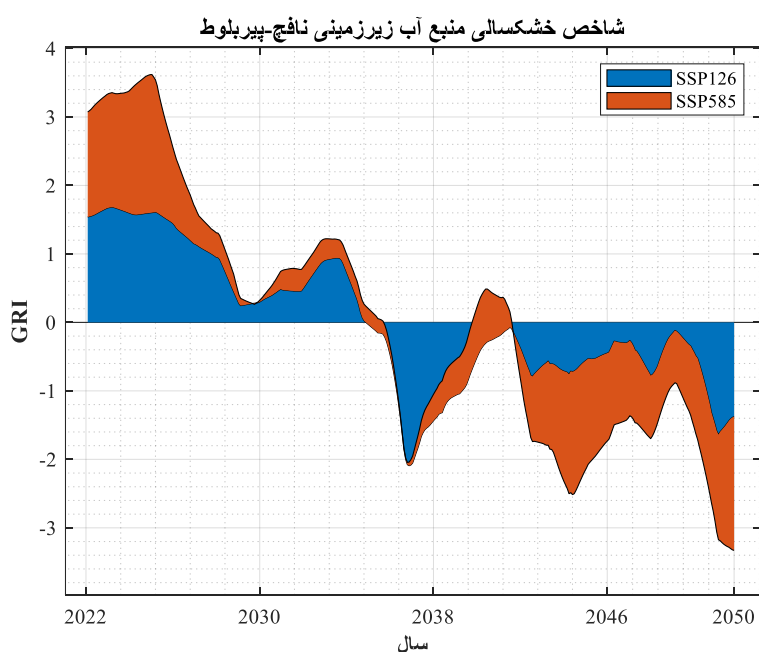


شکل ۱۲- عمق پیزومتر ۴ تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585

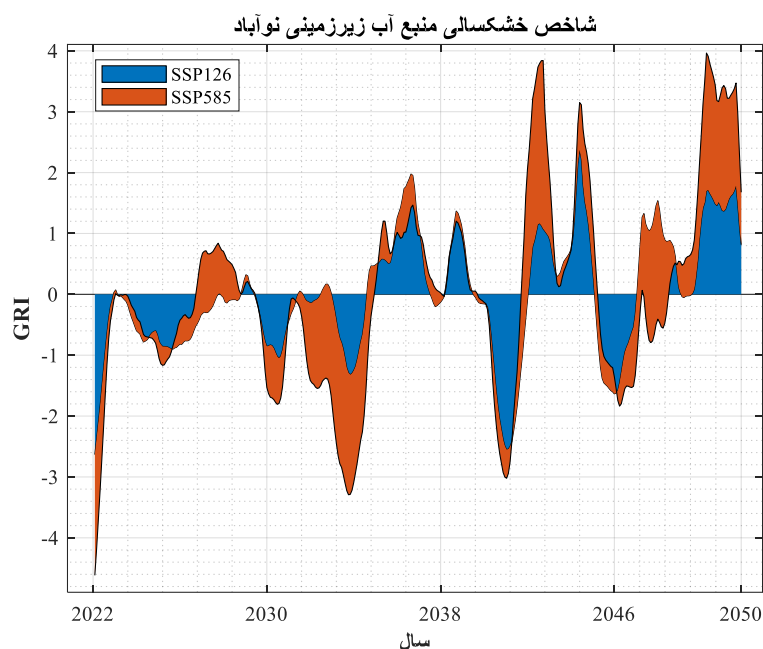


شکل ۱۳- عمق پیزومتر ۵ تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585

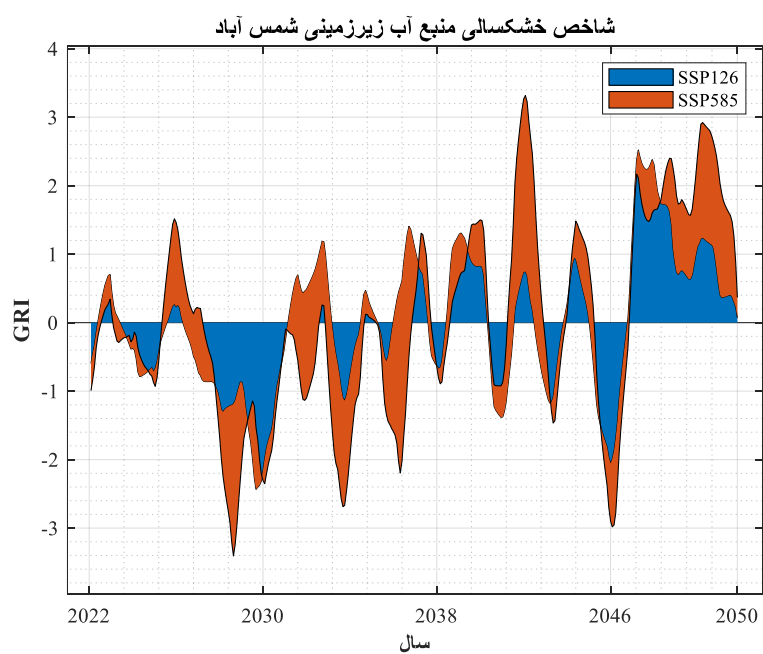
همچنین در شکل‌های (۱۴) تا (۱۸) شاخص خشکسالی GRI برای هر یک از پیزومترهای نام برده شده طی دوره ۲۰۵۰ تا ۲۰۲۲ نشان داده شده است.



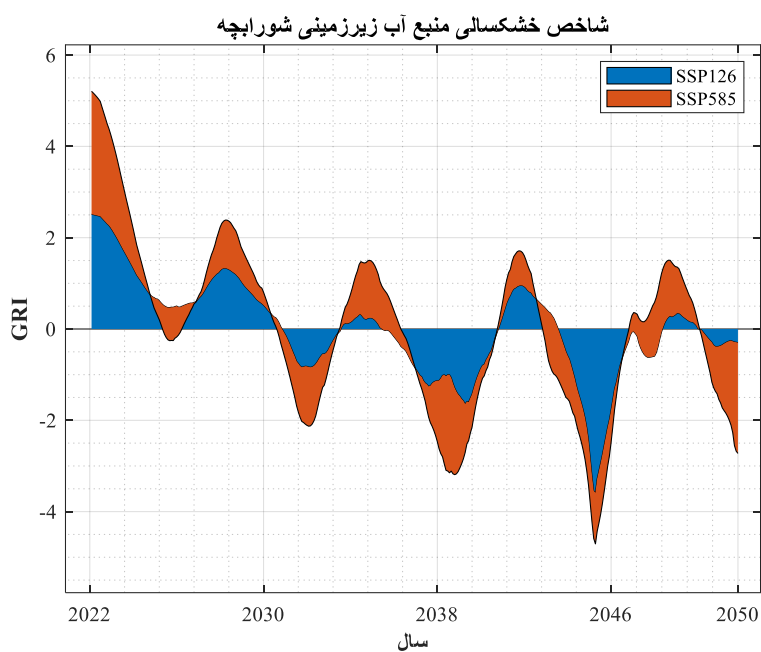
شکل ۱۴- شاخص GRI برای پیزومتر نافج-پیربلوط تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



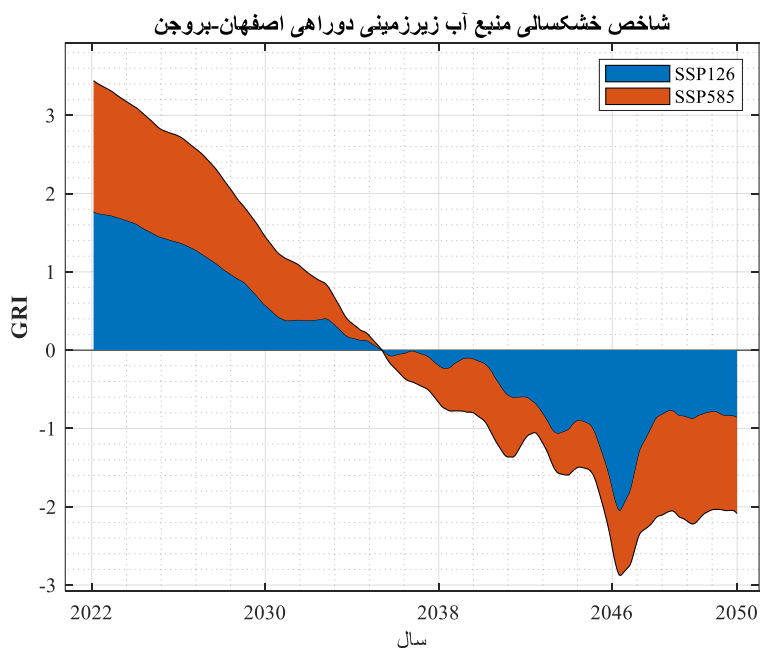
شکل ۱۵- شاخص GRI برای پیزومتر نوآباد تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



شکل ۱۶- شاخص GRI برای پیزومتر شمس آباد تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



شکل ۱۷. شاخص GRI برای پیژومتر شورابچه تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585



شکل ۱۸. شاخص GRI برای پیژومتر دوراهی اصفهان-بروجن تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو SSP126 و SSP585

نتیجه‌گیری



بطور کلی، نتایج این پژوهش را می‌توان در سه بخش خلاصه کرد: ۱- شرایط کنونی ۲- توسعه مدل‌ها ۳- شرایط آینده. با بررسی شرایط فعلی مشخص شد که دشت شهرکرد با میانگین بارندگی سالانه ۲۹۶,۱۵، از بارندگی بالاتری از متوسط بارندگی در ایران برخوردار است. همچنین مشخص شد در دوره آماری ۷۱-۱۳۷۰ تا ۹۷-۱۳۹۶، شدیدترین خشکسالی منطقه ۳۷ ماه دوام داشته و شدت آن ۴۵,۷۷ بوده است و در سال‌های آبی ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۱-۱۳۸۰ 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 ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۱-۱۳۸۰ که منطقه دچار شدیدترین خشکسالی بوده است، بیشترین نرخ را به خود اختصاص داده است به طوری که در پیرومتر ۱، عمق آب زیرزمینی ۲۹ متر افزایش یافته است. در ادامه با تعیین شرایط دوره پایه، به منظور پیش‌بینی دوره آینده، ۱۰ مدل GCM مورد بررسی قرار گرفت که از میان تمامی مدل‌ها، مدل GFDL-ESM4 به دلیل دقت بالا در پیش‌بینی دوره پایه، به عنوان برترین مدل انتخاب گردید و همچنین مشخص شد که نتایج این مدل به تنهایی از ترکیب تمامی مدل‌ها با یکدیگر از دقت قابل قبول‌تری برخوردار است. در ادامه با تعیین مدل GCM، مدل ANFIS با ساختار پنج ورودی شامل عمق پیرومتر در ماه فعلی و ماه گذشته، برداشت در ماه فعلی و بارندگی در ماه فعلی و گذشته به عنوان ورودی مدل و عمق پیرومتر در ماه آینده به عنوان تنها خروجی مدل انتخاب گردید 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 این رو پس از طراحی مدل ANFIS و آموزش آن با داده‌های مشاهداتی، مدل برای هر پنج پیرومتر بطور 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 (۲۰۲۲-۲۰۵۰) و دوره دور (۲۰۵۱-۲۱۰۰) تحت دو سناریو اقلیمی خوشبینانه (SSP126) و سناریو بدبینانه (SSP585) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد متوسط بارندگی سالانه در دشت شهرکرد تحت سناریو SSP126 افزایش و تحت سناریو SSP585 کاهش پیدا خواهد کرد و به ترتیب برابر با ۳۰۱/۰۵ و ۲۷۴/۸۱ خواهد شد. پس از پیش‌بینی بارندگی برای دوره آینده، بارندگی تحت دو سناریو خوشبینانه و بدبینانه 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 پیرومتر ۱ (نافج-پیرلوط)، از ۴۵ متر به ۷۰/۳۹ در سناریو SSP126 و ۶۶/۰۳ متری در سناریو SSP585، در پیرومتر ۴ (شورابچه) از ۱۰۴ متر به ۱۴۱/۵۲ در سناریو SSP126 و ۱۴۳/۷۶ متری در سناریو SSP585، در پیرومتر ۵ (دوراهی اصفهان-بروجن) از ۲۸/۳۱ به ۴۶/۸۸ و ۵۴ متر به ترتیب تحت سناریو SSP126 و SSP585 می‌رسد که نشان می‌دهد عمق آب زیرزمینی در شمال و شرق این آبخوان به روند افزایشی خود ادامه خواهد داد. همچنین مشاهده می‌شود عمق آب زیرزمینی در پیرومترهای ۲ و ۳ (نوآباد و شمس‌آباد) تغییر چندانی نخواهد داشت و رفتار آینده این پیرومترها مانند دوره مشاهداتی خواهد بود و همواره نوساناتی را بین عمق ۱ تا ۵ متر هر دو سناریو خواهند داشت و عمق آب زیرزمینی در جنوب آبخوان تغییرات به خصوصی را تا سال ۲۰۵۰ تجربه نخواهد کرد.

تشکر و قدردانی

از شرکت آب منطقه ای استان چهار محال و بختیاری که بخشی از هزینه های این تحقیق را تامین نموده اند، کمال تشکر را داریم.

منابع



- احمدی آخوهرمه، م.، و نوحه گر، ا.، و سلیمانی مطلق، م.، و طایبی سمیرمی، م. (۱۳۹۴). بررسی خشکسالی آب‌یرزمینی با استفاده از شاخص های SWI و GRI در آبخوان محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲۱(۶)، ۱۰۵-۱۱۸.
- اکرامی، م.، و فاتحی مرج، ا.، و برخوردار، ج. (۱۳۹۴). ارزیابی آسیب پذیری خشکسالی کشاورزی در اقلیم های خشک و نیمه خشک به کمک GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)؛ مطالعه موردی شهرستان تفت یزد. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲۰(۵)، ۱۰۷-۱۱۷.
- پایش تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی آب های زیرزمینی با استفاده از شاخص های GRI و SWI (مطالعه موردی: دشت ساری-نکا). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۷)، ۲۶۹-۲۷۹.
- خانمحمدی، وحید و رائی نظامی، سعید و فیضی، اتابک، ۱۳۹۸، روشهای متداول ریزمقیاس نمایی پارامترهای اقلیمی در بررسی اثرات تغییراقلیم بر منابع آبی، سومین همایش ملی مدیریت منابع آب نواحی ساحلی، ساری.
- خسروی دهکردی، ا.، و میرعباسی نجف آبادی، ر.، و صمدی بروجنی، ح.، و قاسمی دستگردی، ا. (۱۳۹۸). ارزیابی و پیش بینی خشکسالی های آب زیرزمینی با استفاده از شاخص GRI و مدل های زنجیره مارکف مرتبه اول تا سوم (مطالعه موردی: دشت بروجن). پژوهش های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۶(۲)، ۱۱۷-۱۳۶.
- رحیمی، داریوش، توفیق، صغری. (۱۳۹۸). سنجش دقت مدل های ریزمقیاس نمایی شده نسبت به داده های واقعی دمای کمینه روزانه در ایران. جغرافیای طبیعی، ۱۲(۴۵)، ۱-۱۴. روشن، س.، و حبیب نژاد روشن، م. (۱۳۹۷).
- سیحانی، ب.، و اصلاحی، م.، و بابائیان، ا. (۱۳۹۶). مقایسه روش های ریزمقیاس نمایی آماری مدل های تغییر اقلیم در شبیه سازی عناصر اقلیمی در منطقه شمال غرب ایران. پژوهشهای جغرافیای طبیعی (پژوهش های جغرافیایی)، ۴۹(۲)، ۳۰۱-۳۲۵.
- سنگین آبادی، حمید، ثقفیان، بهرام، دلاور، مجید. (۱۳۹۸). پایش و ارزیابی ویژگی های خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان های با بیلان منفی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۳)، ۱۵۵-۱۶۶.
- مصباح زاده، طیه، سلیمانی ساردو، فرشاد. (۱۳۹۷). ارزیابی الگوی زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژی در مناطق خشک و کویری (مطالعه موردی دشت بم). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۵(۲)، ۳۶۶-۳۷۷. doi:10.22092/ijrdr.2018.116848
- Afolayan, A., Ongoma, V., & Kooperman, G. J. (2021a). Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation over Eastern Africa. *Atmospheric Research*, 254(November 2020), 105509. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105509>
- Ama, N., Klutse, B., Quagrain, K. A., Nkrumah, F., & Quagrain, K. T. (2021). The Climatic Analysis of Summer Monsoon Extreme Precipitation Events over West Africa in CMIP6 Simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00203-y>
- Arunrat, N., Sereenonchai, S., Chaowiwat, W., Sereenonchai, S., & Chaowiwat, W. (2021). *Jo ur l P re of*.
- Ashraf, S., Aghakouchak, A., Nazemi, A., & Mirchi, A. (2018). *Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran*.
- Auer, C., Kriegler, E., Carlsen, H., Kok, K., Pedde, S., Krey, V., & Boris, M. (2021). *Climate change scenario services*: From science to facilitating action. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.015>
- Bhardwaj, K., & Mishra, V. (2021). Drought detection and declaration in India. *Water Security*, 14(August), 100104. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100104>



- 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.
- Bloomfield, J. P., Marchant, B. P., Bricker, S. H., & Morgan, R. B. (2015). Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4327-4344.
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Davini, P., Lavergne, C. De, Denvil, S., Deshayes, J., & Devilliers, M. (2018). *Presentation and Evaluation of the IPSL - CM6A - LR Climate Model Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 1–52. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>
- 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*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.10.011>
- 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.
- Hong, J., Javan, K., & Shin, Y. (2021). *Future Projections and Uncertainty Assessment of Precipitation Extremes in Iran from the CMIP6 Ensemble*. 1–16.
- HOSSEINZADEH, M., & NOHEGAR, A. (2011). STUDYING THE EFFECT OF DROUGHT ON WATER RESOURCES OVER TWO DECADES AND OCCURRENCES OF THE SINKING PHENOMENON IN MINAB PLAIN. *ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 9(1), 75-98. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=255328>
- 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.
- Javadinejad, S. (2020). *Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical and future droughts and their impact on groundwater*. 2(1), 71–83. <https://doi.org/10.25082/REIE.2020.01.003>
- Kamworapan, S., Thi, P., Thao, B., Gheewala, S. H., Pimonsree, S., & Prueksakorn, K. (2021). Heliyon Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon*, 7(August), e08263. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08263>
- 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(September), 100670. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100670>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100670>
- Kumar, R., Musuza, J. L., Loon, A. F. V., 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.
- Mechoso, C. R., Arakawa, A., & Angeles, L. (2015). General Circulation Models. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition* (Second Edition, Vol. 4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00157-2>
- Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., Bucci, P. Pietro, & Cs, R. (2008). *A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate*. 282–302.



<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005>

- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). Review paper A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- 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.
- Ritchie, M., Frazier, T., Johansen, H., & Wood, E. (2021). Early climate change indicators in the Arctic: A geographical perspective. *Applied Geography*, 135(September), 102562. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102562>
- Salem, M., & 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(November 2021), 105908. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105908>
- Schreiner-mcgraw, A. P., & Ajami, H. (2021). *Delayed response of groundwater to multi-year meteorological droughts in the absence of anthropogenic management*. 603(August).
- Sharafi, L., Zarafshani, K., Keshavarz, M., Azadi, H., & Passel, S. Van. (2020). Drought risk assessment: Towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran. *Ecological Indicators*, 114(December 2018), 106276. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106276>
- Shing, S., Karlsson, I., & Karsten, H. (2021). *Climate change impacts and uncertainty on spatiotemporal variations of drought indices for an irrigated catchment*. 601(August).
- 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*. 601(February).
- Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., & Von, K. (2019). *The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3)*. 5, 4823–4873.
- Trambauer, P., Maskey, S., & Werner, M. (2014). *Identification and simulation of space – time variability of past hydrological drought events in the Limpopo River basin , southern Africa*. October. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2925-2014>
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., Le, M., Carmen, M., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Cindrić, K., Davi, H., Dupuy, J., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-stpaul, N., ... Polcher, J. (2020). *Earth-Science Reviews Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios*. 210(August).
- 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>
- Van Lanen, H. A. J. (2006). Drought propagation through the hydrological cycle. *IAHS Publication*, 308, 122.
- Venturini, A. (2021). *Jou. International Review of Financial Analysis*, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2021.101934>
- Wanders, N., van Lanen, H. A., & van Loon, A. F. (2010). Indicators for drought characterization on a global scale



- (No. 24). Wageningen Universiteit. 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.
- 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(February), 126091. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126091>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
- 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. 252(February).
- Yucel, I., & Duzenli, E. (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. 256(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>
- Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M., Khosroshahi, M. (2020). Spatiotemporal variations of groundwater drought indices, Case study: Zohreh- Jarrahi watershed. *Hydrogeology*, 4(2), 108-130.
- Zarrin, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. 643–660.
- Zhang, G., Su, X., Singh, V. P., & Ayantobo, O. O. (2021). *Journal of Hydrology*: Regional Studies Appraising standardized moisture anomaly index (SZI) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios. 37(August).
- Zhao, X., Huang, G., Li, Y., Lin, Q., Jin, J., & Lu, C. (2021a). Projections of meteorological drought based on CMIP6 multi-model ensemble: A case study of Henan Province , China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 243(August), 103887. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103887>