

پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های فراتکاملی (مطالعه موردی: دشت ریز - بوشهر)

سیده فهیمه تقوایی^۱، خسرو حسینی^{۲*} و سید علی اصغر هاشمی^۳

چکیده

ارزیابی کمیت آب‌های زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آب دارد. به‌کارگیری روش‌های نوین، از جمله الگوریتم‌های فراتکاملی در تخمین تغییرات تراز سفره‌های آب زیرزمینی به‌دلیل سرعت، همگرایی و کارایی بسیار بالای خود، موجب صرفه‌جویی، کاهش هزینه‌ها و مدیریت هرچه بهتر می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی تغییرات تراز سفره آب زیرزمینی دشت ریز در استان بوشهر در جنوب ایران در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. بدین‌منظور از خروجی مدل MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های در دسترس CMIP6 تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5 برای دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) استفاده شد. پس از شبیه‌سازی، ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل Lars WG-v6 انجام شد. به‌منظور پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی از مدل‌های مبتنی بر الگوریتم‌های کپک مخاطی-رگرسیون بردار پشتیبان (SMA-SVR) و هم‌چنین الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به‌تنهایی استفاده شد. نتایج بررسی تغییر پارامترهای اقلیمی در ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از سناریوی انتشار SSP5-8.5 بیان‌گر آن است که در دوره‌های آینده دما نسبت به دوره پایه افزایش و مجموع بارندگی سالانه در دوره آینده نسبت به دوره پایه ۱۷/۱ میلی‌متر کاهش خواهد داشت. ارزیابی هیدروگراف آب زیرزمینی دشت ریز نشان‌دهنده آن است که افت سطح ایستابی در دوره آینده ۰/۷۸ متر بر سال خواهد بود که در مقایسه با افت سطح ایستابی در دوره پایه که ۰/۷۵ متر در سال است، شدت بیشتر افت سطح ایستابی در آینده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، الگوریتم کپک مخاطی (SMA)، تغییر اقلیم، دشت ریز، هیدروگراف آب زیرزمینی

ارجاع: تقوایی ف. حسینی خ. و هاشمی ع.ا. ۱۴۰۳. پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های فراتکاملی (مطالعه موردی: دشت ریز - بوشهر). مجله پژوهش آب ایران. ۵۳: ۴۸-۳۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14484.2548>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- استاد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران.

* نویسنده مسئول: khhoseini@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

مقدمه

(ANN) به ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی در ناحیه یودویی (Udupi) در ایالت کارناتاکا (Karnataka) در کشور هندوستان پرداختند. نتایج این تحقیق حکایت از دقت بهتر مدل ترکیبی الگوریتم بهینه‌یاب شیر-حافظه طولانی کوتاه‌مدت در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی و هم‌چنین الگوریتم حافظه طولانی کوتاه‌مدت به‌تنهایی دارد.

در این تحقیق از مدل پیش‌بینی اقلیمی MRI-ESM2-0 پیشنهاد شده توسط (Zarrin and Dadashi, 2020) به‌عنوان مدل منتخب برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در پهنه اقلیمی ایران و سناریوهای انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب تحت اثر دسته‌ی واداشت متوسط و زیاد به‌منظور ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی دوره آینده برای پارامترهای دما و بارش ایستگاه سینوپتیک جم بهره گرفته شده است. به‌منظور انجام عمل ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی (تبدیل داده‌های بزرگ‌مقیاس پیش‌بینی اقلیمی به مقیاس محلی و منطقه‌ای) از نرم‌افزار LARS-WG نسخه ۶ استفاده شده است (Heshmati and Etedali, 2021).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در این تحقیق دشت ریز واقع در شهرستان جم در فاصله ۲۶۵ کیلومتری بوشهر (مرکز استان) و ۲۵ کیلومتری خلیج فارس است (شکل ۱). حوضه آبریز دشت ریز بین طول‌های جغرافیایی $52^{\circ}00'$ تا $52^{\circ}18'$ شرقی و عرض‌های $27^{\circ}49'$ تا $27^{\circ}07'$ شمالی قرار گرفته است (Abbasi et al., 2016).

داده‌های هواشناسی و آب زیرزمینی مورد استفاده

در تحقیق

اطلاعات هواشناسی موردنیاز این تحقیق از ایستگاه سینوپتیک جم طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ گردآوری شده است.

درحال حاضر منابع آب زیرزمینی بخش عمده‌ای از مصارف را تأمین می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که ۳۶ درصد مصارف شرب، ۴۲ درصد بخش کشاورزی و ۲۷ درصد مصارف صنعتی از این منابع تأمین می‌شود (Abbas Novinpour et al., 2021). تغییر اقلیم به‌دلیل گرمایش هوا و افزایش تبخیر و تعرق از منابع آب سطحی و هم‌چنین افزایش تقاضای مصرف آب از یک طرف و کاهش در میزان بارندگی و تغذیه منابع آب زیرزمینی از طرف دیگر موجب شده تا تنش به منابع آب زیرزمینی افزایش یافته که این امر منجر به افت سطح آب آبخوارها شده است (Mortezaii et al., 2020). گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، حاکی از رخ‌دادن پدیده تغییر اقلیم طی دهه‌های اخیر در ایران بوده است. هم‌چنین پیش‌بینی‌ها، بیان‌گر شدت بیشتر وقوع و پیامدهای آن در آینده است (Danshgar et al., 2021).

کاستی‌ها و محدودیت‌های مدل‌های گزارش پنجم^۱ از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی به همراه خطای سیستماتیک، مشکل در تعیین منافع و هزینه‌های هر یک از عملیات کاهش‌ی به‌طور مجزا و عدم تمرکز روی علوم خاص منتج به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت‌شده درون مقیاس‌های گزارش ششم توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ شده است (O'Neill et al., 2016). نسخه نهایی طراحی مدل‌های گزارش ششم توسط دو کارگروه CMIP^۳ و کارگروه جفت‌شده WGCM^۴ در اکتبر سال ۲۰۱۴ نهایی و مقرر شد قبل از پایان سال ۲۰۲۲ نتایج کامل و مدل‌های متنوعی منتشر شود (Ansari et al., 2022). به‌منظور پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی در این تحقیق از راه‌حل الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی و رگرسیون بردار پشتیبان (SMA-SVR) بهره گرفته شده است که تحقیقات فراوانی در این زمینه نیز صورت گرفته است.

(Supreetha et al., 2020) با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌یاب شیر (LO)، حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) و نیز شبکه‌های عصبی مصنوعی

¹ Coupled Model Inter Comparison Phase 5 (CMIP5)

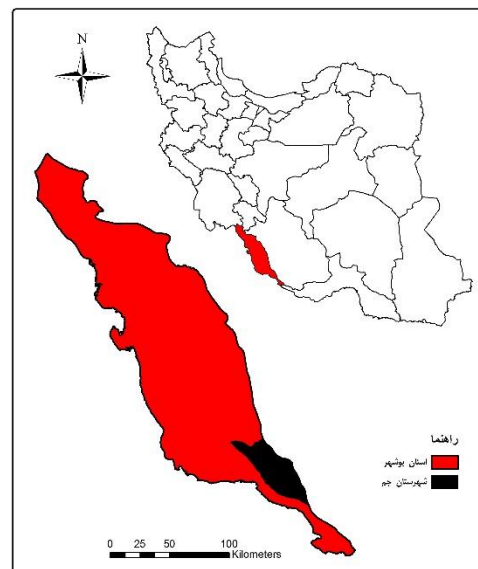
² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

³ Coupled Model Intercomparison Project Phase

⁴ Working Group of Couple Modeling

جدول ۱- مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای دشت ریز اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای استان بوشهر

شماره چاه	نام محل	UTM		تراز نسبت به سطح دریا (متر)	سطح پلیگون (کیلومتر مربع)
		Y	X		
۱	تنگ	۳۰۹۵۴۴۳	۶۱۳۱۴۶	۴۳۲/۸۳	۵/۱۵
۲	تل	۳۰۹۷۸۰۲	۶۰۹۹۹۵	۳۹۱/۷۷	۵/۱۳
۳	سعادت	۳۰۹۹۱۵۰	۶۰۸۰۹۴	۳۸۳/۴۱	۳/۶۷
۴	انارستان	۳۱۰۱۷۸۱	۶۰۳۸۳۲	۳۴۲/۳۱	۲/۹۶
۵	ریز	۳۱۰۴۴۳۰	۶۰۵۸۱۶	۳۵۳/۲۱	۲/۲۸
۶	ریز	۳۱۰۲۴۴۳	۶۰۶۶۲۷	۳۴۱/۴۷	۴/۴۴
۷	تشان	۳۱۰۳۰۴۲	۶۰۹۳۰۱	۳۶۹/۹۲	۲/۰۳
۸	تشان	۳۱۰۱۶۹۳	۶۰۹۸۵۳	۳۶۹/۲۰	۴/۹۴
۹	حرمیک	۳۱۰۰۳۱۲	۶۱۲۳۷۹	۳۹۸/۴۰	۲/۸۶
۱۰	جاده	۳۰۹۹۱۳۱	۶۱۱۳۱۲	۳۸۸/۹۷	۳/۵۷
۱۱	انارستان	۳۱۰۰۹۰۰	۶۰۷۷۶۶	۳۵۵/۳۷	۳/۷۷
۱۲	پشتو	۳۱۰۳۵۹۵	۶۰۴۴۸۶	۳۳۵/۶۹	۱/۹۵
۱۳	حرمیک	۳۰۹۹۸۴۰	۶۱۳۷۹۷	۴۱۷/۹۳	۱/۸۴
۱۴	ریز	۳۱۰۴۰۴۵	۶۰۷۹۳۲	۳۷۳/۷۳	۱/۶۱
۱۵	انارستان	۳۱۰۰۲۶۳	۶۰۶۱۱۵	۳۶۱/۰۲	۳/۶۴
۱۶	گندمزار	۳۰۹۳۶۶۳	۶۱۵۲۳۲	۴۵۵/۶۱	۲/۳۶



شکل ۱- موقعیت استان بوشهر و شهرستان جم در کشور

بازسازی داده‌های گمشده این ایستگاه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک بندر دیر و عسلویه که در مجاورت ایستگاه جم قرار دارند و بهره‌گیری از روش تفاضل و نسبت‌ها انجام شده است. اطلاعات موردنیاز برای ترسیم هیدروگراف آب زیرزمینی در این تحقیق از اندازه‌گیری سطح آب ۱۶ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت ریز و ارقام ترازبایی چاه‌های مذکور از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰ از شرکت آب منطقه‌ای بوشهر گردآوری شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور تصویرسازی تغییرات اقلیم در دوره‌های آینده، مدل‌های سه‌بعدی جفت‌شده‌ی گردش عمومی اقیانوس^۱ در دسترس‌ترین ابزارهای ممکن هستند. به‌دلیل وابستگی اثرات تغییر اقلیم به نتایج مدل‌ها و سناریوهای انتشار اقلیمی دستیابی به تصویرسازی مطلوب‌تر در دوره آینده با استفاده از مدل‌های اقلیمی ارائه‌شده در گزارش ششم^۲ به سبب دقت بیشتر امکان‌پذیر می‌شود (Eyring et al., 2016; Stouffer et al., 2016).

نسخه نهایی طراحی مدل‌های گزارش ششم توسط دو کارگروه CMIP و کارگروه مدل‌های جفت‌شده WGCM در اکتبر سال ۲۰۱۴ تهیه شد. در این گزارش هشت سناریو با عنوان خط سیر توسعه اقتصادی-اجتماعی در دو گروه ارائه شده‌اند.

گروه اول شامل سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است که به‌ترتیب سناریوهای به‌روزرسانی‌شده RCP4.5، RCP8.5 و RCP2.6 گزارش پنجم هستند. سناریوی SSP1-2.6 کمترین میزان واداشت تابشی و پایدارترین کاربری اراضی در دوره آینده و SSP5-8.5 بیشترین واداشت تابشی و آسیب‌پذیرترین سیاست‌های اقتصادی-اجتماعی را تصویر می‌کنند (Rogelj et al., 2018; Sharafati et al., 2020).

در گروه دوم دو سناریوی کاهشی به‌منظور برون‌داد واداشت نسبتاً کم و یک سناریو به‌منظور محدودکردن افزایش متوسط دمای جهانی به زیر ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزوده شده‌اند (O'Neill et al., 2016).

در این تحقیق از مدل پیش‌بینی اقلیمی MRI-ESM2-0 به‌دلیل پیشنهاد (Zarrin and Dadashi, 2020) که

^۱ AOGCM

^۲ Coupled Model Inter Comparison Phase 6 (CMIP6)

در رابطه (۱)، x بردار ورودی، w وزن بردار و b میزان اختلال است. تابع $f(x)$ همواره می‌بایست به گونه‌ای تعیین شود که به‌طور همزمان میزان کمترین انحراف (ϵ) تعیین شده و همچنین مقدار مناسب w را اختیار کند.

الگوریتم فراتکاملی بهینه‌ساز کپک مخاطی

الگوریتم بهینه‌ساز کپک مخاطی یک الگوریتم فراابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت است که توسط Chen et al. (2014) با الهام از رفتار هوشمندانه نوعی کپک به نام کپک مخاطی ارائه شده است (Taheri, 2022). این نوع کپک فاقد مغز بوده؛ لیکن به شکل عجیبی می‌تواند رفتار هوشمندانه‌ای انجام دهد و در مسیرهای پر پیچ و خم مسیر خود را پیدا کند. همچنین آنان می‌توانند به دقت در تغذیه خود تعادل برقرار کرده و کیفیت غذا و ریسک آن را بسنجند (Taheri, 2022). در این الگوریتم به‌منظور تعیین موقعیت تصادفی اولیه کپک‌ها یا ویژگی‌ها یعنی $x_{i,k}$ از رابطه (۳) بهره گرفته می‌شود:

$$x_{i,k} = lb + \text{rand}(0,1) \times (ub - lb) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، lb و ub به ترتیب حد بالا و حد پایین برای هر راه‌حل یا هر ویژگی منتخب است. در ادامه مقدار تابع برازندگی برای همه کپک‌ها محاسبه و آن کپکی که بیشترین مقدار تابع برازندگی را داشته باشد، به‌عنوان معیار قرار می‌گیرد و موقعیت مربوط به آن که به‌صورت \vec{X}^* نشان داده می‌شود، به‌عنوان ویژگی موردنظر انتخاب می‌شود. کپک مخاطی برای نزدیک شدن به طعمه و مسیریابی آن از بوی آن، که در هوا پخش می‌شود، استفاده می‌کند (Taheri, 2022). رابطه (۴) رفتار مسیریابی کپک مخاطی را براساس بوی طعمه توصیف می‌کند:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (\vec{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، \vec{vb} پارامتری است که در بازه $[-a, a]$ واقع شده است، \vec{vc} پارامتری است که به‌طور خطی از ۱ به صفر کاهش می‌یابد، t نشان‌دهنده تکرار فعلی است، $\vec{X}_b(t)$ نشان‌دهنده موقعیت کپک مخاطی در تکرار t ام با

به‌عنوان مدل منتخب برای پیش‌بینی تغییرات در پهنه اقلیمی ایران پیشنهاد شده است، استفاده شد.

پیش‌بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی

به‌منظور مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی آگاهی از تغییرات مکانی-زمانی سطح ایستابی و لزوم پیش‌بینی و مدل‌سازی آن‌ها به‌منظور شناخت بهتر واکنش آبخوان نسبت به فعالیت‌های طبیعی و انسانی، امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد (Zeinalie et al., 2020). در این راستا طیف وسیعی از مدل‌ها شامل مدل‌های عددی مبتنی بر فیزیک مسئله، مدل‌های سری زمانی و فرامدل‌های هوشمند (جعبه سیاه) و ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی (به‌ویژه نوع فراابتکاری) کاربرد زیادی در علوم هیدرولوژی و هیدروژئولوژی پیدا کرده‌اند (Zeinalie et al., 2020). در این تحقیق، به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر تغییرات سطح ایستابی آبخوان دشت ریز از الگوریتم فراتکاملی کپک مخاطی^۱ و به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات آن از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان^۲ (SVR) استفاده شده است. نتایج حاصل از این راه‌حل ترکیبی با نتایج حاصل از به‌کارگیری رگرسیون بردار پشتیبان به‌تنهایی مقایسه شده است.

ماشین بردار پشتیبان

ماشین‌های بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مقید هستند که از اصل استقرای حداقل‌سازی خطای ساختاری استفاده می‌کنند و منجر به ارائه یک جواب بهینه کلی می‌شوند (Shahi Nejad and Dehghani, 2017). در یک الگوریتم خطی‌سازی به کمک ماشین بردار پشتیبان با فرض مقادیر ورودی x_i و مقادیر خروجی y_i هدف یافتن تابعی است که کمترین میزان انحراف (ϵ) را از y_i ها داشته باشد. اگر داده‌های آموزش به‌صورت k سری به شکل (x_k, y_k) باشند تابع خطی‌سازی مربوط به‌صورت روابط (۱) و (۲) قابل بیان است.

$$f(x) = (w, x) + b \quad (1)$$

$$\text{with } (w, x) \in R^N, b \in R \quad (2)$$

¹ Slime Mould Algorithm

² Support Vector Regression

در رابطه (۱۰)؛ LB و UB به ترتیب حد پایین و حد بالای بازه جست‌وجو است، rand و r به‌طور تصادفی در بازه [0, 1] تعیین می‌شوند و مقدار z در آزمایش تنظیم پارامتر مورد بحث قرار خواهد گرفت؛ بنابراین این روند تا زمانی که شرط توقف برقرار باشد، تکرار می‌شود. سپس خروجی \vec{X}^* که نشان‌دهنده موقعیت ویژگی‌های بهینه است، به‌دست می‌آید (Taheri, 2022).

ارزیابی نتایج عملکرد مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد و صحت‌سنجی مدل‌ها بنا بر پیشنهاد (Khosravi et al. (2014) از سه کمیت ضریب تبیین^۱ (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و میانگین مطلق خطا^۳ (MAE) استفاده شده است. روابط (۱۱) تا (۱۳) شاخص‌های صحت‌سنجی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)(X_p - \bar{X}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)^2 \sum_{i=1}^n (X_p - \bar{X}_p)^2}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_0 - X_p)^2}{n}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_0 - X_p|}{n} \quad (13)$$

در روابط (۱۱) تا (۱۳)؛ X_0 و X_p ، به ترتیب مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در همان زمان، \bar{X}_0 و \bar{X}_p میانگین مقادیر داده‌های مشاهداتی و داده‌های پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌های مورد بررسی هستند.

نتایج و بحث

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پارامترهای

هواشناسی منطقه

نتیجه ارزیابی سناریوی انتشار سازگار با تغییرات اقلیمی ایستگاه سینوپتیک جم با استفاده از برخی شاخص‌های قضاوت آماری در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند تغییرات اقلیمی ایستگاه جم تطابق بیشتری با سناریوی انتشار SSP5-8.5 داشته است.

نتیجه ارزیابی خروجی مدل اقلیمی MRI-ESM2-0 براساس سناریوی انتشار SSP5-8.5 در این بخش ارائه

بیشترین غلظت بوی موجود در محیط است، $\vec{X}(t)$ ، نشان‌دهنده موقعیت کپک مخاطی در تکرار tام است، $\vec{X}(t+1)$ موقعیت بعدی کپک مخاطی در تکرار t است، $\vec{X}_A(t)$ و $\vec{X}_B(t)$ نشان‌دهنده دو موقعیت تصادفی انتخاب‌شده از کپک مخاطی است و \vec{W} نشان‌دهنده وزن کپک مخاطی است. مقدار p با استفاده از رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad (5)$$

در رابطه (۵)؛ $i=1, 2, \dots, n$ نشان‌دهنده تعداد سلول‌های موجود در کپک مخاطی است، $S(i)$ نشان‌دهنده مقدار برازندگی $\vec{X}(t)$ است و DF نشان‌دهنده بهترین برازندگی به‌دست‌آمده طی همه تکرارها است. $\vec{v}b$ از روابط (۶) و (۷) به‌دست می‌آید:

$$\vec{v}b = [-a, a] \quad (6)$$

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{\max t}\right)\right) + 1 \quad (7)$$

هم‌چنین \vec{W} با استفاده از رابطه (۸) به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} W(\text{SmellIndex}(i)) = & \begin{cases} 1 + r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF}\right) + 1, \text{ condition} \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF}\right) + 1, \text{ others} \end{cases} \quad (8) \\ \text{SmellIndex} = & \operatorname{sort}(S) \quad (9) \end{aligned}$$

در رابطه (۸)، condition برابر است با $S(i)$ که در نیمه اول جمعیت قرار دارد، r نشان‌دهنده یک مقدار تصادفی در بازه [0, 1] است، bF نشان‌دهنده برازندگی بهینه به‌دست‌آمده در تکرار فعلی است، wF نشان‌دهنده بدترین مقدار برازندگی به‌دست‌آمده در تکرار فعلی است و SmellIndex نشان‌دهنده توالی مقادیر برازندگی مرتب شده است (به‌صورت صعودی). هم‌چنین موقعیت کپک‌های مخاطی با استفاده از رابطه ۱۰ به‌روزرسانی می‌شود (طاهری، ۱۴۰۱).

$$\vec{X}^* = \begin{cases} \operatorname{rand} \cdot (UB - LB) + LB, \operatorname{rand} < z \\ \vec{X}_B(t) + \vec{v}b \cdot (W \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), r < p \\ \vec{v}c \cdot \vec{X}(t), r \geq p \end{cases} \quad (10)$$

¹ Coefficient of determination

² Root Mean Squared Error

³ Mean Absolute Error

پایه (۱۹۹۲-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

شده است. نتایج ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مجموع بارندگی، دماهای متوسط و حداکثر روزانه ایستگاه هواشناسی جم با استفاده از مدل LARS-WG برای دوره

جدول ۲- بررسی سازگاری تغییرات پارامترهای دمای ماهانه ایستگاه سینوپتیک جم با سناریوهای انتشار گزارش ششم

سناریوی انتشار						پارامتر اقلیمی
SSP5-8.5			SSP2-4.5			
MAE (°C)	RMSE (°C)	R ²	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ²	
۰/۳۹	۵/۶۶	۰/۷۲	۰/۳۱	۷/۴۵	۰/۶۳	دمای میانگین
۰/۴۳	۵/۶۴	۰/۷۰	۰/۵۷	۶/۳۵	۰/۶۹	دمای کمینه
۰/۳۴	۴/۹۱	۰/۷۹	۰/۵۳	۷/۳۷	۰/۷۰	دمای بیشینه
۱/۰۱	۴/۶۶	۰/۷۳	۱/۰۴	۶/۴۱	۰/۶۸	مجموع بارش ماهانه

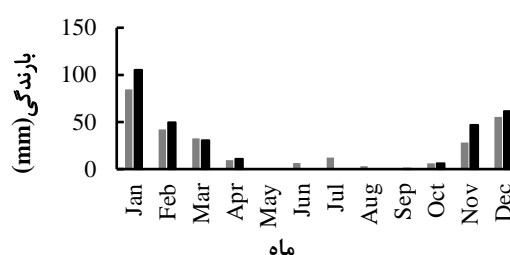
مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۲، مجموع بارش ماهانه در دوره آینده در ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر سیر کاهشی و در ماه‌های مارس، ژوئن، جولای و آگوست سیر افزایشی خواهد داشت و این درحالی‌است که میزان تغییرات بارش ماهانه در ماه می تغییر محسوسی نخواهد داشت. به استناد نتایج به‌دست‌آمده، میزان بارش ماهانه در فصول زمستان، بهار و پاییز (ماه‌های تر سال) روند کاهشی و در فصل تابستان (ماه‌های خشک سال) روند افزایشی خواهد داشت که این روند منجر به کاهش ۱۷/۱ درصدی میزان بارش سالانه در حوضه مورد مطالعه خواهد شد.

نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که دمای حداکثر ماهانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه با افزایش روبه‌رو خواهد شد (شکل ۳). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در آینده با اقلیم گرم‌تری نسبت به دوره پایه روبه‌رو خواهیم بود.

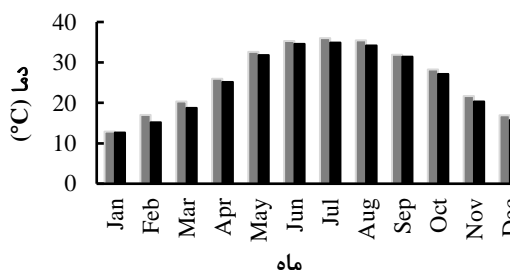
مدل‌سازی و ارزیابی الگوریتم‌های پیش‌بینی افت

تراز ایستابی

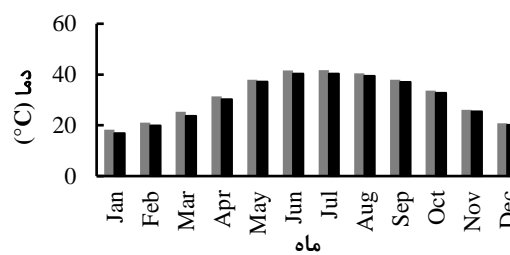
به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات افت سطح ایستابی در دشت ریز نیاز به ساخت مدلی است که قادر باشد به موازات تغییر در پارامترهای اقلیمی در دوره آینده، میزان تغییرات سفره آب زیرزمینی دشت ریز را با دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کند. به‌همین‌منظور و با هدف دستیابی به سری‌های زمانی ماهانه تغییرات سطح ایستابی در دشت ریز از مدل‌های مبتنی بر ترکیب الگوریتم‌های کپک مخاطی-رگرسیون بردار پشتیبان، ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان بهره گرفته شده است.



شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای بارندگی ماهانه در ایستگاه سینوپتیک جم در دوره آینده نسبت به دوره پایه



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای دما در ایستگاه سینوپتیک جم در دوره آینده نسبت به دوره پایه (بالا) و میانگین حداکثر دمای ماهانه (پایین)



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای دما در ایستگاه سینوپتیک جم در دوره آینده نسبت به دوره پایه دمای متوسط ماهانه (بالا) و میانگین حداکثر دمای ماهانه (پایین)

ترکیبی کپک مخاطی-رگرسیون بردار پشتیبان و رگرسیون بردار پشتیبان در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم کپک مخاطی-

رگرسیون بردار پشتیبان			
مقادیر بهینه	دامنه تغییرات	پارامتر	ردیف
۰/۰۲	۰-۰/۰۵	Z	۱
۵	۴-۱۵	C	۲
۲/۵	۱-۴	Y	۳
۰/۷	۰-۰/۹	ε	۴
۱۳	۱-۱۸	d	۵
۲۵۰	۱۰۰-۵۰۰	جمعیت اولیه	۶
۱۰۰۰	۱۰۰۰	بیشینه تعداد تکرار	۷

جدول ۵- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم رگرسیون بردار

پشتیبان			
مقادیر	دامنه تغییرات	پارامتر	ردیف
۸	۴-۱۵	C	۱
۳	۱-۴	Y	۲
۰/۳	۰-۰/۹	ε	۳
۷	۱-۱۸	d	۴

جداول ۶ و ۷ نتایج حاصل از عملکرد مدل‌های مورد ارزیابی در مراحل آموزش و آزمون را در برآورد میزان تغییرات تراز سفره آب زیرزمینی دشت ریز ارائه داده‌اند. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، کارایی مدل‌ها در برخی از موارد با دقت کم همراه بوده، لیکن برخی از آن‌ها در مراحل آموزش و آزمون دارای خطای کمتر و دقت بیشتری بوده‌اند (مدل شماره ۳) که به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات سطح ایستابی دشت ریز از آن‌ها بهره گرفته شده است. ارزیابی نتایج مدل‌ها در جدول‌های ۶ و ۷ حکایت از آن دارد که ترکیب الگوریتم کپک مخاطی با رگرسیون بردار پشتیبان قادر بوده است در مقایسه با کاربرد الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان به‌تنهایی، دقت آن را در پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی دشت افزایش دهد که این یافته با نتایج تحقیق (Salari et al., 2021) در خصوص توانایی بهتر راه‌حل‌های ترکیبی در مدل‌سازی در مقایسه با روش‌های منفرد در روش‌های داده‌مبنا مطابقت دارد.

سناریوهای مختلف مورد بررسی برای تخمین تغییرات ارتفاع سفره آب زیرزمینی در جدول ۳ ارائه شده است. در بخش مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی، با توجه به دوره آماری پارامترهای اقلیمی (ورودی‌های مدل) از متوسط ماهانه داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک جم در فاصله سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. از مجموع ۱۸ سال داده آماری برای ۱۶ حلقه چاه مشاهداتی، (۲۱۶ مورد) داده ماهانه به‌صورت متوسط سطح ایستابی دشت ریز مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعد ۷۵ درصد داده‌ها (۱۶۲ داده) برای آموزش مدل‌ها و ۲۵ درصد باقی (۵۴ داده) برای آزمون دقت مدل‌ها در دوره مشاهداتی در قالب ۵ سناریوی مختلف به‌کار گرفته شد. پارامترهای ایستگاه هواشناسی استفاده‌شده در مدل‌سازی شامل متوسط دمای بیشینه ماهانه (T_{max})، متوسط دمای کمینه ماهانه (T_{min})، متوسط دمای متوسط ماهانه (T_{mean})، متوسط مجموع بارش ماهانه (P)، متوسط مجموع ساعات آفتابی ماهانه (Rad) و ارتفاع سطح ایستابی در دوره مورد بررسی است.

جدول ۳- ساختار مدل‌های ارزیابی تغییرات سطح ایستابی در این تحقیق

شماره مدل	ساختار مدل
۱	$H(t)=f\{P(t), T_{mean}(t)\}$
۲	$H(t)=f\{P(t), Rad(t), T_{mean}(t)\}$
۳	$H(t)=f\{P(t), T_{max}(t), T_{mean}(t), T_{min}(t)\}$
۴	$H(t)=f\{P(t), T_{max}(t), T_{mean}(t), T_{min}(t), Rad(t)\}$
۵	$H(t)=f\{P(t), P(t-1), T_{mean}(t), Rad(t)\}$

به‌منظور ارزیابی کارایی هر یک از الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق در پیش‌بینی افت تراز ایستابی در دشت ریز راه‌حل ترکیبی الگوریتم‌های کپک مخاطی-رگرسیون بردار پشتیبان (SMA-SVR) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به‌تنهایی استفاده شد. در الگوریتم‌های بهینه‌ساز و شبیه‌ساز، پارامترهای قابل‌تنظیم مختلفی تعریف شده‌اند که تغییر هر یک از آن‌ها به تغییر در زمان اجرای الگوریتم و مقدار جواب بهینه تابع هدف می‌انجامد. مقادیر مناسب پارامترهای قابل‌تنظیم در الگوریتم‌های

جدول ۶- معیارهای آماری پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده مدل‌های مورد ارزیابی مختلف در دشت ریز (مرحله آموزش)

شماره مدل	SVR			SMA-SVR		
	RMSE (m)	MAE (m)	R ²	RMSE (m)	MAE (m)	R ²
۱	۱/۴۴	۰/۳۲	۰/۸۳	۱/۴۵	۰/۳۲	۰/۸۲
۲	۱/۲۷	۰/۳۰	۰/۸۵	۱/۲۸	۰/۳۰	۰/۸۵
۳	۱/۲۵	۰/۲۹	۰/۸۶	۱/۱۴	۰/۲۸	۰/۸۸
۴	۱/۴۹	۰/۳۴	۰/۸۲	۱/۴۳	۰/۳۲	۰/۸۳
۵	۱/۷۱	۰/۴۰	۰/۸۰	۱/۶۶	۰/۳۹	۰/۸۰

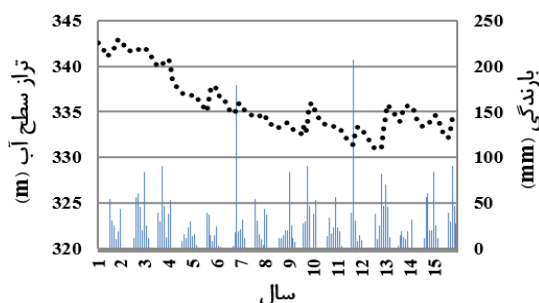
SVR-SMA: الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- رگرسیون بردار پشتیبان،
SVR: رگرسیون بردار پشتیبان.

جدول ۷- معیارهای آماری پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده مدل‌های مختلف مورد ارزیابی در دشت ریز (مرحله آزمون)

شماره مدل	SVR			SMA-SVR		
	RMSE (m)	MAE (m)	R ²	RMSE (m)	MAE (m)	R ²
۱	۱/۳۲	۰/۳۳	۰/۸۴	۱/۲۹	۰/۳۱	۰/۸۵
۲	۱/۲۳	۰/۲۹	۰/۸۶	۱/۱۷	۰/۲۵	۰/۸۷
۳	۱/۱۱	۰/۲۵	۰/۹۰	۱/۰۲	۰/۱۸	۰/۹۲
۴	۱/۲۰	۰/۲۸	۰/۸۷	۱/۱۹	۰/۲۸	۰/۸۶
۵	۱/۳۲	۰/۳۱	۰/۸۵	۱/۲۴	۰/۲۹	۰/۸۵

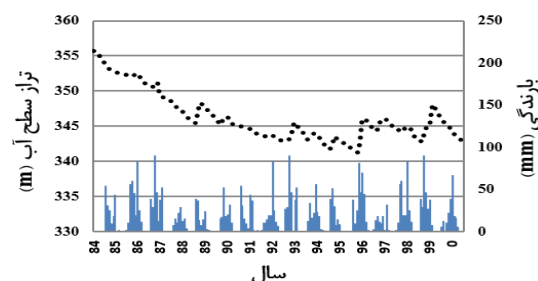
SVR-SMA: الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- رگرسیون بردار پشتیبان،
SVR: رگرسیون بردار پشتیبان.

پس از پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر میزان پارامترهای اقلیمی آینده در دشت ریز و نیز ساخت مدل پیش‌بینی تغییرات تراز سطح ایستابی دشت ریز، اقدام به شبیه‌سازی هیدروگراف واحد آب زیرزمینی در آبخوان مربوط برای فاصله زمانی سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۳۰ شد. هیدروگراف پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت ریز در فاصله زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۵ در شکل ۵ و ۱۴۱۶ تا ۱۴۳۰ در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- نمودار هیدروگراف واحد دشت ریز در سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۱۵

در ادامه، هیدروگراف آب زیرزمینی دشت ریز برای دوره مشاهداتی (شکل ۴) ترسیم و ارزیابی شد. برای محاسبه هیدروگراف آب زیرزمینی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تراز چاه‌های مشاهده‌ای بر مجموع سطح پلیگون‌های چاه‌ها تقسیم شده است. اطلاعات مورد نیاز برای ترسیم نمودارهای هیدروگراف، تراز آب زیرزمینی در این تحقیق، از گردآوری داده‌های اندازه‌گیری سطح آب ۱۶ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت ریز و ارقام ترازابی آن‌ها از سال ۱۳۸۴ لغایت ۱۴۰۰ به‌دست آمده است.



شکل ۶- نمودار هیدروگراف واحد دشت ریز در سال‌های ۱۳۸۴-۱۴۰۰

ریز در استان بوشهر برای دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۹۲) و دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) استفاده شد. در این تحقیق ارزیابی میزان تغییرات تراز سطح ایستابی دشت ریز با استفاده از راه حل الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- رگرسیون بردار پشتیبان و الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان به تنهایی انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است:

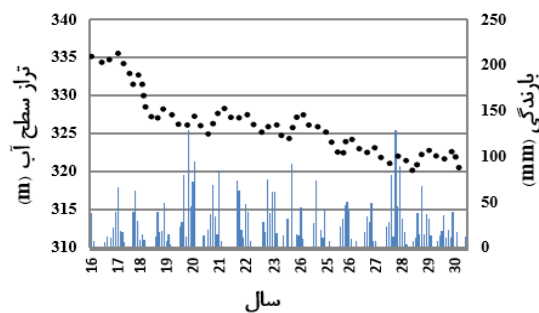
۱- نتایج ارزیابی‌های پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با بهره‌گیری از خروجی‌های مدل MRI-ESM2-0 نشان می‌دهد که تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5 همه پارامترهای دما (دمای حداکثر، دمای میانگین و دمای حداقل) در دوره آینده نسبت به دوره پایه دارای روند افزایشی است. میزان بارندگی ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در فصول تر سال کاهشی و در فصول خشک سال روند افزایشی خواهد داشت. مجموع بارش سالانه حوضه مورد مطالعه در دوره آینده نسبت به دوره پایه، کاهش ۱۷/۱ درصدی را تجربه خواهد کرد.

۲- میزان خطای برآورد تغییرات تراز سطح ایستابی با استفاده از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان، الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- رگرسیون بردار پشتیبان به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۱ درصد است که نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- رگرسیون بردار پشتیبان در مقایسه با رگرسیون بردار پشتیبان به تنهایی است.

۳- ارزیابی هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت ریز در دوره آینده نشان می‌دهد که شدت افت سطح ایستابی دشت ریز در دوره آینده به دلیل روند صعودی تقاضای مصرف آب به دلیل افزایش تبخیر و تعرق و همچنین کاهش منابع آب به دلیل کاهش بارش در سطح حوضه موجب خواهد شد که شدت افت سطح ایستابی در دوره آینده نسبت به دوره پایه با سرعت بیشتری انجام شود.

منابع

1. Abbasnovinpour, E., Sadeghi, F. and Kaki, M., 2021. The effect of climate change on surface and groundwater resources in Rozeh Tea Plain. *New findings in applied geology*, 15(29): 15-27. [In Persian].
2. Abbasi, S., Javidnejad, A. and Jafari, Sh. 2017. Investigating hydrological drought and changes in Dasht Riz underground water table (water supply sources of Fajr Jam Gas



شکل ۶- نمودار هیدروگراف واحد دشت ریز در سال‌های ۱۴۳۰-۱۴۱۶

ارزیابی هیدروگراف‌های آب زیرزمینی دشت ریز در دوره مشاهداتی و دوره آینده نشان می‌دهد که تراز سطح ایستابی دشت ریز با گذشت زمان کاهش یافته است. این روند کاهش در دوره آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم و با توجه به افزایش دمای هوا و نیز کاهش مجموع بارندگی سالانه در دشت ریز و افزایش مصرف آب شدت بیشتری به خود خواهد گرفت که ارزیابی آن در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- مقایسه تغییرات تراز سطح ایستابی دشت ریز در دوره مشاهداتی و دوره آینده

دوره مورد بررسی	تراز آب زیرزمینی در ابتدای دوره (متر)	تراز آب زیرزمینی در انتهای دوره (متر)	تغییرات تراز آب زیرزمینی در پایان دوره (متر)	افت سطح ایستابی (متر بر سال)
مشاهده	۳۵۵/۷۰	۳۴۲/۹۰	۱۲/۸۰	۰/۷۵
آینده	۳۴۲/۶۲	۳۱۹/۵۹	۲۳/۰۳	۰/۷۸

به استناد نتایج به دست آمده از جدول ۹، میزان افت تراز سطح ایستابی در دشت ریز در دوره مشاهداتی ۰/۷۵ متر در سال بوده که مطابق با ارزیابی‌های صورت گرفته در این تحقیق در سال‌های آینده این روند کاهش تراز به ۰/۷۸ متر در سال افزایش خواهد یافت.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، از مدل MRI-ESM2-0 و سناریوی SSP5-8.5 گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) برای پیش‌بینی تغییر پارامترهای اقلیمی دشت

- Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G. and Krey, V., 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature climate change*, 8(4): 325-332.
12. Salari, S., Moghaddasi, M., Mohammadi, M. and Akbari, M., 2021. Groundwater level prediction in Golpayegan aquifer using ANFIS and PSO combination. *Iranian Journal of soil and water research*, 52(3): 721-732. [In Persian].
 13. Shahi Nejad, B. and Dehghani, R., 2017. Evaluation and performance of support vector machine model in estimation of suspended sediment. *Irrigation and Water Engineering*, 8(1): 30-42. [In Persian].
 14. Sharafati, A., Nabaei, S. and Shahid, S., 2020. Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3): 1864-1884.
 15. Stouffer, R.J., Eyring, V., Meehl, G.A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B. and Taylor, K.E., 2017. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1): 95-105.
 16. Supreetha, B.S., Shenoy, N. and Nayak, P., 2020. Lion Algorithm-Optimized Long Short-Term Memory Network for Groundwater Level Forecasting in Udupi District, India. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2020(1):2: 1-8.
 17. Taheri, A.S., 2022. Optimizing the operation of the dam reservoir using slime mold algorithm and comparing with genetic algorithm and ant community under drought conditions (case study: Aydogmash Dam). Master's thesis, Semnan University, 98 p. [In Persian].
 18. Zarrin, A. and Dadashi Roudbari, A.A., 2020. Projection the long-term outlook Iran future temperature based on the output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3): 583-602. [In Persian].
 19. Zeinalie, M., Ansari Ghojghar, M., Mehri, Y., Hosseini, S.M., 2020. Evaluation of the combination of optimization algorithms and adaptive fuzzy-neural inference system compared to time series models in groundwater level estimation. *Iran-Water Resources Research*, 16(3): 245-256. [In Persian].
 3. Refining Company) using GRI index. 4th comprehensive crisis management and HSE conference. [In Persian].
 3. Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M. and Farokhnia, A., 2022. Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 16(1): 11-24. [In Persian].
 4. Chen, H., Zhao, Y., Feng, H., Li, H. and Sun, B., 2014. Assessment of climate change impacts on soil organic carbon and crop yield based on long-term fertilization applications in Loess Plateau, China. *Plant and Soil*, 390(1): 401-417.
 5. Danshgar, H., Bagheri, M. and Mardani, M., 2021. Evaluation of Consequences of Climate Change and Adaptation Strategies in Bushkan Plain of Bushehr Province. *Agricultural Economics and Development*, 35(1): 63-78. [In Persian].
 6. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937-1958.
 7. Heshmati, S. and Etedali, H.R., 2021. Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model: The Case Study of Kermanshah City. *Town & Country Planning*, 13(2): 647-669. [In Persian].
 8. Khosravi, I., Akhundzadeh, M. and Khoshgoftar, M., 2015. Modeling and predicting the drought indices using machine learning methods in order to managing hazards (case study: Eastern district of Isfahan). *Environmental Risk Management*, 2(1): 51-65. [In Persian].
 9. Mortezaei, Gh., Lotfi, J., Khalighi Sigarodi, Sh., Saravi, M. and Nazari, A., 2020. Analysis and evaluation of hydrological drought indicators in Kurdistan Province. *Watershed Engineering and Management*. 2(12): 441-453. [In Persian].
 10. O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J. and Meehl, G.A., 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9): 3461-3482.
 11. Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S.,