

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت خرم‌آباد)

رضا دهقانی^{۱*}، رضا چمن پیرا^۲ و ایرج ویسکرمی^۳

چکیده

در سال‌های اخیر پدیده تغییر اقلیم سبب گرم‌تر شدن کره زمین و در نتیجه افت منابع آب زیرزمینی شده است؛ بنابراین برای جلوگیری از افت منابع آب زیرزمینی به منظور مدیریت کمی دشت‌ها، شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی امری ضروری است. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد از مدل گردش عمومی جو CMIP6 برای برآورد پارامترهای هواشناسی، نظیر دما و بارش در سال‌های آتی استفاده شد. سپس عملکرد مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-موجک (WSVR)، رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق (AIG-SVR) و رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری (GWO-SVR) در برآورد سطح آب زیرزمینی با استفاده از پارامترهای دما، بارش و برداشت از آبخوان‌ها در طی دوره آماری ۲۰۲۲-۲۰۰۲ بررسی و با بهره‌گیری از مدل منتخب هیبریدی در دوره آماری ۲۰۲۲-۲۰۴۲ سطح آب زیرزمینی پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد پارامتر دما در دوره آتی نسبت به دوره پایه در همه ماه‌ها روند افزایشی (حدود ۱/۶۸-۲/۷۹ درجه سانتی‌گراد) داشته است. نتایج حاصل از بررسی مدل‌های هیبریدی به وسیله شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش-ساتکلیف نشان داد سه مدل مورد بررسی در ساختار ترکیبی عملکرد بهتری داشته و مدل WSVR نسبت به سایر مدل‌ها از توانایی مطلوبی برخوردار است. در مجموع نتایج حاصل از پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی نشان داد که طی سال‌های آتی افت سطح آب زیرزمینی حدود ۱-۱/۵ متر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: افت منابع آب، تفنگدار خلاق، مدل‌سازی، مدل گردش عمومی جو

ارجاع: دهقانی ر. چمن پیرا ر. و ویسکرمی ا. ۱۴۰۳. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت خرم‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۵۳: ۳۸-۲۵. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14796.2607>

۱- دکترای علوم و مهندسی آب، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.

۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.

۳- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.

* نویسنده مسئول: r.dehghani@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

مقدمه

صنعتی شدن جوامع در سال‌های اخیر سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است. این افزایش باعث گرم شدن کره زمین شده و به نوبه خود بر وضعیت اجزای دیگر سیستم اقلیم تأثیر دارد که موجب وقوع رخدادهایی در اقلیم شده؛ به گونه‌ای که تفاوت اساسی با روند طبیعی این رخدادها دارد، این فرایند تغییر اقلیم نام دارد (Li et al., 2015). مطابق با گزارشات IPCC در سال ۲۰۰۷، فرایند تغییر اقلیم و گرمایش جهانی تأثیر بسزایی بر سیستم‌های مختلف مانند منابع آب، کشاورزی، شرب و صنعت دارد؛ به گونه‌ای که افزایش پیوسته انتشار گازهای گلخانه‌ای این اثرات را تشدید خواهد کرد و سبب گرم‌تر شدن هوا، تغییر در الگوی بارش، ذوب برف و در نتیجه تغییر در دسترسی به آب شرب و کشاورزی می‌شود (Endo et al., 2012). منابع آب زیرزمینی از طریق تعامل مستقیم با منابع آب سطحی مثل رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و تعامل غیرمستقیم از طریق روند تغذیه، با پدیده تغییر اقلیم در ارتباط است (Roeckne et al., 2003; Abbasian et al., 2019). تغییر اقلیم با تغییر در شرایط تغذیه ناشی از بارندگی و رواناب به صورت غیرمستقیم بر تخلیه و ذخیره آب زیرزمینی اثر می‌گذارد؛ بنابراین شناسایی و تحلیل پارامترهای مؤثر از جمله پارامترهای اقلیمی می‌تواند کمک بسزایی به پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی کند که بتوان از ایجاد مخاطره‌های جدی همچون فرونشست و خشکسالی جلوگیری کرد (Affandi et al., 2007; Chang and Chang, 2006). از سوی دیگر با توجه به اینکه ارتباط بین پارامترهای اقلیمی و منابع آب زیرزمینی به صورت پیچیده و غیرخطی است، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی از جمله مدل‌های هیبریدی نوین راهکار مناسبی برای حل این مشکلات است.

Moravej et al. (2020) برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی دشت کرج از الگوریتم‌های فراکاوشی ترکیبی با مدل SVR استفاده کردند. آنها در این پژوهش از پارامترهای سطح آب زیرزمینی، بارش و تبخیر با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی داخلی-حداقل پشتیبانی از رگرسیون ناقل (ISA-LSSVR) و الگوریتم ژنتیک-کمترین رگرسیون برداری (GA-LSSVR) در مقایسه با برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و سیستم استنتاج فازی عصبی

تطبیقی (ANFIS) بهره گرفتند. نتایج نشان داد مدل ISA-LSSVR عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی دارد. همچنین نتایج سناریوهای تعریف شده نشان داد پارامترهای بارش و تبخیر، تأثیر بسزایی در افزایش دقت مدل‌ها ایفا می‌کنند.

Bahmani et al. (2021) به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت دلفان واقع در استان لرستان، از تکنیک‌های هوش مصنوعی هیبریدی استفاده کردند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی از مدل‌های برنامه بیان ژن (GEP) و درخت تصمیم (M5) با روش تجزیه حالت تجربی گروه (EEMD) و تجزیه حالت تجربی گروه تجربی (CEEMD) برای پیش‌پردازش داده‌های ورودی به منظور تولید مدل‌های ترکیبی بهره گرفتند. نتایج نشان داد پیش‌پردازش می‌تواند عملکرد مدل‌های ساده را بهبود بخشد و مدل ترکیبی حاصل از WT و CEEMD عملکرد مناسبی نسبت به EEMD از خود نشان داده است.

Kardan Moghadam et al. (2021) برای تحلیل و ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی آبخوان شهرستان بیرجند از آمار و اطلاعات ۵ حلقه چاه مشاهداتی استفاده کردند. در این مطالعه برای شبیه‌سازی وضعیت کمی سفره‌های زیرزمینی از سه مدل مبتنی بر داده از جمله روش گروهی مدیریت داده‌ها (GMDH)، شبکه بیزی (BN) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهره گرفته شد همچنین ۱۰ سناریوی مختلف با ترکیب پارامترهای سطح آب زیرزمینی در ماه قبل، بهره‌برداری از سفره آب، شارژ مجدد سطح، بارندگی، دما و تبخیر ایجاد کردند. نتایج نشان داد مدل هیبریدی GMDH عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی از خود نشان داده است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف به مدت ۶ سال برای تجزیه و تحلیل وضعیت آبخوان نشان داد سطح آب زیرزمینی در این آبخوان در شرایط بحرانی قرار دارد.

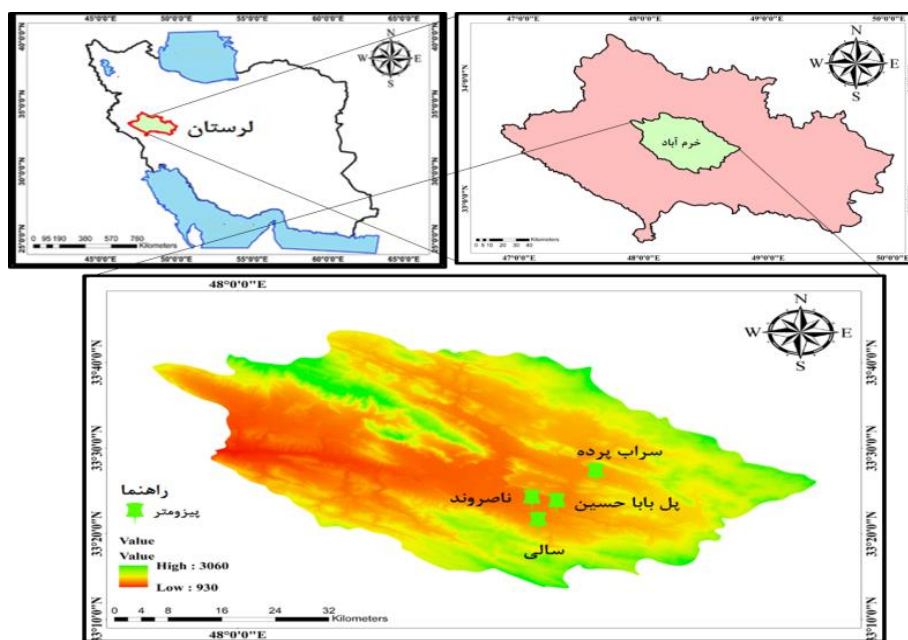
در مجموع با توجه به پژوهش‌های انجام شده، ارائه راهکار و پیش‌بینی مناسب منابع آب زیرزمینی برای جلوگیری از پدیده‌های فرونشست و خشکسالی در جهان و کشور ایران لازم و ضروری است؛ دشت خرم‌آباد اهمیت بسزایی در استان لرستان از لحاظ مصارف شرب و کشاورزی دارد

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت خرم‌آباد در مرکز استان لرستان بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع منطقه ۱۹۰۳ متر و حداقل آن ۹۲۹ متر و مساحت این محدوده مطالعاتی، ۲۵۱۷ کیلومتر مربع است. همچنین متوسط بارش سالانه محدوده مطالعاتی خرم‌آباد، ۵۰۹ میلی‌متر و متوسط دمای آن ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد است. سفره آبدار اصلی دشت خرم‌آباد را رسوبات آبرفتی تشکیل می‌دهد. این دشت دارای ۴ حلقه چاه پیزومتری با آمار همگن بوده و فاقد آمار و اطلاعات مفقود است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.

و از جمله مهم‌ترین محدوده‌های استان لرستان از نظر تولید محصولات کشاورزی است. با توجه به اینکه محصولات این دشت برای رشد و نمو از آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌کنند، در طی سال‌های اخیر افت شدیدی در منابع آب زیرزمینی که به موجب برداشت‌های بی‌رویه و حفر چاه‌های غیرمجاز حاصل شده است تولید محصولات کشاورزی کاهش یافته است. بنابراین در این پژوهش تغییرات سطح آب زیرزمینی به منظور پیش‌بینی و اقدامات مدیریتی برای بهبود آن پیش‌ازپیش ضروری است. هدف این تحقیق، تحلیل و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو سال‌های آبی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد با استفاده از مدل تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان با تبدیل موجک WT و الگوریتم‌های بهینه‌سازی نوین همچون تفنگدار خلاق براساس پارامترهای اقلیمی، سطح آب زیرزمینی و برداشت از آبخوان است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

مدل (دوره تست) به کار برده شد (Khosravi et al., 2016). موقعیت جغرافیایی چاه‌های پیزومتری مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ خصوصیات آماری سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مورد مطالعه نشان داده شده است.

همچنین برای مدل‌سازی، از پارامترهای بارش (P)، دما (T) و سطح آب زیرزمینی (H) و برداشت از منابع آب (q) به صورت ماهانه که در شرکت آب منطقه‌ای لرستان طی بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۲۲ در دسترس بود، استفاده شد. ۸۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و ساخت مدل (دوره آموزش) و ۲۰ درصد آن برای صحت‌سنجی یا ارزیابی

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

شماره	چاه پیزومتر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	سراب‌پرده	۴۸° ۲۸' ۴۹"	۳۳° ۲۶' ۵۷"	۱۳۷۶
۲	ناصروند	۴۸° ۲۳' ۴۱"	۳۳° ۲۳' ۵۳"	۱۲۳۴
۳	سالی	۴۸° ۲۴' ۱۰"	۳۳° ۲۱' ۱۶"	۱۳۰۲
۴	پل بابا حسین	۴۸° ۲۵' ۴۱"	۳۳° ۲۳' ۲۹"	۱۲۶۷

جدول ۲- مشخصات آماری سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری مورد بررسی

پل بابا حسین	سالی	ناصروند	سراب‌پرده	بارش	دما	برداشت از آبخوان	
۱۲/۹۷۰	۱۵/۳۰۰	۲۳/۲۶۰	۱۷/۸۲۰	۰	۰/۹۵۰	۰	کمینه
۱۷/۵۶۰	۲۰/۷۹۰	۳۵/۲۵۰	۲۲/۶۳۰	۴۱/۴۹۰	۱۶/۶۸۰	۱۱/۸۳۰	میانگین
۱۹/۹۰۰	۲۵/۵۰۰	۵۸/۲۰۰	۲۷	۲۲۱	۳۰/۶۸۰	۱۲۸	بیشینه
۱/۸۱۰	۲/۲۶۰	۸	۲/۵۱۰	۴۹/۷۳۰	۸/۷۰۰	۱۳/۵۴۰	انحراف معیار
-۱/۲۳۰	-۰/۴۰۰	۰/۶۸۰	-۰/۲۴۰	۱/۳۲۰	۰/۰۷۰	۱/۳۴۰	چولگی

روش تحقیق

در این پژوهش برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی دشت خرم‌آباد، ابتدا با توجه به مدل‌های گردش عمومی جو پارامترهای هواشناسی مؤثر بر سطح آب‌های زیرزمینی بررسی و طی ۲۰ سال آینده محاسبه شدند. سپس از رویکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با فرض اینکه میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد مطابق با دوره آماری گذشته است، استفاده شد. با توجه به اینکه مدل SVR مطابق با پژوهش‌های اخیر دارای خطا است، برای کاهش خطای مدل از راهکار بهینه‌کردن پارامترهای تنظیم به‌وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در خصوص مدل هیبریدی SVR با الگوریتم‌های فراابتکاری صورت گرفته است، اما در این پژوهش برای کاهش مشکلات و چالش‌های این مدل، معرفی الگوریتمی جدید برای تسهیل فرایند شبیه‌سازی و همچنین پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از افت سطح آب با استفاده از پارامترهای وابسته، از الگوریتم‌های نوین که تاکنون در فرایندهای هیدرولوژیکی یا هیدروژئولوژی بررسی نشده‌اند، استفاده می‌شود. بنابراین در این پژوهش از کاربرد الگوریتم‌های نوین تفنگدار خلاق استفاده شد و به‌منظور توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری جدید با مدل هیبریدی موجک رگرسیون بردار پشتیبان (WSVR) که

از عملکرد قابل‌قبولی مطابق با پژوهش‌های متعدد برخوردار است، برای شبیه‌سازی سطح آب‌های زیرزمینی بهره گرفته شد که بتوان گامی مؤثر در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برداشت.

در این پژوهش ابتدا آمار و اطلاعات موردنیاز از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان لرستان گردآوری و سپس به‌منظور یکپارچه‌سازی این آمار و اطلاعات فرایند نرمال‌سازی انجام شد. برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی طی دوره زمانی پایه (۲۰۲۲-۲۰۰۲) از مدل هوش مصنوعی استفاده شد. بدین‌منظور ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش (۲۰۱۸-۲۰۰۲) و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی (۲۰۲۲-۲۰۱۸) انتخاب شد. سپس با انتخاب مدل هوش مصنوعی منتخب، برآورد یا پیش‌بینی ۲۰ ساله پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو انجام گرفت. درنهایت با توجه به برآورد پارامترهای اقلیمی نظیر دما و بارش در ۲۰ سال آینده و مدل هوش مصنوعی منتخب، سطح آب زیرزمینی طی دوره آینده (۲۰۴۲-۲۰۲۲) پیش‌بینی شد.

مدل گردش عمومی جو

جدیدترین سناریوهای ارائه‌شده برای بررسی پارامترهای اقلیمی، سناریوهای گزارش ششم (AR6) است. در این سناریوها چگونگی مدل گردش عمومی در دوره‌های آتی براساس ترکیب سناریوهای انتشار (RCPs) و سناریوهای

پارامترهای دمای بیشینه و دمای کمینه، اختلاف میانگین بلندمدت ماهانه دوره آبی و دوره پایه محاسبه شود؛ بنابراین برای هر پارامتر در هر ماه، ضریبی به دست خواهد آمد که از آن برای ایجاد سناریو در نرم افزار WG-LARS و ریزمقیاس نمایی خروجی مدل های گزارش ششم استفاده خواهد شد.

تبدیل موجک

تبدیل موجک به عنوان روشی جایگزین برای تبدیل فوریه زمان کوتاه ارائه شده است و هدف از ارائه آن، غلبه بر مشکلات مربوط به قدرت تفکیک پذیری فرکانس در تبدیل فوریه زمان کوتاه است. در تبدیل موجک همانند تبدیل فوریه زمان کوتاه، سیگنال مورد نظر به پنجره هایی تقسیم شده و تبدیل موجک بر هر کدام از این پنجره ها به صورت جداگانه انجام می گیرد (Wang et al., 2000)؛ اما مهم ترین تفاوت آن ها در این است که در تبدیل موجک علاوه بر اینکه قدرت تفکیک فرکانس های یک سیگنال یا طول پنجره، متناسب با نوع فرکانس تغییر می کند، هم زمان عرض پنجره یا مقیاس فرکانس نیز متناسب با نوع فرکانس تغییر می کند. به عبارت دیگر، در تبدیل موجک به جای فرکانس، مقیاس وجود دارد؛ یعنی تبدیل موجک، نوعی تبدیل زمان-مقیاس است. بر همین اساس با استفاده از تبدیل موجک، در مقیاس های بالا سیگنال منبسط شده و جزئیات سیگنال قابل تجزیه و تحلیل است و در مقیاس های پایین سیگنال منقبض شده و کلیات سیگنال قابل بررسی است (Nourani et al., 2009). یک موجک به معنای موج کوچک، بخشی یا پنجره ای از سیگنال اصلی است که انرژی آن در زمان متمرکز شده است. با استفاده از تبدیل یا آنالیز موجک می توان یک سیگنال یا سری زمانی مادر را به موجک هایی با سطح تفکیک و مقیاس های مختلف تجزیه کرد؛ بنابراین موجک ها نمونه های انتقال یافته و مقیاس شده سیگنال مادر هستند که نوساناتی در یک طول متناهی داشته و شدیداً میرا هستند (Nourani et al., 2019). بر اساس این ویژگی مهم تبدیل موجک، می توان سری های زمانی نامانا و گذرا را به صورت موضعی مورد تجزیه و تحلیل قرارداد (Shin et al., 2005).

اقتصادی-اجتماعی (SSPs) بررسی می شود. در واقع بر اساس این گزارش، سناریوهای آینده علاوه بر توصیف اقلیم های متفاوت، باید جنبه های پیشرفت اقتصادی و اجتماعی را نیز شامل شوند. در سناریوهای SSPs بر شبیه سازی چگونگی تغییر شرایط اقتصادی-اجتماعی مانند رشد جمعیت، رشد اقتصادی، آموزش، شهرنشینی، توسعه و تکنولوژی تأکید شده است.

ریزمقیاس نمایی

یکی از مشکلات استفاده از خروجی مدل های اقلیمی، بزرگ مقیاس بودن سلول های محاسباتی آن هاست؛ از این رو نمی توان از اطلاعات خام این مدل ها در مطالعات مربوط به مقیاس های کوچک تر استفاده کرد. در همین راستا، باید خروجی این مدل ها با بهره گیری از روش های مناسب ریزمقیاس نمایی شود.

ریزمقیاس نمایی به سه دسته روش های آماری، دینامیکی و تناسبی انجام می شود. در روش های آماری، ریزمقیاس نمایی با بهره گیری از روش های رگرسیونی و علم آمار و ایجاد ارتباط کمی بین متغیرهای بزرگ مقیاس و متغیرهای کوچک مقیاس انجام می شود. از جمله روش های آماری می توان به مدل LARS WG اشاره کرد. این مدل با دریافت مطالعات تاریخی منطقه و شناخت ویژگی های آماری آن، وضعیت متغیرهای اقلیمی را در آینده پیش بینی می کند. در این پژوهش اطلاعات مربوط به متغیرهای بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و تعداد ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه هواشناسی خرم آباد طی سال های ۲۰۰۲-۲۰۲۲ به مدل LARS ارائه خواهد شد و پس از اطمینان از توانایی مدل در شناخت ویژگی های آماری ایستگاه مذکور، از این مدل برای ریزمقیاس نمایی خروجی مدل های اقلیمی تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استفاده خواهد شد. از آنجایی که مدل های گزارش ششم در نرم افزار LARS WG تعریف نشده هستند، نیاز است تا خروجی هر کدام از مدل ها با تعریف سناریو ریزمقیاس شود. به همین منظور داده های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به خروجی هر مدل برای دوره آبی تحت هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج می شود. سپس برای پارامتر بارش، نسبت میانگین بلندمدت ماهانه دوره آبی به دوره پایه و برای

رگرسیون بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مقید است که از اصل استقرای کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌شود (Vapnik, 1995). در مدل رگرسیون SVM تابعی مرتبط با متغیر وابسته Y که خود تابعی از چند متغیر مستقل x است، برآورد می‌شود. مشابه سایر مسائل رگرسیونی فرض می‌شود رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته با تابع جبری مانند $f(x)$ به‌علاوه مقداری اغتشاش (خطای مجاز (ϵ)) مشخص شود (Vapnik, 1998).

$$f(x) = W^T \cdot \phi(x) + b \quad (1)$$

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (2)$$

توابع مختلف کرنل را می‌توان برای ساخت انواع مختلف SVM- ϵ استفاده کرد. انواع توابع کرنل قابل‌استفاده در مدل SVM رگرسیونی شامل کرنل چندجمله‌ای، کرنل توابع پایه شعاعی (RBF) و کرنل خطی، به ترتیب مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شوند. با توجه به اینکه از پرکاربردترین توابع کرنل، کرنل پایه شعاعی، خطی و چندجمله‌ای است (Vapnik and Chervonenkis, 1991)، در این پژوهش از این سه تابع کرنل استفاده شده است. قابل‌ذکر است فرایند محاسبات ماشین بردار پشتیبان براساس کدنویسی در محیط متلب انجام و پارامترهای توابع کرنل از طریق سعی و خطا بهینه شدند.

$$k(x, x_j) = (t + x_i \cdot x_j)^d \quad (3)$$

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$k(x, x_j) = x_i \cdot x_j \quad (5)$$

الگوریتم تفنگدار خلاق

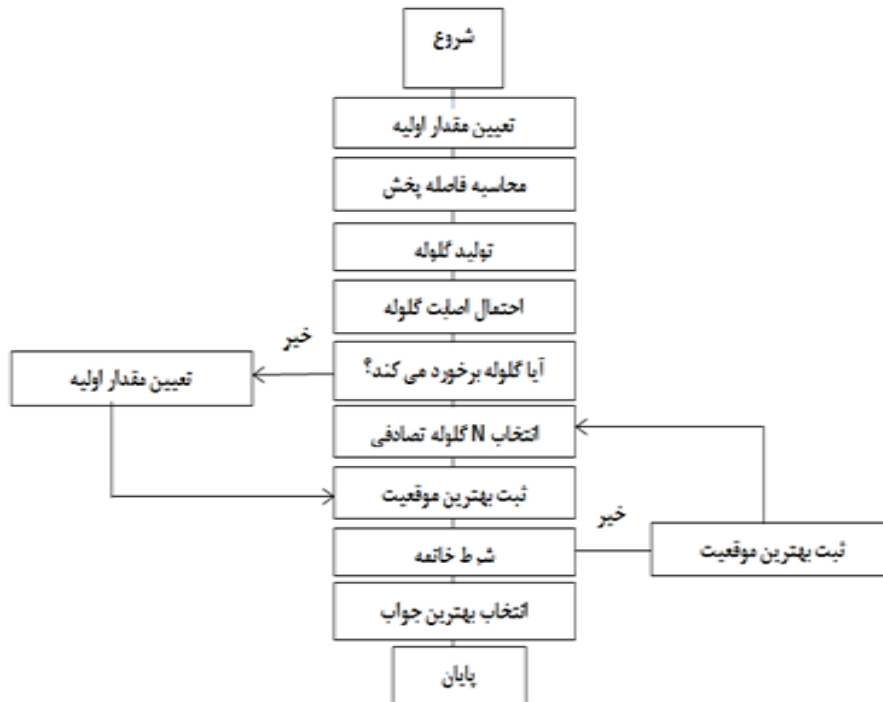
الگوریتم تفنگدار خلاق (AIG¹) یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری بسیار جدید است که توسط Pijarski and Kacejko (2019) ارائه شد. با توجه به ساختار بسیار پر قدرت و نیرومند این الگوریتم، پیش‌بینی می‌شود در آینده با موفقیت و به‌صورت چشمگیری در

زمینه‌های مختلف علمی و فناوری استفاده شود. این الگوریتم دارای کارایی و سرعت بالا در زمینه حل کارهای مختلف بهینه‌سازی (مثل زمینه مکانیک و عملکردهای ریاضی بنچمارک) است. سرعت همگرایی بالا و قابلیت پیدا کردن جواب بهینه در کمترین زمان و با کمترین هزینه و با دقت بسیار بالا، از جمله مزیت‌های این الگوریتم است. همچنین این الگوریتم به دلیل استفاده از بردارهای جواب، بر مبنای روش‌های swarm، اکتشاف بسیار زیادی در فضای جست‌وجو انجام می‌دهد و این امر در یافتن جواب بهینه و همگرایی کمک شایانی می‌کند. الگوریتم تفنگدار خلاق راه‌حل‌ها و جواب‌های گوناگونی را به دست می‌آورد که کارایی بسیار بالایی در اجتناب از جواب‌های بهینه محلی دارد (گیرافتادن در جواب‌های بهینه محلی). از این الگوریتم می‌توان به‌صورت حیرت‌آوری برای حل توابع هدف با اشکال مختلف و تابع چندبعدی مختلف استفاده کرد. پیش‌بینی می‌شود که نتایج به دست آمده از این مدل، کارایی رقابتی و بالاتری در برابر سایر روش‌های شناخته‌شده هوش ازدحامی (از قبیل الگوریتم ژنتیک- ازدحام ذرات- ملخ- میگو و...) داشته باشد (Pijarski and Kacejko, 2019). در شکل ۲ فلوجارت این الگوریتم نشان داده شده است.

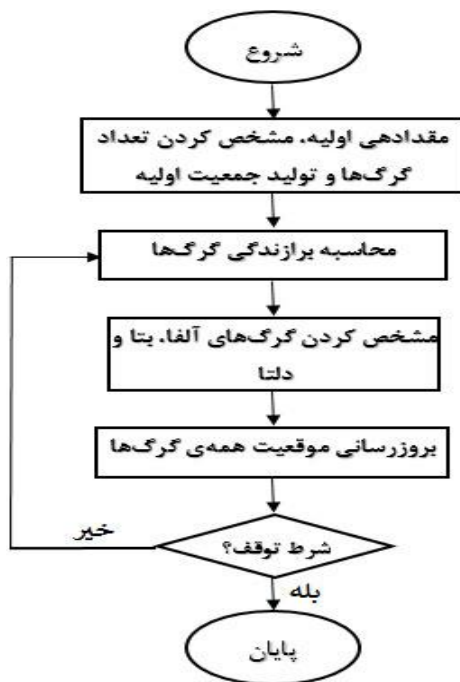
گرگ خاکستری

سناریوی گرگ خاکستری GWO یک سناریوی فراکاوشی است که از سناریوی سلسله‌مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است (Ostu, 1979). این سناریو مبتنی بر جمعیت بوده، فرایند ساده‌ای دارد و به‌سادگی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارد. گرگ‌های خاکستری به‌عنوان شکارچیان رأس در نظر گرفته می‌شوند، که در بالای هرم زنجیره غذایی هستند. گرگ‌های خاکستری ترجیح می‌دهند در یک گروه (دسته) زندگی کنند، هر گروه به‌طور متوسط ۵ تا ۱۲ عضو دارد. همه اعضای این گروه دارای سلسله‌مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف خاصی دارند. در هر گله از گرگ‌ها برای شکار کردن ۴ درجه وجود دارد.

¹ Algorithm Innovative Gunner

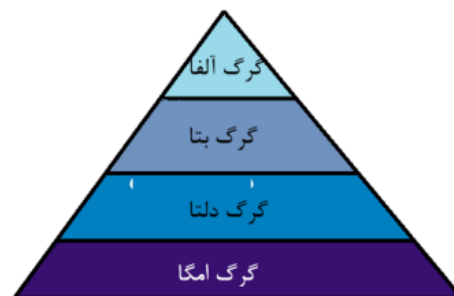


شکل ۲- فلوجارت الگوریتم تفنگدار خلاق



شکل ۴- فلوجارت الگوریتم گرگ خاکستری

در این سناریوی بهینه‌سازی، از رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله‌مراتب رهبری و روش شکار آن‌ها سناریوبرداری می‌شود. در این سناریو از چهار نوع گرگ خاکستری شامل آلفا (α)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (ω) استفاده شده است. α (آلفا): مناسب‌ترین جواب، β : مناسب‌ترین جواب با فاکتورگرفتن از α ، دلتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتورگرفتن از α و β ، امگا: مابقی راه‌حل‌های کاندیدشده) در بحث طراحی سناریو بهینه‌سازی گرگ خاکستری، مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی به صورت شکل ۳ است. در شکل ۴ فلوجارت این الگوریتم نشان داده شده است.



شکل ۳- سناریوی سلسله‌مراتبی گرگ‌ها

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل‌ها، از نمایه‌های ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و

بیشتری را نشان می‌دهد؛ بنابراین توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده، با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج مربوط به تغییرات دما و بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه در مدل‌های منتخب تحت سناریوی RCP85 در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۳- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل LARS-WG

پارامتر	MAE	NRMSE	RMSE	R ²
بارش	۰/۳۰	۱۳/۳۳	۵/۱۵	۰/۹۶
مینیمم دما	۰/۰۳	۲/۴۵	۰/۲۱	۰/۹۹
ماکزیمم دما	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۲۵	۰/۹۹

با توجه به شکل ۵، دمای شبیه‌سازی شده برای همه مدل‌ها تحت سناریوی انتشار RCP85 در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۲) نسبت به دوره پایه در همه ماه‌ها افزایش نشان می‌دهد. بیشترین افزایش دما در ماه جولای به میزان ۱/۶۸، ۲/۷۹ و ۱/۷۹ درجه سانتی‌گراد و در ماه نوامبر (معادل ۲/۲۹ درجه سانتی‌گراد) و آگوست (معادل ۱/۳۸ درجه سانتی‌گراد) است. کمترین افزایش دما برای همه مدل‌های استفاده شده در این تحقیق در ماه ژانویه رخ داده است که به میزان ۰/۷۳، ۱/۳۳، ۰/۲۲، ۱/۰۵ و ۰/۵۲ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین مدل RCP8.5 بیشترین افزایش دما را نسبت به دوره پایه در بین مدل‌های منتخب پیش‌بینی کرده است. میانگین بارش نیز در دوره آتی برای مدل استفاده شده در تحقیق در همه ماه‌ها دچار تغییر شده است، اما نظم خاصی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

در ادامه به منظور برآورد میزان سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد طی سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۴۲ پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده (دما و بارش) به همراه برداشت از آبخوان‌ها به عنوان ورودی مدل‌های فراکوشی انتخاب شد.

نش-ساتکلیف (NSE) مطابق با روابط زیر استفاده شد. بهترین مقدار برای این معیارها به ترتیب: یک، صفر، صفر، یک و صفر است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_{oi} - \bar{M}_o)(M_{ei} - \bar{M}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{oi} - \bar{M}_o)^2 \sum_{i=1}^n (M_{ei} - \bar{M}_e)^2}} \right]^2, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{ei} - M_{oi})^2}, 0 \leq RMSE \leq +\infty \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_{ei} - M_{oi}|, 0 \leq MAE \leq +\infty \quad (8)$$

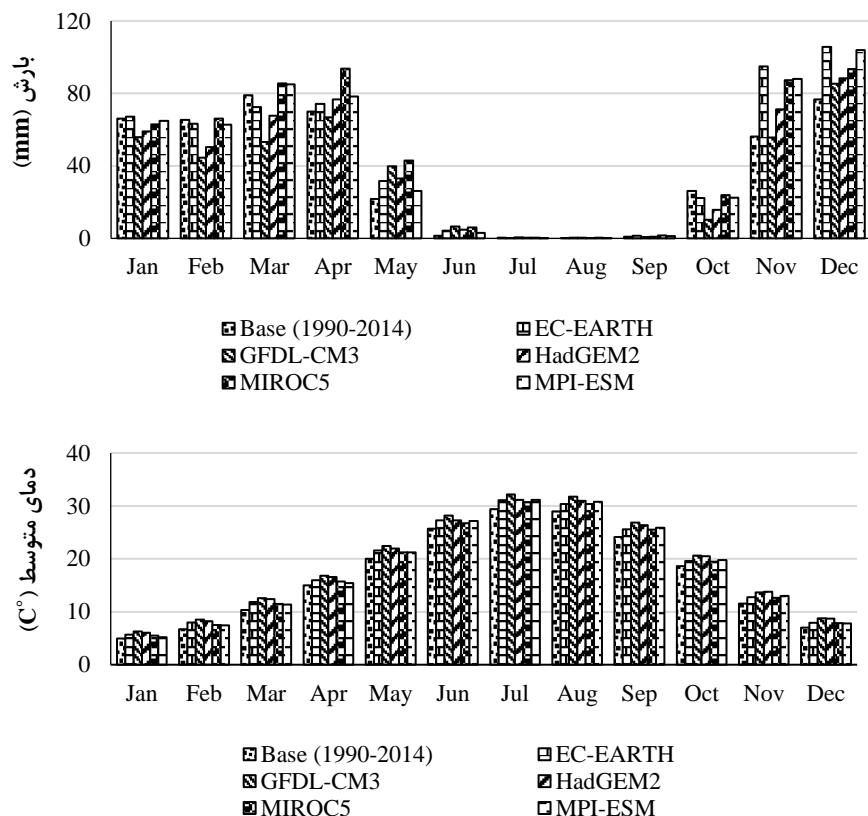
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ei} - M_{oi})^2}{(M_{ei} - \bar{M}_e)^2}, -\infty < NSE < 1 \quad (9)$$

در روابط بالا، M_{ei} و M_{oi} به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی t ام، N تعداد گام‌های زمانی، \bar{M}_o و \bar{M}_e نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی است. علاوه بر معیارهای فوق از نمودارهای پراکنش و سری زمانی مقادیر مشاهداتی-محاسباتی نسبت به زمان نیز برای تحلیل بیشتر نتایج استفاده شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل LARS-WG با استفاده از اطلاعات دوره پایه

نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های تولید شده با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های مشاهده شده در دوره پایه در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین در کلیه مدل‌های مورد بررسی بیشتر از ۰/۹۶ محاسبه شد و میانگین خطای مطلق (MAE) برای شبیه‌سازی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر به ترتیب ۰/۳۰، ۰/۰۳، ۰/۰۴ به دست آمد که نشان می‌دهد خطای شبیه‌سازی بارش بیشتر از بقیه پارامترهاست. شاخص‌های RMSE نیز در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر پارامترها به مراتب بیشتر بوده (به ترتیب ۵/۱۵ و ۱۳/۳۳) و خطای



شکل ۵- میانگین ماهانه دما و بارش در دوره پایه و دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۲ تحت سناریوی انتشار RCP85 برای مدل‌های منتخب

برآورد میزان نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد از چهار حلقه چاه پیژومتری استفاده شد. چاه‌های مشاهداتی موردبررسی دارای ۲۴۰ رکورد ثبت‌شده طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۲۰، در مقیاس زمانی ماهانه بوده که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون، به‌صورت تصادفی که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را پوشش دهد، انتخاب شد (Lin et al., 2006; Nagy et al., 2002).

در این تحقیق ملاک برتری مدل‌ها RMSE است. نتایج پژوهش نشان داد ساختار ترکیبی شماره ۴ عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارهای موردبررسی دارد. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، مدل WSVR در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی نتایج قابل‌قبولی ارائه می‌دهد و مدل AIG-SVR نیز از نتایج مطلوبی برخوردار است. به‌طور خلاصه پس از انتخاب بهترین ترکیب ورودی برای هر مدل، بررسی مدل‌های پیش‌بینی برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیژومتری، مطابق با جدول ۵ نشان می‌دهد که برای هر چهار چاه پیژومتری مدل هیبریدی WSVR عملکرد بهتری

در این پژوهش فرض شد میزان برداشت از آبخوان‌ها مطابق با ۲۰ سال گذشته بوده و افزایشی رخ نخواهد داد؛ بنابراین با فرض مذکور شبیه‌سازی صورت گرفت. بدین منظور ابتدا عملکرد مدل‌های فراکوشی در طی سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۰۲ بررسی شد. سپس با توجه به عملکرد مدل‌های موردبررسی، ساختار ترکیبی بهینه انتخاب شد و فرایند پیش‌بینی صورت گرفت. آموزش ماهیت سازوکار حاکم بر پدیده، نه‌تنها سبب پیچیدگی الگو و افزایش حافظه درگیر خواهد شد، بلکه سبب کاهش دقت مدل نیز می‌شود؛ بنابراین در الگوسازی سطح آب‌های زیرزمینی بایستی سعی کرد مؤثرترین داده‌های مشاهداتی را به‌عنوان داده‌های آموزشی انتخاب کرد (Chen et al., 2007). با توجه به اینکه در تحقیق حاضر نوسانات سطح آب مدنظر بوده، صرفاً از داده‌های نرمال‌شده دما، بارش، میزان برداشت از آبخوان‌ها و سطح آب زیرزمینی که در شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان بدون داده‌های مفقودشده در دسترس بود، به‌صورت ترکیب‌های مختلف مطابق با جدول ۴ استفاده شده است که از این پس از آن‌ها به‌عنوان الگو نام‌برده خواهد شد. برای

اول و سوم) نسبت به سایر مدل‌ها از عملکرد بهتری برخوردار بود، زیرا این مقادیر را نزدیک به مقادیر محاسباتی برآورد کرده است. در چاه پیژومتری سراب پرده مدل GWO-SVR در برآورد مقادیر چارک سوم و چارک اول از عملکرد مطلوبی برخوردار بود. نمودار عملکرد مدل تیلور در همه چاه‌های پیژومتر مورد بررسی در شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل WSVR دارای بالاترین کارایی و عملکرد بوده است، زیرا انحراف معیار پیش‌بینی شده نوسانات سطح آب زیرزمینی نزدیک‌ترین فاصله به انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی را دارد و ضریب همبستگی نیز بالاترین میزان را نشان می‌دهد. با توجه به همه معیارهای ارزیابی، مدل WSVR بالاترین قدرت پیش‌بینی و مدل GWO-SVR قابلیت پیش‌بینی کمتری دارد.

جدول ۴- ترکیب متغیرهای ورودی برای انتخاب بهترین

مدل		شماره
خروجی	ورودی	
H(t)	P(t)	۱
H(t)	P(t), T(t)	۲
H(t)	P(t), T(t), q(t)	۳
H(t)	P(t), T(t), q(t), H(t-1)	۴

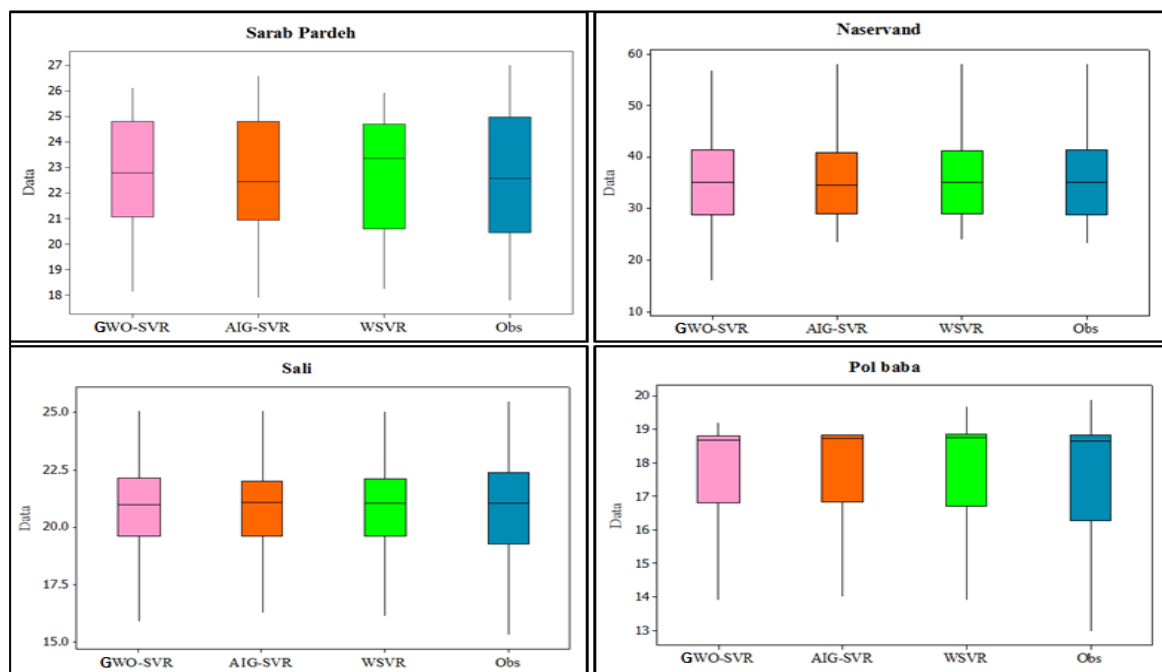
نسبت به سایر مدل‌های هیبریدی از جمله AIG-SVR و GWO-SVR دارد. در مجموع می‌توان بیان کرد مدل WSVR بهترین عملکرد و مدل GWO-SVR به دلیل گیرکردن الگوریتم گرگ خاکستری در نقاط بهینه محلی، ضعیف‌ترین عملکرد را دارند. همچنین مقدار BIAS برای همه چاه‌های مورد بررسی، مقداری مثبت داشته است که بیانگر کم‌برآوردی مدل است. نمودار جعبه‌ای نوسانات سطح آب زیرزمینی در شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل WSVR مطابقت مناسبی با نوسانات سطح آب زیرزمینی مشاهداتی دارد. همچنین AIG-SVR و GWO-SVR کمترین تطابق و همخوانی را دارند. همین نتیجه برای پیش‌بینی حداقل نوسانات سطح آب زیرزمینی مشاهداتی مشاهده شد. این دو نتیجه نشان می‌دهد که SVR از جمله مدل‌های هوشمند و دقیق است، اما نمی‌تواند مقادیر بیشینه را به خوبی پیش‌بینی کند؛ اما وقتی با الگوریتم‌ها یا مدل‌های فراکاوشی از جمله تبدیل موجک WT ترکیب شود، عملکرد آن در پیش‌بینی مقادیر بیشینه بسیار بهبود می‌یابد که با نتایج پژوهش Bahmani et al. (2021) مطابقت دارد. همچنین مطابق با شکل ۶ در چاه‌های پیژومتری سالی، ناصروند و پل باباحسین مدل WSVR در برآورد همه مقادیر (مینیمم، ماکزیمم، میانه، چارک

جدول ۵- ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای شبیه‌سازی چاه‌های پیژومتر مورد بررسی

سراب پرده							
مدل	آموزش			صحت‌سنجی			NS
	MAE(m)	RMSE(m)	R	MAE(m)	RMSE(m)	R	
WSVR	۰/۴۱۸	۰/۲۳۱	۰/۹۶۸	۰/۹۸۵	۰/۱۱۱	۰/۲۲۱	۰/۹۶۸
AIG-SVR	۰/۶۸۴	۰/۴۵۵	۰/۹۵۴	۰/۹۷۰	۰/۲۰۱	۰/۴۲۵	۰/۹۵۴
GWO-SVR	۰/۸۶۵	۰/۶۷۵	۰/۹۴۲	۰/۹۵۰	۰/۳۲۰	۰/۵۳۲	۰/۹۴۲
ناصروند							
مدل	آموزش			صحت‌سنجی			NS
	MAE(m)	RMSE(m)	R	MAE(m)	RMSE(m)	R	
WSVR	۰/۳۴۴	۰/۱۷۱	۰/۹۷۵	۰/۹۹۱	۰/۰۰۸	۰/۱۶۸	۰/۹۷۵
AIG-SVR	۰/۵۸۲	۰/۳۴۱	۰/۹۶۲	۰/۹۷۸	۰/۱۰۸	۰/۲۳۶	۰/۹۶۲
GWO-SVR	۰/۷۲۰	۰/۵۵۰	۰/۹۵۲	۰/۹۶۳	۰/۲۷۰	۰/۴۹۰	۰/۹۵۲
سالی							
مدل	آموزش			صحت‌سنجی			NS
	MAE(m)	RMSE(m)	R	MAE(m)	RMSE(m)	R	
WSVR	۰/۳۸۶	۰/۲۰۱	۰/۹۷۳	۰/۹۸۶	۰/۰۱۰	۰/۱۸۶	۰/۹۷۳
AIG-SVR	۰/۶۳۱	۰/۳۷۰	۰/۹۵۸	۰/۹۷۵	۰/۱۵۵	۰/۳۴۴	۰/۹۵۸
GWO-SVR	۰/۸۴۳	۰/۵۹۰	۰/۹۴۵	۰/۹۶۰	۰/۲۷۵	۰/۵۱۷	۰/۹۴۵

ادامه جدول ۵ - ارزیابی عملکرد مدل‌ها برای شبیه‌سازی چاه‌های پیژومتر مورد بررسی

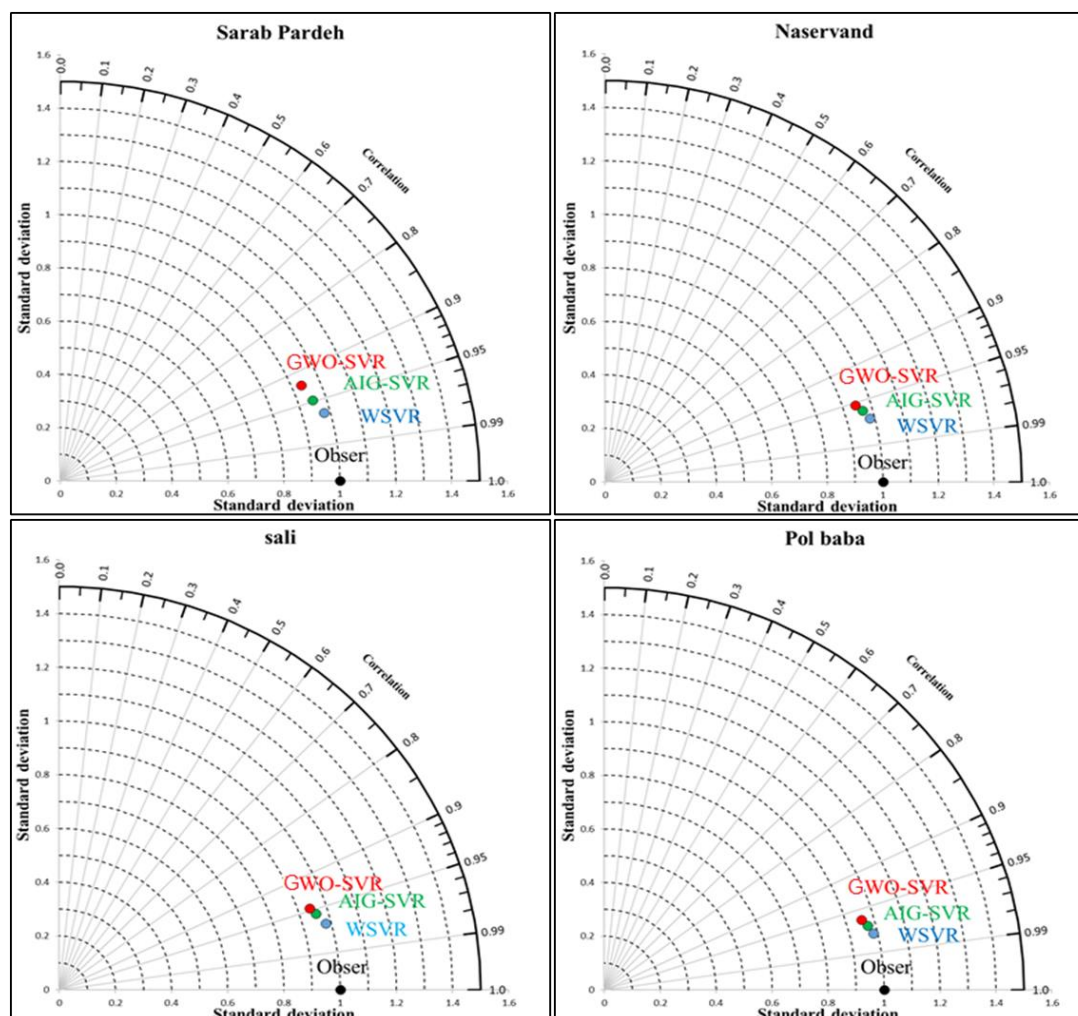
پل باباحسین				صحت‌سنجی				آموزش				مدل
NS	MAE(m)	RMSE(m)	R	NS	MAE(m)	RMSE(m)	R	NS	MAE(m)	RMSE(m)	R	
۰/۹۹۵	۰/۰۰۷	۰/۱۰۱	۰/۹۸۵	۰/۹۸۴	۰/۱۸۸	۰/۲۳۳	۰/۹۷۱	۰/۹۸۴	۰/۱۸۸	۰/۲۳۳	۰/۹۷۱	WSVR
۰/۹۸۰	۰/۱۱۱	۰/۱۵۷	۰/۹۷۲	۰/۹۷۶	۰/۲۳۱	۰/۴۷۲	۰/۹۵۳	۰/۹۷۶	۰/۲۳۱	۰/۴۷۲	۰/۹۵۳	AIG-SVR
۰/۹۶۶	۰/۲۳۱	۰/۴۰۱	۰/۹۶۰	۰/۹۶۰	۰/۴۷۵	۰/۶۳۰	۰/۹۴۰	۰/۹۶۰	۰/۴۷۵	۰/۶۳۰	۰/۹۴۰	GWO-SVR



شکل ۶- نمودار باکس پلات مدل‌های مورد بررسی

اساس مدل WSVR نسبت به سایر مدل‌ها ارجح‌تر است؛ بنابراین مدل WSVR انتخاب و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با توجه به پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های تغییر اقلیم انجام شد که نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است، با فرض ثابت بودن برداشت از آبخوان‌ها که عامل مؤثر بر نوسانات سطح آب زیرزمینی است، میزان افت در چاه‌های پیژومتری دشت خرم‌آباد کاهش یافته و روند نزولی دارد؛ به طوری که افت سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری سراب‌پرده در طی سال‌های ۲۰۲۸-۲۰۳۳ مشهود است.

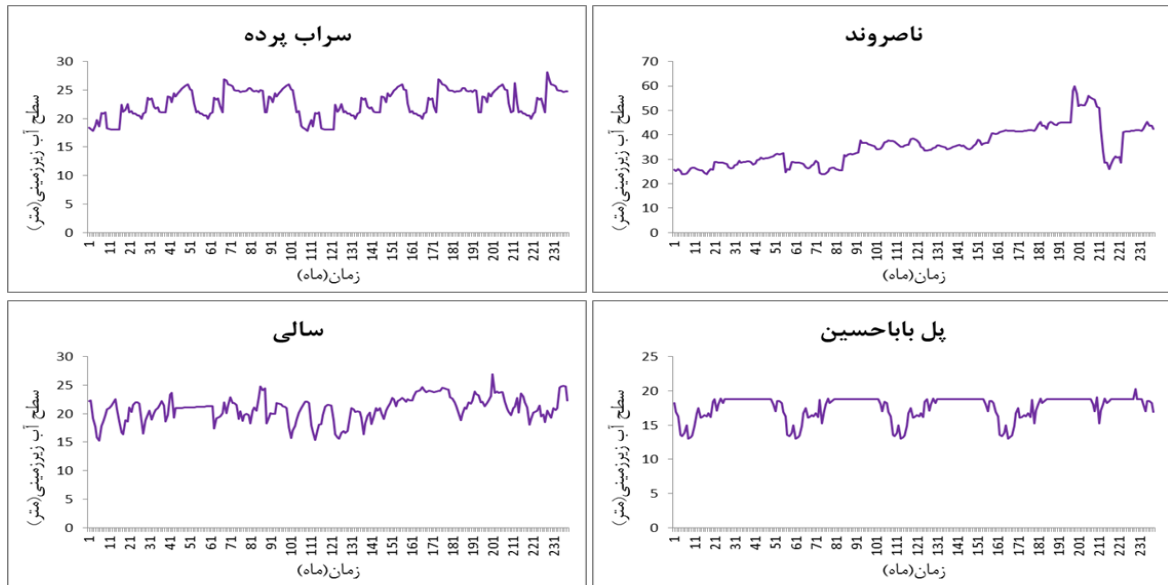
همان‌طور که در جدول ۵ قابل مشاهده است، مدل WSVR عملکرد بهتری داشته، زیرا تبدیل موجک WT با جدا کردن سیگنال به فرکانس‌های بالا و پایین ویژگی‌های چندمقیاسی سیگنال را در اختیار داشته و دقت مدل را تا حد قابل توجهی بالا می‌برد. سیگنال‌های بالاگذر و پایین‌گذر حاصل از تجزیه موجک، برازش بسیار خوبی با معادلات مجموع سینوسی دارند که هرچه تعداد مراتب این معادلات بیشتر می‌شود، دقت کار افزایش می‌یابد و بسامدهای مراحل پایین‌تر تجزیه نویز بیشتری دارند؛ اما با افزایش سطح تجزیه از میزان نویز کاسته شده و سیگنال نرم‌تر می‌شود (Wang et al., 2000). بر همین



شکل ۷- نمودار تیلور بخش صحت‌سنجی مدل‌های هیبریدی مورد بررسی

افت سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۴۲ حدود ۱-۱/۵ متر است. به‌منظور جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی در این دشت پیشنهاد می‌شود با نصب کنتور هوشمند روی چاه‌های کشاورزی مجاز که مالکان آن‌ها از منابع آب زیرزمینی به‌صورت بی‌رویه و خارج از پروانه بهره‌برداری برداشت می‌کنند، از افت سطح آب زیرزمینی جلوگیری شود. همچنین از حفر چاه‌های غیرمجاز جلوگیری شده و انسداد یابند و به‌منظور تعادل بخشیدن منابع آب زیرزمینی این دشت می‌توان از طریق نصب اطلاعیه به کشاورزان هشدار داد که از کشت محصولات آبدوست جلوگیری کنند، زیرا خسارات جبران‌ناپذیری به منابع آب زیرزمینی وارد می‌شود.

این روند در چاه پیزومتری ناصروند طی سال‌های ۲۰۳۹-۲۰۳۷ صعودی بوده و در بقیه سال‌ها روند نزولی داشته است و در چاه پیزومتری سالی طی سال‌های ۲۰۲۷-۲۰۲۳ و ۲۰۲۳-۲۰۴۲ روند نزولی مشاهده شد. همچنین چاه پیزومتری پل باباحسین بیشترین افت سطح آب زیرزمینی را در طی سال‌های ۲۰۳۷-۲۰۳۴ و ۲۰۴۲-۲۰۳۹ دارد. میزان افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری مورد بررسی در شکل ۸ به‌صورت واضح نشان داده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افت سطح آب در چاه‌های پیزومتری مورد بررسی شامل پل باباحسین، سالی، ناصروند و سراب‌پرده به ترتیب ۱/۲۳، ۱/۴۷، ۱/۱۸ و ۱/۱۰ متر است که بیشترین افت در چاه پیزومتری سالی ایجاد می‌شود. درنهایت با توجه به نتایج ذکرشده،



شکل ۸- نمودار سطح آب زیرزمینی پیش‌بینی شده طی سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۴۲

افزایش حافظه برخوردار هستند و مدل WSVR دقت بیشتر و خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی دارد. این امر ناشی از جدا کردن سیگنال‌ها به دو دسته بالاگذر و پایین‌گذر در تبدیل موجک WT است. نتایج حاصل از پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در سال‌های آتی نشان داد روند نزولی در همه چاه‌های پیژومتری مورد بررسی وجود دارد؛ به گونه‌ای که این افت در حدود ۱-۱/۵ متر با فرض ثابت بودن برداشت از آبخوان‌ها است؛ بنابراین با توجه به افت سطح آب زیرزمینی طی ۲۰ سال آینده، پیشنهاد می‌شود نصب کنتور هوشمند روی همه چاه‌های کشاورزی و صنعتی صورت گیرد و همچنین از حفر چاه‌های غیرمجاز جلوگیری شود. همچنین با اطلاع‌رسانی به مالکان چاه‌های کشاورزی از کشت محصولات آبدوست جلوگیری شود. این راهکار به نوبه خود برای تسهیل توسعه و پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریت آب‌های زیرزمینی مفید است و گامی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی به منظور بهبود کمیت منابع آب‌های زیرزمینی است.

منابع

1. Abbasian, M., Moghim, S. and Abrishamchi, A., 2019. Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135: 1465-1483.
2. Affandi, A.K. and Watanabe, K., 2007. Daily groundwater level fluctuation forecasting using

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان اذعان کرد، صنعتی‌شدن جوامع سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم‌شدن کره زمین می‌شود که این امر تأثیر بسزایی بر منابع آب زیرزمینی دارد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی تغییر اقلیم پارامترهای هواشناسی (دما و بارش) برای سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۴۲ پیش‌بینی شد و سپس با بهره‌گیری از مدل‌های هیبریدی فراکاوشی نظیر WSVR، AIG-SVR و GWO-SVR افت سطح آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد با استفاده از پارامترهای بارش، دما و برداشت از آبخوان‌های چهار چاه پیژومتری (سراب‌پرده، سالی، ناصروند و پل باباحسین) پیش‌بینی شد. ارزیابی مدل LARS-WG با استفاده از اطلاعات دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نشان داد این مدل عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی دارد. دمای شبیه‌سازی شده در همه مدل‌های اقلیمی (EC-EARTH, GFDL-CM3, HADGEM2, MIROC4 و MPI-ESM) مورد بررسی تحت سناریوی انتشار RCP85 در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۲) نسبت به دوره پایه در همه ماه‌ها افزایش داشته، درحالی‌که میانگین بارش روند مشخصی از خود نشان نداده است. نتایج حاصل از عملکرد مدل‌های هیبریدی WSVR، AIG-SVR و GWO-SVR با توجه به دوره آماری ۲۰۲۲-۲۰۰۲ نشان داد مدل‌های مورد بررسی در ساختار ترکیبی شامل همه پارامترهای ورودی از عملکرد بهتری به‌دلیل

- network model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6): 588-595.
12. Nourani, V., Komasi, M. and Mano, A., 2009. A multivariate ANN-wavelet approach for rainfall-runoff modeling. *Water Resources Management*, 23: 2877-2894.
 13. Nourani, V., Molajou, A., Tajbakhsh, A.D. and Najafi, H., 2019. A wavelet based data mining technique for suspended sediment load modeling. *Water Resources Management*, 33: 1769-1784.
 14. Ostu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans SMC*, 9 (1): 62-66.
 15. Pijarski, P. and Kacejko, P., 2019. A new metaheuristic optimization method: the algorithm of the innovative gunner (AIG). *Engineering Optimization*, 51(12): 2049-2068.
 16. Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E. and Rhodin, A., 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.
 17. Shin, K.S., Lee, T.S. and Kim, H.J., 2005. An application of support vector machines in bankruptcy prediction model. *Expert systems with applications*, 28(1): 127-135.
 18. Vapnik, V. and Chervonenkis, A., 1991. The necessary and sufficient conditions for consistency in the empirical risk minimization method. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 1(3): 283-305.
 19. Vapnik, V.N., 1995. The nature of statistical learning theory. Springer, New York, 4: 250-320.
 20. Vapnik, V.N., 1998. Statistical learning theory. Wiley, New York, 5: 250-320 .
 21. Wang, D., Romagnoli, J.A. and Safavi, A.A., 2000. Wavelet-based adaptive robust M-estimator for nonlinear system identification. *AIChE Journal*, 46(8): 1607-1615.
 22. Kardan Moghaddam, H., Ghordoyee Milan, S., Kayhomayoon, Z., Rahimzadeh Kivi, Z. and Arya Azar, N., 2021. The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. *Environ Monit Assess*, 193(4): 1-20.
 3. Bahmani, R. and Ouarda, T.B., 2021. Groundwater level modeling with hybrid artificial intelligence techniques. *Journal of hydrology*, 595, p.125659.
 4. Chang, F.J. and Chang, Y.T., 2006. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in water resources*, 29(1): 1-10.
 5. Chen, S.T. and Yu, P.S., 2007. Real-time probabilistic forecasting of flood stages. *Journal of Hydrology*, 340(1-2): 63-77.
 6. Endo, H., Kitoh, A., Ose, T., Mizuta, R. and Kusunoki, S., 2012. Future changes and uncertainties in Asian precipitation simulated by multiphysics and multi-sea surface temperature ensemble experiments with high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric general circulation models (MRI-AGCMs). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D16).
 7. Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E. and Pourghasemi, H.R., 2016. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, 83: 947-987.
 8. Li, T., Zhang, L. and Murakami, H., 2015. Strengthening of the Walker circulation under globalwarming in an aqua-planet general circulation model simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32: 1473-1480.
 9. Lin, J.Y., Cheng, C.T. and Chau, K.W., 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4): 599-612.
 10. Moravej, M., Amani, P. and Hosseini-Moghari, S.M., 2020. Groundwater level simulation and forecasting using interior search algorithm-least square support vector regression (ISA-LSSVR). *Groundwater for Sustainable Development*, 11, p.100447.
 11. Nagy, H.M., Watanabe, K.A.N.D. and Hirano, M., 2002. Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural soft computing technique. *Nature and Science*, 5(2): 1-10.