نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال شانزدهم | شماره شصت و یکم | بهار ۱٤۰٤
وصول: ۱٤۰۳/۰۸/۲٦ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۲/۱٦
صص ٤٤-۳۳

ارزیابی شاخص بارش استاندار با مدل هیبریدی مبتنی بر یادگیری ماشین (مطالعه موردی: استان لرستان)

حمیدرضا باباعلی[۱]، ابراهیم نوحانی[۲]، رضا دهقانی[*۳]

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، لرستان،ایران.

۲- استادیارگروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول،ایران.

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

چکیده

اثرات معینی از تغییرات آب و هوایی می تواند به طور بالقوه با تغییرات در الگوهای بارندگی، از جمله تغییر در شدت بارندگی یا وقوع خشکسالی مرتبط باشد. از این رو، پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند کمک ارزشمندی در کاهش پیامدهای زیانبار مرتبط با کمبود آب، به ویژه در مناطق کشاورزی یا مناطق شهری پرجمعیت باشد .استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی می‌تواند روشی مفید برای توصیف مؤثر شرایط خشکسالی باشد. در این تحقیق، از مدل هوشمند ترکیبی جدید مبتنی بر رویکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای پیش‌بینی شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه چهار ایستگاه بارانسنجی دورود، بروجرد، سلسه و دلفان واقع در استان لرستان توسعه داده شد. بدین منظور در این پژوهش از دو الگوریتم بهینه سازی شامل کرم شب تاب و گرگ خاکستری برای مدلسازی شاخص بارش استاندارد بکار برده شد. جهت مدلسازی از پارامتر بارش ایستگاههای بارانسنجی مورد مطالعه در سالهای ۱۳۸۲-۱۴۰۲ استفاده شد. به منظور ارزیابی عملکرد مدلها از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف استفاده شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب در کلیه دشت های مورد بررسی از مدل رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری عملکرد بهتری برخوردار است. در مجموع نتایج نشان داد استفاده از مدلهای هوشمند مبتنی بر رویکرد رگرسیون بردار پشتیبان می تواند رویکردی موثر در جلوگیری از خشکسالی باشد.

کلید واژه‌ها: رگرسیون بردار پشتیبان، شاخص بارش استاندارد، لرستان، مدلسازی.

* نویسنده مسئول: ۰۹۱٦۰۷۷۵۷٤۵ Email: r.kh72777@gmail.com

مقدمه

خشکسالی یک رویداد فاجعه آمیز طبیعی تدریجی و مهلک با پیامدهای اجتماعی–اقتصادی و زیست محیطی جهانی است. این پدیده یک فاجعه بسیار خطرناک مرتبط با آب و هوا است که تأثیر قابل توجهی بر محیط زیست و وجود انسان دارد (Kharin et al.,2007). هدف اصلی تجزیه و تحلیل خشکسالی، بهبود مدیریت و تکنیک های پیش بینی خشکسالی است. که این امر بر جنبه های مختلف خشکسالی، مانند اندازه، مدت، شدت و وسعت مکانی آنها تمرکز دارد(Choubin et al.,2016). برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی، از شاخص‌های مختلف خشکسالی برای اندازه‌گیری انحراف متغیرهای هواشناسی مانند بارش از میانگین بلندمدت آنها استفاده می‌شود (Hussain et al.,2017). به طور کلی، پایش خشکسالی بر چندین شاخص تکیه دارد، از جمله شاخص شدت خشکسالی پالمر(PDSI) ، شاخص خشکسالی مؤثر (EDI)، شاخص خشکسالی شناسایی(RDI) ، شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارش(SPEI) ، شاخص بارش استاندارد شده ناهنجاری وزنی (WASP) و شاخص های استاندارد خشکسالی (SDIs) هستند و فهرست جامعی از این شاخص‌ها و توضیحات آنها را می توان در زرگر و همکاران یافت(chen et al.,2023). با این حال، پرکاربردترین روش برای پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی، شاخص بارش استاندارد (SPI) است، در درجه اول به این دلیل که تنها از یک پارامتر (بارش) استفاده می‌کند(Ozger et al.,2011). شاخص بارش استاندارد را می توان با مدل سازی فیزیکی که به تلاش و اطلاعات متعدد نیاز دارد و یا به صورت مفهومی با استفاده از مدل های هوشمند مدل سازی کرد(Kisi et al.,2015). نتایج بدست امده از مدلهای فیزیکی و تجربی بدلیل ماهیت غیر خطی، پیچیدگی این شاخص دارای نوسانات زیادی می باشد(Yassen et al.,2017a). بنابراین امروزه از مدلهای هوش مصنوعی بدلیل ماهیت غیر خطی بودن و کاهش زمان جهت پیش بینی مسائل اقلیم شناسی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است که بصورت مختصر به چندین مورد اشاره می گردد.

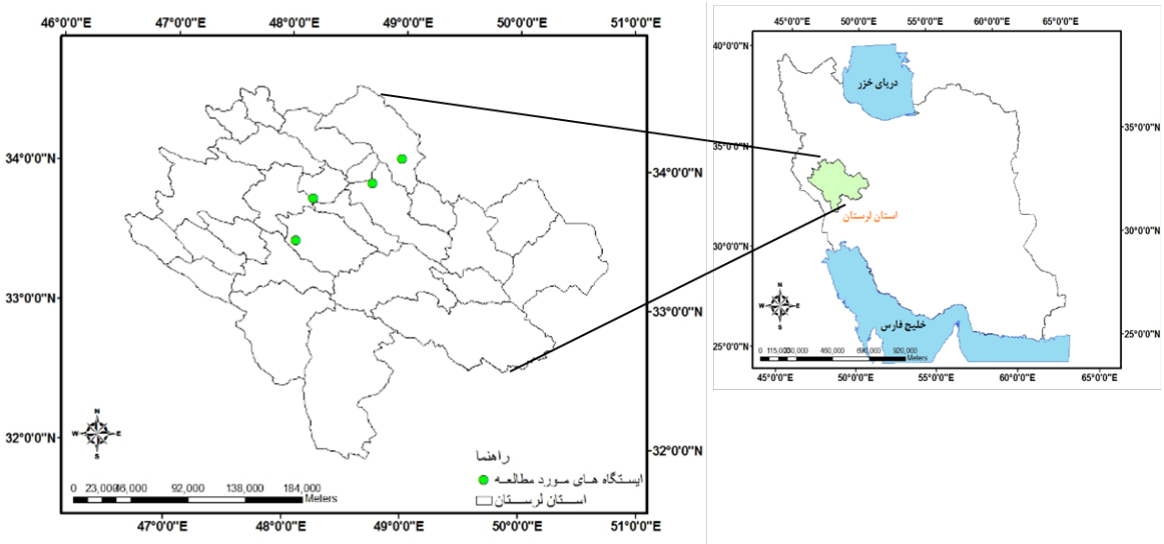
Tamrakar et al (2024)در پژوهشی بمنظور پیش بینی شاخص بارش استاندارد ایالت چاتیسگر واقع در کشور هند از مدلهای ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی استفاده کردند در این پژوهش از پارامترهای هواشناسی طی سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ استفاده نمودند نتایج نشان داد مدل ماشین بردار پشتیبان نسبت به مدل درخت تصادفی دقت بهتری از خود نشان داده است. Magallanes-Quintanar et al (2024) در پژوهشی بمنظور تخمین پارامترهای خشکسالی منطقه زاکاتکز واقع در کشور مکزیک از مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند در این پژوهش از سری زمانی پارامترهای اقلیمی طی سالهای ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ بهره بردند نتایج نشان داد مدلهای هوشمند از جمله مدل شبکه عصبی مصنوعی دقت مناسبی در تخمین شاخص های خشکسالی دارد.

درمجموع با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، مدل هوش مصنوعی رگرسیون بردار پشتیبان بعنوان ابزاری کارآمد در برآورد شاخص خشکسالی و مسائل هیدرولوژیکی می باشد. امروزه بمنظور افزایش کارایی و بهبود عملکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان، از ترکیب این مدل با الگوریتم های فراابتکاری بعنوان یک راهکاری مناسب جهت پیش بینی شاخص بارش استاندارد استفاده می شود. در این پژوهش نیز از مدل های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان–کرم شب تاب و رگرسیون بردار پشتیبان–گرگ خاکستری جهت تخمین شاخص بارش استاندارد دشت های بروجرد، دورود، سلسله و دلفان واقع در استان لرستان استفاده شد. دشت های بروجرد، دورود، دلفان و سلسله از مهم ترین دشت های این استان از لحاظ تولید محصولات کشاورزی می باشد شاخص های خشکسالی از جمله شاخص بارش استاندارد بر روی رشد و نمو محصولات کشاورزی، تولید محصولات آبزی، موقعیت جغرافیایی و گردشگری تاثیر بسزایی دارد. اهمچنین این دشت ها در طی سالهای اخیر با مخاطره جدی گرمای بیش از حد و خشکسالی مواجه شده است و این امر سبب کاهش تولید محصولات کشاورزی و کاهش درآمد اقتصادی ساکنین این دشت ها می گردد. بنابراین تحلیل و بررسی شاخص بارش استاندارد این دشت ها امری لازم و ضروری است. از طرف دیگر اگرچه استفاده از مدل رگرسیون بردار پشتیبان بطور گسترده برای تخمین میزان شاخص بارش استاندارد استفاده شده است. تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده و مقایسه الگوریتم های فراابتکاری گرگ خاکستری و کرم شب تاب در این دشت ها انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش از الگوریتم های بهینه سازی با هدف ترکیب با مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای برآورد شاخص بارش استاندارد دشت های بروجرد، دورود، سلسله و دلفان استفاده شد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

جغرافیای لرستان به دلیل قرار گرفتن این استان در رشته کوه‌های زاگرس جغرافیایی کوهستانی و چهارفصل است. این استان یکی از استانهای کوهستانی غرب ایران بوده که بیشتر مناطق این استان را کوههای زاگرس پوشانده است. آب و هوای استان لرستان متنوع و تنوع آب و هوا در آن از شمال شرق به جنوب غرب کاملا مشهود است. استان لرستان سومین استان پر آب کشور و۱۲ درصد آبهای کشور را در اختیار دارد. دشت‌های نورآباد، الشتر، بروجرد و درود در این استان در ناحیه های شمال و شمال شرق با آب و هوای معتدل مرکزی قرار دارند که در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های بارانسنجی مورد مطالعه در استان لرستان نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و ایستگاه های مورد بررسی

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه های مورد بررسی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا(m)	میانگین بارش(m)
دورود	٤٨/٠٦٥	٣٣/٤٧٦	١٨٠٠	٥٧/٦٨٩
بروجرد	٤٨/٧١٩	٣٣/٩٠٠	١٥٣٠	٤٢/٢٧٥
الشتر	٤٨/٢٠٧	٣٣/٧٨٦	١٥٦٠	٤٨/٠٥٤
نورآباد	٤٨/٩٧٠	٣٤/٠٨٢	١٤٥٠	٤٢/٥٦١

شاخص بارش استاندارد (SPI)

درک اینکه بارندگی تاثیرهای مختلفی بر منابع آب مانند آب زیرزمینی، ذخایر آب سطحی و برف دارد، منجر به تدوین شاخص SPI گردید. این شاخص بمنظور پایش خشکسالی اقلیمی ایالت کلرادوی آمریکا توسط مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ ابداع گردید. محاسبه شاخص SPI، مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری طولانی مدت داده های بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه در هر ایستگاه است.بسیاری از پژوهشگران از جمله مک کی و همکاران(et McKee al.,1993) توزیع گاما را پیشنهاد دادند. با فرضا پیروی مقدار بارندگی از توزیع گاما، گام بعدی در محاسبه شاخص SPI انتقال احتمال تجمعی بدست آمدهاز توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک است. در واقع SPI عبارتست از متغیری از تابع توزیع احتمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظراز توزیع گامای بدست آمده، یکسان باشد. برای تعیین سال های شاخص خشکسالی و ترسالی در دوره آماری ۱۳۷۲-۱۳۹۲ ، از شاخص بارش استاندارد شده SPI استفاده شد. بسیاری از محققان انعطاف پذیری شاخص SPI و قابلیت آن برای مقیاس های مختلف زمانی را تایید نمودند(Edwards .,1997). این شاخص برای هر منطقه براساس ثبت بارش های طولانی مدت آن محاسبه

می شود. ابتدا توزیع آماری مناسب برای آمار بلند مدت بارندگی ها برازش داده و سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می شود، بطوریکه استاندارد شده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره مد نظر صفر شود(Edwards .,1997). مقادیر مثبت SPI نشان دهنده بارش بیش از میزان متوسط و مقادیر منفی آن معنای عکس دارد. طبق این روش دوره خشکسالی رخ می دهد که شاخص SPI بطور مستمر منفی و به مقدار ۱- و کمتر برسد و زمانی پایان می یابد که SPI مثبت شود که در جدول ۲ نشان داده شده است. شاخص بارش استاندارد SPI طبق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$SPI_n=\frac{p_0+\sum p_{-i}-\mu_n}{\delta_n} \qquad (۱)$$

که در آن، n تعداد ماههایی که بارش تجمعی شان محاسبه شده است؛ P0 مقدار نرمال شده بارش ماه فعلی؛ P-i مقدار نرمال شده بارش ماه قبل؛ میانگین بارش تجمعی n ماه و انحراف معیار بارش تجمعی n ماه می باشد.

نسبت به انتخاب طرحوارههای فیزیکی بسیار حساس می‌باشد و عدم انتخاب دقیق این طرحوارهها باعث ایجاد خطاهای بزرگ می‌گردد. بنابراین با توجه به خصوصیات توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، بایستی نسبت به تعیین دقیق طرحواره مورد نظر اقدام نمود. از دیدگاه عملیاتی، یکی از جالبترین طرحوارهها، همرفت کومولوسی است، زیرا مربوط به پیش‌بینی زمانی و مکانی بارش است. طرحوارههای همرفتی متفاوت نه تنها بر مقدار عددی بارش بلکه بر تکامل دینامیکی آن نیز تأثیرمی‌گذارند، زیرا طرحوارهها نمایه‌های گرمایی عمودی متفاوتی دارند که موجب پاسخ دینامیکی متفاوت می‌شوند. نسل کنونی و آتی مدل‌های منطقه‌ای محدود می‌توانند در تفکیک‌های افقی ۱ تا ۳ کیلومتر اجرا شوند و همرفت‌های عمیق را با دقتی پذیرفتنی درنظر بگیرند، اما مقیاس‌های افقی در فرایندهای همرفتی بسیار کوچکتر از مقیاس‌های مدل‌های عددی بزرگ مقیاس و میان‌مقیاس هستند؛ لذا طی حدود چهل سال گذشته، روش‌های متعددی در مدل‌های NWP جهت بیان فرایندهای همرفت مرطوب به کارگرفته شده‌است که در ویژگی‌های مدل ابر، فرضیات و کارایی محاسباتی با هم فرق دارند. دلیل کند بودن پیشرفت‌های حاصل در این زمینه، وجود پرسش‌های اساسی در خصوص نحوه حل کردن مشکل و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در مدلسازی این فرایندها(آراکاوا، ۲۰۰٤) بوده است.

در زیر قوانین کلی برای پارامترسازی کومولوس در مدل WRF آمده‌است:

دامنه‌هایی با فاصله شبکه >=۱۰ کیلومتر: یک طرح کومولوس ضروری است.

دامنه‌هایی با فاصله شبکه <=۳ کیلومتر: بعید است که یک طرح کومولوس ضروری باشد.

دامنه‌هایی با فاصله شبکه >=۳ کیلومتر تا <=۱۰کیلومتر: این یک "منطقه خاکستری" است که در آن پارامتر کومولوس ممکن است ضروری باشد یا نباشد. در صورت امکان، سعی می‌شود از دامنه‌هایی با این اندازه اجتناب شود، اما اگر اجتناب ناپذیر است، بهتر است از طرحواره چند مقیاسی Kain Fritsch یا Grell-Freitas استفاده شود. خلاصه‌ای از پیکربندی مدل و طرحوارههای فیزیکی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول۲ – طبقه بندی مقادیر شاخص SPI

طبقات	مقادیر
ترسالی بسیار شدید	2>
ترسالی شدید	1.5<SPI<1.99
ترسالی	1<SPI<1.49
نرمال	-0.99<SPI<0.99
خشکسالی	-1.49<SPI<-1
خشکسالی شدید	-1.99<SPI<-1.5
خشکسالی بسیار شدید	2<

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 می‌گردد(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).

$$f(x)=W^{T}.\emptyset(x)+b \quad (۲)$$

$$y=f(x)+noise \quad (۳)$$

می‌توان از توابع مختلف کرنل برای ساخت انواع مختلف SVM- ε استفاده کرد. انواع توابع کرنل قابل‌استفاده در مدل SVM رگرسیونی عبارتند از: کرنل چندجمله‌ای و کرنل توابع پایه شعاعی (RBF) و کرنل خطی، به ترتیب طبق روابط زیر محاسبه می‌گردند. شکل زیر ساختار مدل ماشین بردار پشتیبان را نشان می دهد. با توجه به اینکه از پرکاربرد ترین توابع کرنل، کرنل پایه شعاعی، خطی و چند جمله ای می باشد(Vapnik and Chervonenkis.,1991; Basak et al.,2007). در این پژوهش از این سه تابع کرنل استفاده شده است. قابل ذکر است فرآیند محاسبات ماشین بردار پشتیبان براساس کدنویسی در محیط متلب انجام، و پارامترهای توابع کرنل از طریق سعی و خطا بهینه گردیدند.

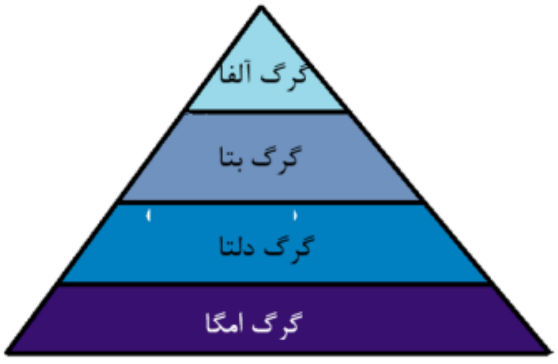
$$k(x,x_j)=(t+x_i.x_j)^{d} \quad (٤)$$

$$K(x,x_i)=\exp\left(-\frac{\|x-x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (٥)$$

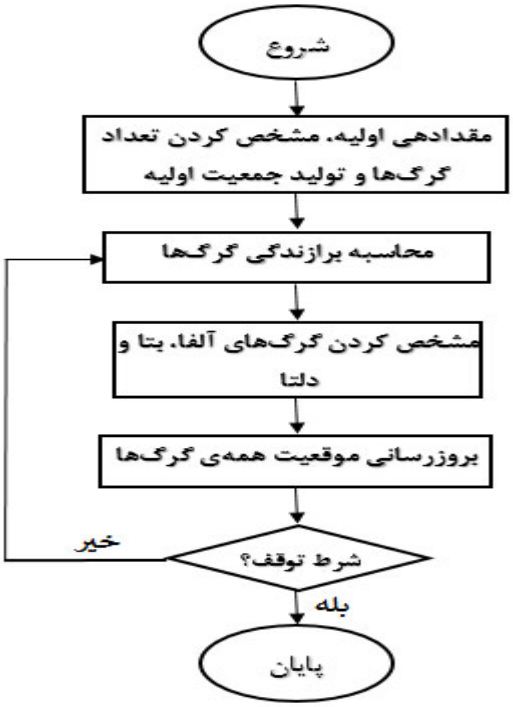
$$k(x,x_j)=x_i.x_j \quad (٦)$$

سناریوی گرگ خاکستری

گرگ خاکستری GWO یک الگوریتم شبیه‌سازی بوده که از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری و فرآیند سلسله‌مراتبی بهره گرفته است(Ostu., 2007). این الگوریتم بر مبنای جمعیت بوده و به‌سادگی به مسائل با ابعاد قابل‌گسترش قابل تعمیم است. در این الگوریتم شکارچیان رأس، گرگ‌های خاکستری هستند که در بالای هرم قرار می‌گیرند. این گرگ‌ها در یک دسته قرار دارند، که هر گروه ۵-۱۲ عضو به‌طور متوسط دارد. گرگ‌های واقع در رأس هرم دارای وظایف خاصی بوده و سلسله‌مراتب تسلط اجتماعی دقیقی دارند. در هر گله گرگ‌ها ٤ درجه جهت شکار کردن وجود دارد. در این سناریو بهینه‌سازی، از رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله‌مراتب رهبری و روش شکار آن‌ها سناریو برداری می‌شود. در این سناریو از چهار نوع گرگ خاکستری شامل آلفا(∝) ، بتا (β) ، دلتا (δ) و امگا (ω)برای شبیه‌سازی سلسله‌مراتب رهبری استفاده‌شده است. (∝آلفا: مناسب‌ترین جواب، βبتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از ∝ ، دلتا: مناسب‌ترین جواب با فاکتور گرفتن از ∝ و β ، امگا: مابقی راه‌حل‌های کاندید شده).



شکل ۲- سناریو سلسله‌مراتبی گرگ‌ها



شکل۳- نمودار جریانی سناریو گرگ خاکستری

الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم‌های فراابتکاری ازجمله روش‌های حل مؤثر مسائل پیچیده به شمار می‌روند که نیازی به محاسبه گرادیان تابع هدف ندارند و پیش‌فرض خاصی نظیر خطی بودن یا پیوسته بودن را در نظر نمی‌گیرند و بیشتر موارد، جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهند. الگوریتم کرم شب‌تاب یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری با رویکرد گروهی و دسته‌جمعی است که از رفتار نورافشانی کرم‌های شب‌تاب برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌نماید(Yang.,2008). در الگوریتم کرم شب‌تاب هر راه‌حل مسئله به‌صورت یک کرم شب‌تاب در نظر گرفته می‌شود و کرم‌های شب‌تاب برحسب شایستگی می‌توانند از خود نور تولید و سایر کرم‌های شب تاب را به سمت خود جذب نمایند. این الگوریتم، یک الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت محور و تصادفی می‌باشد که اولین بار توسط یانگ به جامعه علمی معرفی شد(Yan et al.,2012). این الگوریتم بر مبنای رفتار کرم‌های شب‌تاب در جذب جفت عمل می‌کند. سه فرضیه اساسی این الگوریتم بصورت زیر است.

الف)برای کرم‌های شب‌تاب جنسیت خاصی در نظر گرفته نمی‌شود

ب)هر کرم شب‌تاب به کرم‌های شب‌تاب دیگر با توجه به‌شدت نور آن‌ها جذب می‌شود

ج) در مسائل ماکزیمم سازی میزان شدت نور با تابع هدف رابطه مستقیم دارد و در مسائل مینیمم سازی شدت نور با تابع هدف رابطه عکس دارد.

میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب نسبی بوده و به فاصله بین دو کرم شب‌تاب و ضریب جذب نور بستگی دارد که از رابطه زیر قابل‌محاسبه است.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \qquad (۷)$$

در ای رابطه β ، میزان جذابیت کرم درخشیان تر در r=0 است(r فاصله کرم شب‌تاب کم‌نور نسبت به کرم شب‌تاب پرنورتر است). موقعیت کرم i ام پس از حرکت به سمت کر jام که درخشان‌تر است از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}\left(X_{jd}(t) - X_{id}(t)\right) + \alpha\left(rand - \frac{1}{2}\right) \qquad (۸)$$

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| \qquad (۹)$$

Rand عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و α بین ۰ و ۱ است و پارامتر تصادفی سازی نامیده می‌شود. در شکل زیر فلوچارت این الگوریتم نشان داده‌شده است.

معیار ارزیابی

در این تحقیق ارزیابی دقت و قابلیت مدل‌ها جهت شبیه‌سازی میزان شاخص بارش استاندارد بر اساس مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از نمایه‌های ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و نش ساتکلیف (NS) طبق روابط زیر صورت می‌گیرد. بهترین مقدار برای این چهار معیار به ترتیب یک، صفر، صفر و یک می‌باشد.

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})\,(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2\ \sum_{i=1}^{N}\ (y_i-\bar{y})^2}}\quad -1\le R\le 1 \qquad (۱۰)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ (x_i-y_i)^2} \qquad (۱۱)$$

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i-y_i|}{n} \qquad (۱۲)$$

$$NS=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}\ (x_i-y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}\ (x_i-\bar{y})^2}\quad -\infty\le NS\le 1 \qquad (۱۳)$$

در روابط بالا، R ضریب همبستگی، $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا برحسب mm، NS معیار نش ساتکلیف، x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی iام، N تعداد گام‌های زمانی، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. علاوه بر معیارهای فوق از نمودارهای پراکنش و سری زمانی مقادیر مشاهداتی- محاسباتی نسبت به زمان نیز جهت مقایسه و تحلیل بیشتر استفاده می‌گردد.

نتایج و بحث

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی شاخص بارش استاندارد دشت‌های بروجرد، دورود، دلفان و سلسله واقع در استان لرستان از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و گرگ خاکستری استفاده شد. پارامتر بارش (P) به‌عنوان ورودی و شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه (SPI) به‌عنوان پارامتر خروجی مدل در دوره زمانی ماهانه، سال ۱٤۰۲-۱۳۸۲ برای ایستگاه های بارانسنجی بروجرد، دورود، دلفان و سلسله بکار برده شد. هدف کلی از مدل‌های هوشمند بیان ارتباط بین متغیرهایی است که یافتن پیچیدگی آن‌ها در طبیعت کاری دشوار با عدم قطعیت بالا است. شاخص بارش استاندارد از پارامترهای مهم اقلیم شناسی است که تخمین آن در گام‌های زمانی آینده از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور در جهت کاهش خطا و همچنین برآورد پارامتر شاخص بارش استاندارد با دقت بالا با استفاده از کمترین پارامترهای ورودی روش ذکرشده مورداستفاده قرار گرفت که در مقایسه با روش‌های تقریبی به‌مراتب عملکرد بهتری را ارائه می‌نماید. هدف از این پژوهش دریافت این پیچیدگی طبیعی بین پارامترهای هواشناسی و ارائه مدل جهت پیش‌بینی در آینده است و ازآنجایی‌که میزان شاخص بارش استاندارد از اهمیت بالاتری نسبت به دیگر پارامترها برخوردار می‌باشد بنابراین این پارامتر به‌عنوان متغیر هدف انتخاب شد. در جدول ۳ ویژگی‌های آماری پارامتر بارش استفاده‌شده، ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت تست، بصورت تصادفی، که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را پوشش دهد، انتخاب شد(Nagy et al.,2002; Kisi et al.,2006; Dehghani et al.,2020).

جدول ۳- مشخصات آماری پارامتر بارش در ایستگاههای بارانسنجی مورد بررسی

شماره	نام ایستگاه	مینیمم	میانگین	ماکزیمم
۱	بروجرد	۰	٤۲/۲۷	۲۳۲
۲	دورود	۰	۵۷/٦۸	۳۰۲
۳	دلفان	۰	٤۲/۵٦	۳۳۰/۵
٤	سلسله	۰	۳۹	۲۵۱

به‌منظور مدل‌سازی میزان شاخص بارش استاندارد دشت های استان لرستان از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های گرگ خاکستری و کرم شب تاب استفاده شد. همچنین در مدل رگرسیون بردار پشتیبان از توابع محرکی که کرنل نام دارند، استفاده شد این توابع شامل توابع پایه شعاعی، چند ضلعی و خطی می باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار

گرفت. بدین منظور ابتدا با استفاده از پارامتر بارش مقادیر شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه محاسبه گردید و بعنوان خروجی مدل مشخص شد. سپس مقادیر بارش بعنوان ورودی مدل نرمال‌سازی شده و وارد مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان می‌شود. در سالهای اخیر به دلیل آنکه در مدل رگرسیون بردار پشتیبان مقادیر پارامترهای تنظیم توابع کرنل بصورت تصادفی انتخاب می‌گردند از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت افزایش دقت و کاهش خطای مدل استفاده‌شده است(Zeidalinejad et al.,2023; Dehghani et al.,2022). در این پژوهش نیز جهت افزایش عملکرد مدل از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و کرم شب تاب جهت بهینه نمودن مقادیر پارامترهای تنظیم استفاده‌شد. بنابراین در این پژوهش بعد از ورود اطلاعات پارامترهای ورودی به مدل و بهینه نمودن پارامترهای تنظیم ساختار مدل هیبریدی شکل گرفته و منجر به پاسخ محاسباتی مدل می گردد از انجاییکه معیار توقف در آموزش مدلهای هوش مصنوعی میزان خطا می باشد بنابراین مدل در کمترین میزان خطا متوقف و خروجی حاصل می گردد.

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است در کلیه مدلهای هیبریدی مورد بررسی کرنل توابع پایه شعاعی بهترین عملکرد را نسبت به سایر کرنل های مورد بررسی از خود نشان داده است. همچنین طبق معیارهای ارزیابی مطابق جدول ۳ مشاهده می گردد مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب در ایستگاه بروجرد با ضریب همبستگی ۰/۹٤٥، کمترین ریشه میانگین مربعات ۰/۰٤۲، کمترین میانگین قدر مطلق خطا ۰/۰۳٦ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹٥۲، در ایستگاه دورود ضریب همبستگی ۰/۹٥٥ ، کمترین ریشه میانگین مربعات ۰/۰۳۸ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا ۰/۰۳۰ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹٦۱، در ایستگاه دلفان ضریب همبستگی ۰/۹٦۰، کمترین ریشه میانگین مربعات ۰/۰۳۲ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا ۰/۰۲۸ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۷۰ و در ایستگاه سلسله ضریب همبستگی ۰/۹٥۸ ، کمترین ریشه میانگین مربعات ۰/۰۳٥ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا ۰/۰۳۱ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف ۰/۹٦۸ در مرحله صحت سنجی عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در اشکال ٤ و ٥ مودار سری زمانی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نشان داده‌شده است همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب نسبت به مدل‌های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان- گرگ خاکستری در تخمین اکثر نقاط ازجمله مینیمم، ماکزیمم و میانی دقت قابل قبولی از خود نشان داده است همچنین مدل‌ها رگرسیون بردار پشتیبان- گرگ خاکستری در تخمین مقادیر میانی عملکرد نسبتاً مطلوبی داشته است و در تخمین مقادیر مینیمم و ماکزیمم ضعیف عمل نموده است.

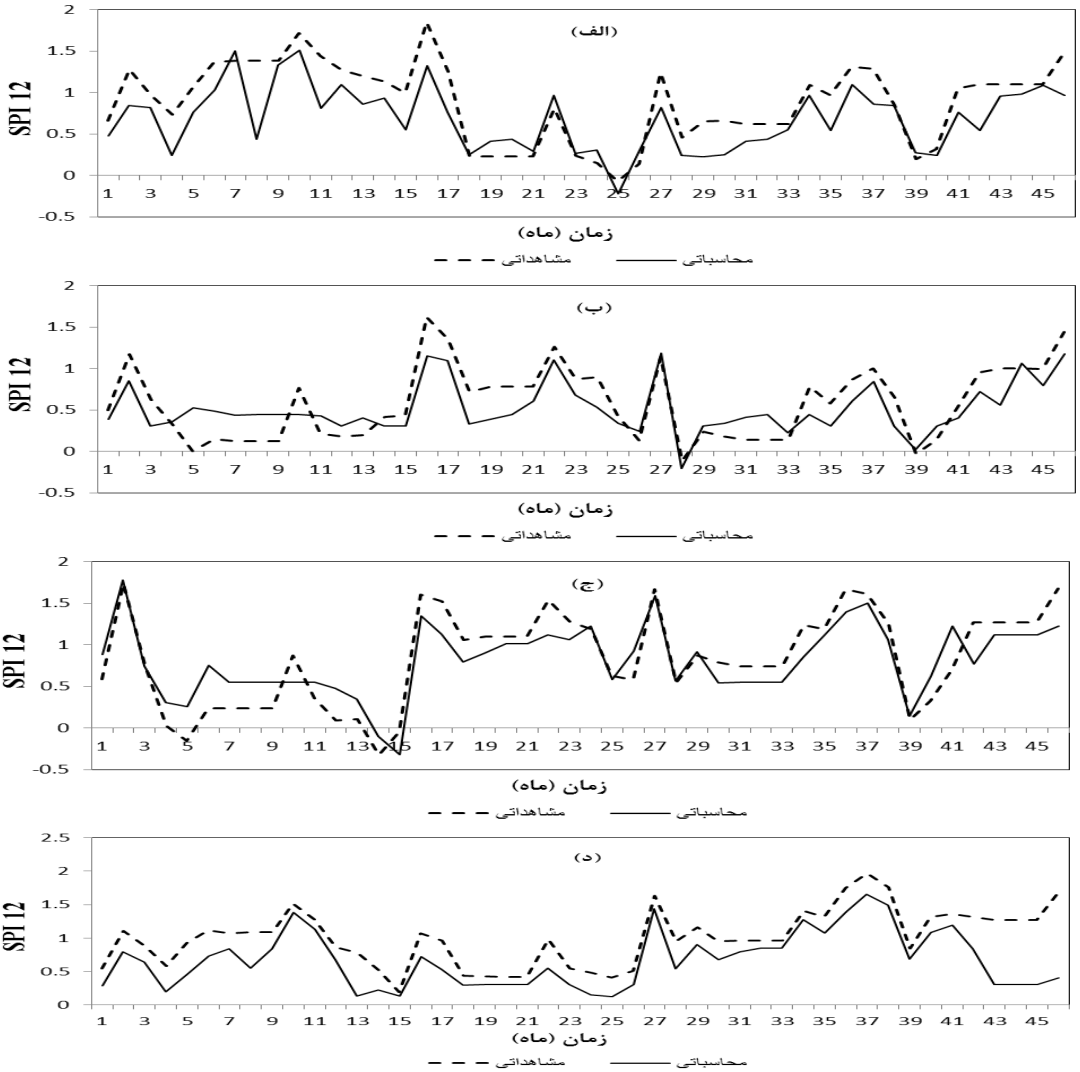
مدل رگرسیون بردار پشتیبان- الگوریتم کرم شب تاب ترکیبی از بهینه‌سازی پیوسته و گسسته است که زمان رسیدن به یک راه‌حل بهینه را در یک منطقه جستجوی وسیع کاهش می‌دهد زیرا از راه‌حل‌های بهینه محلی اجتناب می‌کند. این امر باعث می شود که الگوریتم برای حل مسائل غیر خطی با ابعاد بزرگ با سرعت مناسب در همگرایی به سمت یک جواب بهینه قابل قبول باشد. که این امر سبب گردیده این مدل از دقت بالایی نسبت به سایر مدلها برخوردار باشد این نتایج با نتایج پژوهش‌های Dehghani et al (2022) مطابقت دارد.

به طور کلی پیشنهاد می شود از مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب به عنوان مدلی با خطای ناچیز برای حل مسائل غیرخطی با ابعاد بزرگ با سرعت مناسب در همگرایی به سمت یک جواب بهینه استفاده شود . همچنین می توان بعنوان راهکاری نوین در پیش بینی میزان شاخص بارش استاندارد به منظور اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای بهبود منابع آبی و جلوگیری از خشکسالی دانست.

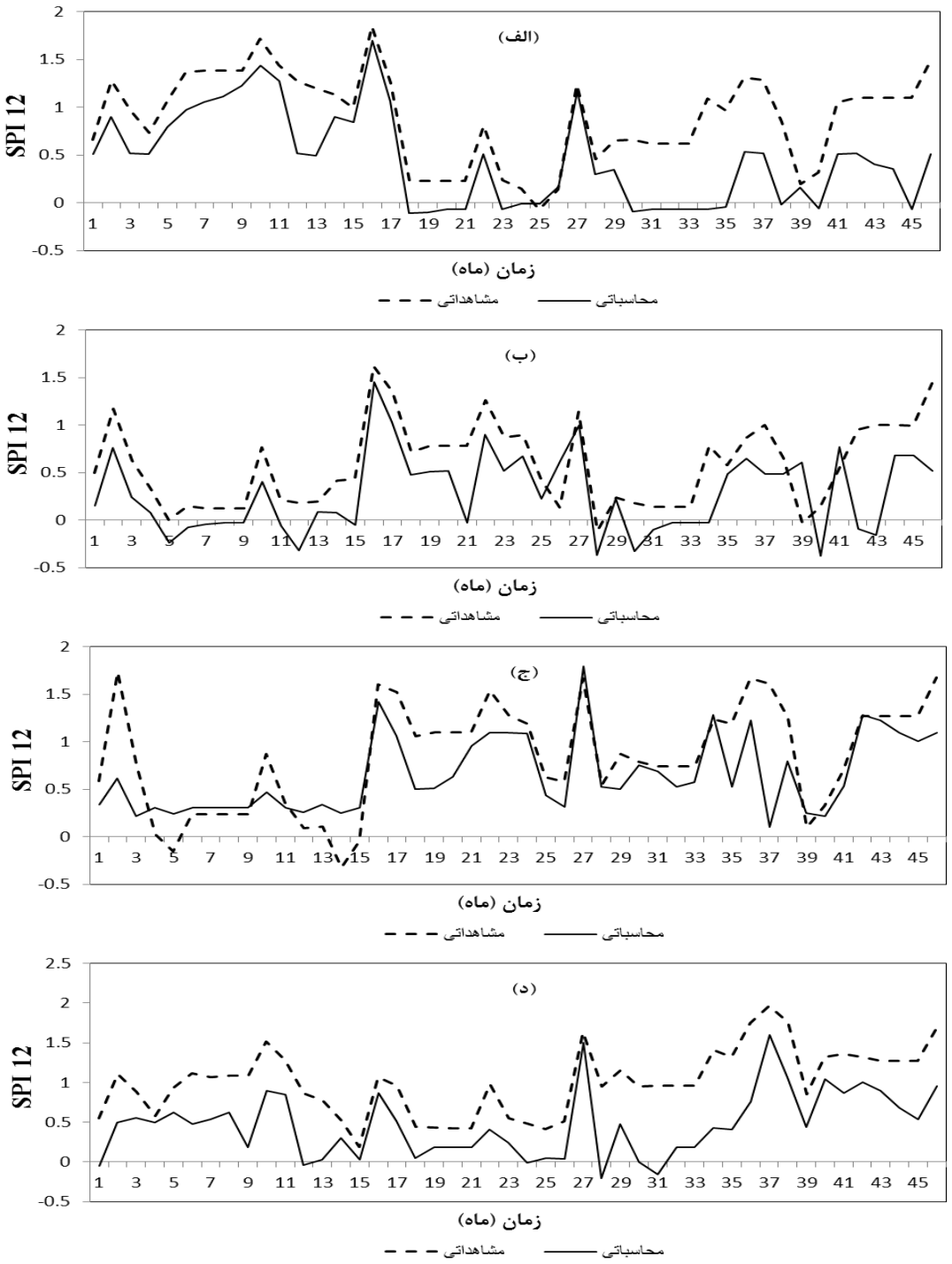
جدول٤- نتایج مدلهای مورد بررسی در تخمین شاخص بارش استاندارد

مدل	ایستگاه	آموزش				صحت سنجی			
		R	RMSE	MAE	NS	R	RMSE	MAE	NS
رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب	بروجرد	۰/۹۳۲	۰/۰۵٤	۰/۰٤٥	۰/۹٤۰	۰/۹٤٥	۰/۰٤۲	۰/۰۳٦	۰/۹٥۲
	دورود	۰/۹٤٤	۰/۰٤٥	۰/۰٤۲	۰/۹٥۲	۰/۹٥٥	۰/۰۳۸	۰/۰۳۰	۰/۹٦۱
	دلفان	۰/۹٥۱	۰/۰٤۲	۰/۰۳٦	۰/۹٦۱	۰/۹٦۰	۰/۰۳۲	۰/۰۲۸	۰/۹۷۰
	سلسله	۰/۹٤۸	۰/۰٤۸	۰/۰٤۰	۰/۹٥۸	۰/۹٥۸	۰/۰۳٥	۰/۰۳۱	۰/۹٦۸

مدل	ایستگاه	آموزش				صحت سنجی			
		R	RMSE	MAE	NS	R	RMSE	MAE	NS
رگرسیون بردار پشتیبان-گرگ خاکستری	بروجرد	۰/۹۲٥	۰/۰٦۰	**۰/۰٥۱**	۰/۹۳۰	۰/۹۳٥	۰/۰٥۰	۰/۰٤۱	۰/۹٤٥
	دورود	۰/۹٤۰	۰/۰٥۰	۰/۰٤٥	۰/۹٥۰	۰/۹٥۱	۰/۰٤٤	۰/۰۳٥	۰/۹٥٥
	دلفان	۰/۹٤۸	۰/۰٤٥	۰/۰۳۹	۰/۹٦۰	۰/۹٥۸	۰/۰۳٦	۰/۰۳۰	۰/۹٦٥
	سلسله	۰/۹٤٥	۰/۰٥۰	۰/۰٤٦	۰/۹٥۲	۰/۹٥٥	۰/۰۳۸	۰/۰۳۳	۰/۹٦٤



شکل ٤- نمودار مقادیر بهینه مشاهداتی و محاسباتی مدل های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان- کرم شب تاب برای داده های مرحله صحت سنجی الف) دورود ب) بروجرد ج) سلسه د) دلفان



شکل ۵– نمودار مقادیر بهینه مشاهداتی و محاسباتی مدل های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان- گرگ خاکستری برای داده های مرحله صحت سنجی الف) دورود ب) بروجرد ج) سلسه د) دلفان

نتیجه گیری

تخمین شاخص بارش استاندارد توسط مدل های ترکیبی مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان بعنوان ابزاری کارامد در کاهش اثرات خشکسالی می باشد. در پژوهش حاضر مطالعه موردی جهت ارزیابی عملکرد مدل فراابتکاری هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان بمنظور برآورد شاخص بارش استاندارد دشت های بروجرد، دورود، دلفان و سلسله واقع در استان لرستان صورت گرفت. بدین منظور از الگوریتم‌های

الهام گرفته از طبیعت شامل کرم شب تاب و گرگ خاکستری که با مدل رگرسیون بردار پشتیبان ترکیب شده، استفاده گردید. همچنین جهت مدلسازی از پارامتر بارش(P) به عنوان ورودی و شاخص بارش استاندارد(SPI) بعنوان خروجی مدل استفاده شد. بمنظور ساخت مدل هیبریدی بهینه رگرسیون بردار پشتیبان ۸۰ درصد دادها جهت آموزش و ۲۰ دردصد باقی مانده جهت آزمون بررسی و انتخاب شدند. نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-کرم شب تاب از دقت بالا و خطای ناچیزی برخوردار است در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر رویکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان می‌تواند در زمینه تخمین شاخص بارش استاندارد طی ۲۰ سال آماری برای سایر مناطق کشور و گامی در جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1- Ali. Z. Hussain. I.. Faisal. M.. Nazir. H.M. Hussain. T. Shad. M.Y. Mohamd Shoukry. A. Hussain Gani. S. 2017. Forecasting Drought Using Multilayer Perceptron Artificial Neural Network Model. Adv. Meteorol. 5(4).pp.224-235.

2- Basak. D. Pal. S. and Patranabis. D.C.2007. Support vector regression. Neural Inf Process. 11(2). 203-225.

3- Chen. L. Han. B. Wang. X. Zhao. J. Yang. W. Yang. Z. 2023Machine Learning Methods in Weather and Climate Applications: A Survey. Appl. Sci. 2023. 13. 12019.

4- Choubin. B. Malekian. A. Golshan. M. 2016. Application of Several Data-Driven Techniques to Predict a Standardized Precipitation Index. Atmosfera . 29. 121–128.

5- Dehghani R. Torabi H. 2021. Dissolved oxygen concentration predictions for running waters with using hybrid machine learning techniques. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01253-x

6- Dehghani. R. Torabi Poudeh. H. Younesi. H. Shahinejad. B. 2020. Daily Streamflow Prediction Using Support Vector Machine-Artificial Flora (SVM-AF) Hybrid Model. Acta Geophysica. 68(6):51-66. https://doi.org/10.1007/s11600-020-00472-7

7- Dehghani. R. Babaali. H.2022. Evaluation of Statistical Models and Modern Hybrid Artificial Intelligence in Simulation of Runoff Precipitation Process. Sustain. Water Resour. Manag. 8. 154 (2022). https://doi.org/10.1007/s40899-022-00743-9.

8- Edwards. D.C. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number 97-2. Colorado State University. Fort Collins. Colorado

9- Giddings. L. Soto. M. Rutherford. B.M. Maarouf. A. 2005. Standardized Precipitation Index Zones for México. Atmosfera . 18. 33–56.

10- Kharin. V.V. Zwiers. F.W. Zhang. X. Hegerl. G.C. 2007.Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations. J. Clim. 20. 1419–1444.

11- Kisi. O. M. Karahan. and Z. Sen. 2006. River suspended sediment modeling using fuzzy logic approach. Hydrol Process. 20(2): 4351-4362.

12- Kisi. O. Sanikhani. H. Zounemat-Kermani. M. Niazi. F. 2015. Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. Comput. Electron. Agric. 115. 66–77. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.04.015

13- Magallanes-Quintanar. R. Galván-Tejada. C. Galván-Tejada. J. Gamboa-Rosales. H.Méndez-Gallegos. S.García-Domínguez. A.2024. Auto-Machine-Learning Models for Standardized Precipitation Index Prediction in North–Central Mexico . Climate.12(7):102-122

14- McKee. T.B. N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Eighth Conference on Applied Climatology. January 17e22. Anaheim. California. 179-184.

15- Nagy. H. Watanabe . K. Hirano. M 2002. Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model. Journal of Hydraulics Engineering 128: 558-559.

16- Ostu. N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 9 (1): 62-66.

17- Ozger. M. Mishra. A.K. Singh. V.P. 2011.Estimating Palmer Drought Severity Index Using a Wavelet Fuzzy Logic Model

Based on Meteorological Variables. Int. J. Climatol. 31. 2021–2032

18- Tamrakar. Y. Das. I.C. & Sharma. S. 2024. Machine learning for improved drought forecasting in Chhattisgarh India: a statistical evaluation. Discov Geosci 2. 84. https://doi.org/10.1007/s44288-024-00089-z

19- Vapnik V. 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.

20- Vapnik. V.N .1995. The nature of statistical learning theory. Springer. New York. Pp: 250-320.

21- Vapnik VN .1998. Statistical learning theory. Wiley. New York. Pp: 250-320.

22- Yan X. Zhu Y. Wu J. Chen H. 2012. An improved firefly algorithm with adaptive strategies. Adv Sci Lett 16(1):249–254

23- Yang XS. 2008. Firefly algorithm. nature-inspired meta-heuristic algorithms. Wiley Online Libr 20:79–90

24- Yaseen. Z.M. Ebtehaj. I. Bonakdari. H. Deo. R.C. Mehr. A.D. Mohtar. W.H.M.W. Diop. L. El-shafie. A. Singh. V.P. 2017a. Novel approach for streamflow forecasting using a hybrid ANFIS-FFA model. J. Hydrol. 554. 263–276.

25- Zeidalinejad. N. Dehghani. R. 2023. Use of meta-heuristic approach in the estimation of aquifer's response to climate change under shared socioeconomic pathways. Groundwater for Sustainable Development.20(4). https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100882.