مقـالـه‌ي پـژوهشي

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۲۹، سال هشتم، زمستان ۱۴۰۰، صص ۲۰۱-۱۸۷
Hydrogeomorphology, Vol. 8, No. 29, Winter 2022, pp (187-201)
CC BY-NC

ارزيابي كارايي مدل‌هاي هوش مصنوعي هيبريدي نوين در برآورد دبي سيلابي

سعید رستمی [۱]، بابک شاهی نژاد [*۲]، حجت‌اله یونسی [۳]، حسن ترابی پوده [۴]، رضا دهقانی [۵]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه لرستان
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه لرستان
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه لرستان
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه لرستان
۵- دانش‌آموخته‌ی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه لرستان

وصول مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

سیل از جمله پدیده‌های طبیعی است که هر ساله خسارات جانی و مالی زیادی را در دنیا به بار آورده و مشکلات عدیده‌ای را بر سر راه توسعه‌ی اقتصادی و اجتماعی کشورها ایجاد می‌نماید. از این رو جهت کاهش خسارات، کنترل و هدایت این پدیده، برآورد دبی سیلابی و شناسایی عوامل مؤثر بر آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش، به منظور برآورد دبی سیلابی حوضه‌ی آبریز کشکان واقع در استان لرستان از مدل‌های هوش مصنوعی هیبریدی نوین شامل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق، شبکه عصبی مصنوعی-عنکبوت بیوه سیاه و شبکه عصبی مصنوعی- ازدحام مرغ در طی دوره‌ی زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۰ استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین مطلق خطا (MAE)، ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NSE) و درصد بایاس (PBIAS) استفاده گردید. نتایج نشان داد که بطور کلی مدل‌های هوش مصنوعی هیبریدی عملکرد بهتری نسبت به مدل منفرد در برآورد دبی سیلابی دارند. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار است. در مجموع نتایج نشان داد استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی هیبریدی در برآورد دبی سیلابی موثر بوده و می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب و سریع در مدیریت منابع آب مطرح شود.

کلمات کلیدی: تفنگدار خلاق، شبیه‌سازی، هوش مصنوعی، جنوب غربی، حوضه‌ی آبریز کشکان.

* نویسنده‌ی مسئول
E-mail:shahinejad.b@la.ac.ir

سیل یکی از پدیده‌های موجود در طبیعت است که از دیرباز، بشر شاهد وقوع آن می‌باشد. در ایران نیز به دلیل وسعت زیاد، اقلیم‌های مختلف و تغییرات زمانی و مکانی بارش‌ها در بیشتر حوضه‌های آبخیز، همه‌ساله اکثر مناطق کشور با وقوع سیلاب‌های عظیمی مواجه است که بسیاری از آنها، خسارات جانی و مالی فراوانی را به بار می‌آورند (مهدوی، ۱۳۷۶: ۲۲). یکی از ابزارها و روش‌های مطرح در مقابله با پدیده سیل که در برخی از کشورهای جهان رایج گشته، سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل می‌باشد که تجارب دهه‌های اخیر در این کشورها، نشان داده که با اجرا و طراحی صحیح این سیستم‌ها، می‌توان خسارات جانی و مالی ناشی از سیل را به میزان چشم‌گیری کاهش داد که یکی از این روش‌های سیستم‌های هوش مصنوعی می‌باشد (باباعلی و دهقانی، ۱۳۹۶: ۴۴-۵۴). امروزه سیستم‌های هوش مصنوعی بعنوان یک روش موثر جهت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد که روش شبکه عصبی مصنوعی از جمله‌ی این مدل‌ها است. مدل شبکه عصبی مصنوعی بدلیل ماهیت سعی و خطا در برآورد پارامترهای شبکه (وزن‌ها، بایاس) دارای خطا می باشد که محققان جهت کاهش خطا و بهبود عملکرد آن از ترکیب این مدل با الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می نمایند که نتایج مطلوبی داشته است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی ترکیبی در مطالعات برآورد دبی سیلابی مورد توجه محققین قرارگرفته است که از جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم کرم شب‌تاب از عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی در پیش‌بینی دبی سیلابی رودخانه‌ی اجیدر واقع در ترکیه برخوردار است (قربانی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۲۹).

تبدیل موجک گسسته با شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی منفرد (ANN) دارد و این مدل ترکیبی می تواند ابزاری مفید برای حل بسیاری از مسائل پیش‌بینی باشد (تیخامارین و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۴۲).

مدل های شبکه عصبی مصنوعی-ژنتیک و انفیس-ژنتیک دقت پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل درخت تصمیم در پیش‌بینی جریان سیلابی رودخانه‌های نیلوم و کنهار در پاکستان دارد (عدنان و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۶۸)

مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی- الگوریتم ژنتیک عملکرد مطلوبی نسبت به مدل شبکه عصبی منفرد جهت پیش بینی دبی سیلابی رودخانه فرات در ترکیه دارد (کلینک و هازندار، ۲۰۲۲: ۲۰۱).

در مجموع با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، ارائه راهکار و پیش‌بینی مناسب منابع آب سطحی جهت جلوگیری از پدیده‌ی سیل در کشور ایران لازم و ضروری می‌باشد. از این‌رو حوضه‌ی آبریز کشکان بعنوان مهم‌ترین زیرحوضه‌ی آبریز کرخه اهمیت بسزایی از لحاظ شرب و کشاورزی داشته و یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز از

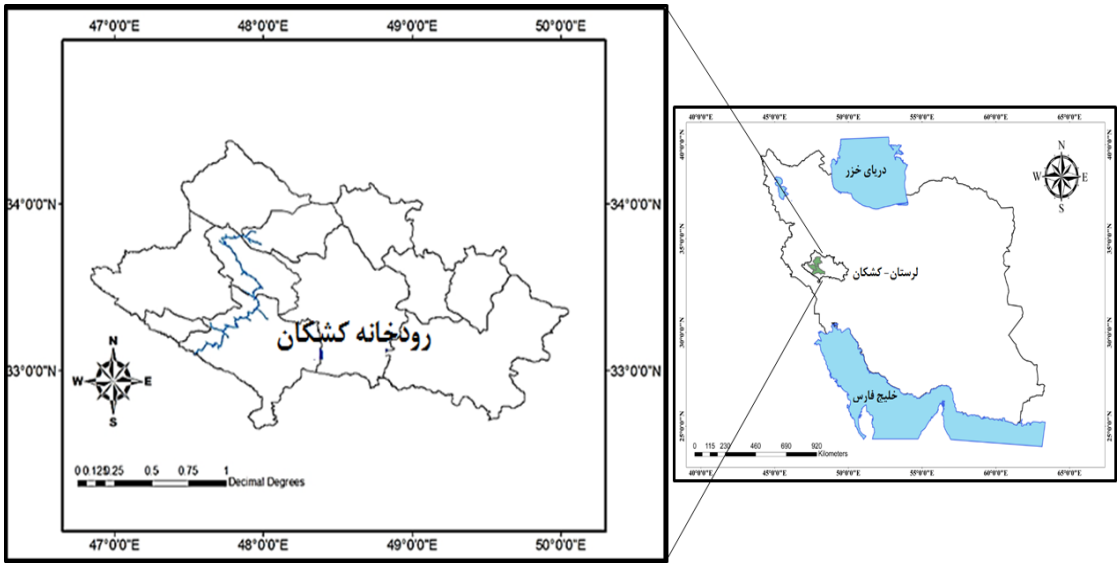
جهت تولید محصولات کشاورزی بوده و آب آبیاری این دشت از آب‌های سطحی تأمین می شود که تصرف در حریم و بستر رودخانه برداشت‌های بی‌رویه بوسیله‌ی موتور تلمبه سبب گردیده در طی سال‌های اخیر خسارات جبران‌ناپذیری برای جان و مال انسان‌ها ایجاد شود. بنابراین، برآورد دبی سیلابی به‌منظور پیش‌بینی و اقدامات مدیریتی جهت بهبود آن بیش‌ازپیش ضروری است. لذا هدف از این تحقیق برآورد دبی سیلابی با استفاده از آمار و اطلاعات سیلاب و بارش آنها و بهره‌گیری از مدل تلفیقی شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی نوین همچون تفنگدار خلاق، عنکبوت بیوه سیاه، ازدحام مرغ، ملخ و مقایسه‌ی آنها با مدل‌های منفرد و آماری است.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه‌ی مورد مطالعه

رودخانه‌ی کشکان سیل‌خیزترین رودخانه استان لرستان است. حوضه‌ی آبریز کشکان با مساحت ۶۶/۹۷ کیلومترمربع در ناحیه‌ی جنوب غربی ایران واقع‌شده است. این حوضه بخش مهمی از سرشاخه‌های پرآب رودخانه کرخه را تشکیل می‌دهد و حدود یک‌سوم خاک لرستان را در بر می‌گیرد. حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی کشکان در تقسیم‌بندی هیدرولوژی ایران جزئی از حوضه‌ی آبریز خلیج‌فارس به‌حساب می‌آید. این رودخانه در بین طول‌های جغرافیایی ″ ۳۴ ′۳۱ ° ۴۷ درجه تا ″ ۶ ′۱۲ ° ۴۸ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″ ۴۵ ′۵ °۳۳ تا ″ ۴۱ ′۴۴ ° ۳۳ درجه شمالی در استان لرستان واقع شده است. موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده‌شده است. بر اساس روش آمبروژه، حوضه‌ی رودخانه کشکان در محدوده‌ی اقلیم نیمه‌مرطوب سرد با متوسط بارندگی سالانه ۳۴۲ میلی متر و متوسط دبی سالانه ۲۸ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد.

در این پژوهش به منظورمدل‌سازی دبی سیلابی حوضه‌ی آبریز کشکان واقع در استان لرستان آمار و اطلاعات روزانه شامل دبی و بارش ایستگاه هیدرومتری کشکان در طی دوره‌ی آماری ۱۴۰۰-۱۳۹۰ استفاده شد بدین منظور ۳۶۵۰ داده ایجاد شد و جهت شبیه‌سازی دبی سیلابی و برآورد آن سیلاب‌های این دوره‌ی زمانی ده ساله استخراج و بررسی گردید، بگونه‌ای که بارش متناظر با سیلاب نیز از آمار و اطلاعات استخراج و مجموعاً ۱۲۲ مقادیر سیلابی حاصل شد. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت آزمون، بصورت تصادفی، که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را پوشش دهد، انتخاب شد (ناگای، ۲۰۰۲: ۲۱؛ کیسی و کارهان، ۲۰۰۶: ۳۸). در ادامه نتایج مدل‌های مورد استفاده ارائه می‌گردد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی رودخانه‌ی کشکان

Figure (1): Geographical location of Kashkan River

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی دبی سیلابی حوضه‌ی آبریز کشکان واقع در استان لرستان از آمار و اطلاعات ۱۰ ساله در مقیاس زمانی روزانه دبی و بارش روزانه ایستگاه هیدرومتری کشکان استفاده شد سپس مقاطع زمانی که سیلاب رخ داده است از داده ها استخراج و بارش متناظر آن نیز جدا شد. سپس از رویکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی جهت شبیه‌سازی دبی سیلابی استفاده شد. با توجه به اینکه مدل شبکه عصبی مصنوعی طبق پژوهش‌های اخیر بدلیل وجود وزنها و بایاس های تصادفی دارای خطا می‌باشد بنابراین جهت کاهش خطای مدل از راهکار بهینه نمودن پارامترهای تنظیم (وزن‌ها و بایاس‌ها) بوسیله‌ی الگوریتم‌های فراابتکاری جدید استفاده شد. در طی سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در خصوص مدل هیبریدی شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های فراابتکاری صورت گرفته است اما در این پژوهش از الگوریتم‌های نوین که تاکنون در فرآیندهای هیدرولوژیکی یا هیدروژئولوژی موردبررسی قرار نگرفته است استفاده شد که بتوان مشکلات و چالش این مدل را کاهش داد و الگوریتمی جدید جهت تسهیل در فرآیند شبیه‌سازی معرفی نمود و همچنین بتوان با استفاده از پارامترهای وابسته دبی سیلابی را در آینده پیش‌بینی، و از بروز خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری نمود. بنابراین در این پژوهش از کاربرد الگوریتم‌های نوین تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه، ازدحام مرغ و ملخ استفاده شد و به منظور توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری جدید با مدل منفرد شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد.

۲-۲- شبکه عصبی مصنوعی

امروزه شبکه عصبی مصنوعی در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب کاربرد وسیعی دارد (نورانی و همکاران، ۲۰۰۹). ساختار شبکه عصبی معمولا از لایه‌ی ورودی، لایه‌ی میانی و لایه‌ی خروجی تشکیل شده است.لایه‌ی ورودی یک لایه انتقال‌دهنده و وسیله‌ای برای تهیه کردن داده‌ها، لایه‌ی خروجی شامل مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه و لایه‌ی میانی یا مخفی که از گره‌های پردازشگر تشکیل شده‌اند، محل پردازش داده‌ها است. نخستین کاربرد عملی شبکه‌های عصبی مصنوعی با معرفی شبکه‌های پرسپترون چند لایه انجام گرفت. در این شبکه‌ها ثابت شده است که از میان الگوریتم‌های یادگیری، الگوریتم پس انتشار خطا با ساختار شبکه پیش‌خور و تعداد سه لایه بطور رضایت‌بخشی در حل مسائل پیچیده مهندسی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی کاربرد دارد (توکارو جانسون، ۱۹۹۹). از رایج ترین توابع محرک استفاده شده در شبکه‌های انتشار برگشتی می‌توان توابع محرک سیگموئید و تانژانت هیپربولیک ذکر کرد (نورانی و همکاران، ۲۰۰۹).

۲-۳-الگوریتم تفنگدار خلاق

الگوریتم تفنگدار خلاق[1] (AIG) یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری بسیار جدید است که توسط پیجارسکی و کاسجکو (۲۰۱۹) ارائه شد. با توجه به ساختار بسیار پرقدرت و نیرومند این الگوریتم، پیش‌بینی می‌شود که در آینده با موفقیت و به صورت چشمگیری در زمینه‌های مختلف علمی و فناوری مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم دارای کارآیی و سرعت بالا در زمینه‌ی حل کارهای مختلف بهینه‌سازی (مثل زمینه‌ی مکانیک و عملکردهای ریاضی بنچمارک) می‌باشد. 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 می‌باشد. همچنین این الگوریتم به خاطر استفاده از بردارهای جواب، بر مبنای روش‌های swarm، اکتشاف بسیار زیادی در فضای جستجو 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 دارای کارایی بسیار بالا در اجتناب از جواب‌های بهینه محلی دارد (گیر افتادن در جواب‌های بهینه محلی). از این الگوریتم می‌توان بصورت حیرت‌آوری برای حل توابع هدف با اشکال مختلف و تابع چند بعدی مختلف به کار رود. پیش‌بینی می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده 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.

۲-۴-الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه

این الگوریتم اولین بار توسط سباستین و پتر (۲۰۰۹) معرفی شد و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی

1- Algorithm Innovative Gunner

استوار است، بگونه‌ای که عنکبوت‌های اولیه، به‌صورت جفت، سعی در تولید مثل نسل نوین داشته و بیوه سیاه ماده، نر را در حین جفت‌گیری یا بعد از آن خورده و سپس او نطفه‌های ذخیره‌شده در حفره‌های اسپرم خود حمل می‌کند و آنها را در کیسه‌های تخمک آزاد می‌کند. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی، مقادیر متغیرهای مسئله باید به‌عنوان یک ساختار مناسب برای حل مسئله فعلی تشکیل شوند. در اصطلاحات الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، این ساختار به ترتیب "کروموزوم" و "موقعیت ذره" نامیده می‌شود، اما در الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه (BWO) به آن "بیوه" گفته می‌شود. در الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه (BWO)، راه‌حل بالقوه هر مسئله به‌عنوان عنکبوت بیوه سیاه در نظر گرفته‌شده است.

۲-۵- الگوریتم ازدحام مرغ

بهینه‌سازی ازدحام مرغ (CSO)، یک الگوریتم الهام گرفته زیستی است که برای بهینه‌سازی تک هدفه مورد استفاده قرار می‌گیرد (زواچه و همکاران[1]، ۲۰۱۹). این الگوریتم توسط منگ و همکاران[2] (۲۰۱۴) ارائه گردیده است. بهینه‌سازی ازدحام مرغ از نظم سلسله مراتبی و رفتارهای یک دسته مرغ هنگام جستجوی غذا تقلید می‌کند، جایی که هر مرغ نشان‌دهنده‌ی یک راه‌حل بالقوه برای یک مسئله بهینه‌سازی است. در اصل، CSO از چهار قانون زیر برای ایدآل‌سازی رفتار مرغ‌ها استفاده می‌کند:

۱- دسته یا ازدحام مرغ گروه مرغ متشکل از چندین گروه است که هر گروه خروس غالب و برتر و یک جفت مرغ و جوجه دارد.

۲- در هر گروه از دسته مرغ، اعتبار و هویت مرغ (خروس، مرغ و جوجه) به ارزش و مقدار تناسب خود مرغ بستگی دارد. جوجه‌هایی که بهترین مقادیر تناسب را دارند، به‌عنوان خروس شناخته می‌شوند. هرکدام از آنها در یک گروه از خروس جلوتر خواهند بود. جوجه‌هایی که از نظر آمادگی جسمانی ضعیف‌تر هستند، بعنوان جوجه شناخته می‌شوند و بقیه به عنوان مرغ‌ها در نظر گرفته خواهند شد.

۳- بعد از هرچند مرحله (G)، ترتیب سلسله مراتبی، رابطه سلطه و رابطه مادر و کودک باید کاملاً تغییر کند.

۴- جوجه‌ها در جستجوی غذا جفت خروس خود را دنبال می‌کنند. فرض می‌شود که مرغ‌ها به‌طور تصادفی غذای خوبی را که دیگران پیدا کرده‌اند، می‌دزدند. جوجه‌ها در اطراف مادران خود به دنبال غذا می‌گردند. خروس در رقابت برای غذا از مزیت برخوردار است.

۲-۶- الگوریتم ملخ

الگوریتم ملخ‌ها (GOA) توسط صارمی و همکاران (۲۰۱۷) منتشر شـده است. این الگوریتم نیز همانند سایر

1- Zouache et al.
2- Meng et al.

الگوریتم‌های بهینه سازی سعی در یافتن جواب بهینه در میان چندین پاسخ دارد (جراح و همکاران، ۲۰۱۸). الگوریتم بهینه‌سازی ملخ از رفتار جستجوی غذا ملخ الهام گرفته است. این الگوریتم جزء یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری به شمار می‌رود. این الگوریتم در گروه الگوریتم‌های هوش جمعی قرار می‌گیرد و با الهام از رفتار اجتماعی ملخ‌ها و نحوه‌ی تأثیرپذیری هر ملخ از محیط پیرامونش طراحی شده است (آرورا و آناند، ۲۰۱۹). ملخ در اصل یک حشره است و به عنوان آفتی در نظر گرفته می شود که معمولاً به صورت منفرد دیده می شود. با این حال، آنها یکی از بزرگ‌ترین گروه موجودات را تشکیل می‌دهند. چرخه‌ی زندگی ملخ به دو مرحله‌ی عمده تقسیم می‌شود: لارو و بزرگسالی. ویژگی بارز در مرحله لارو حرکت کند و گام‌های کوچک است. از طرف دیگر، حرکت بزرگ‌تر و غیرمنتظره صفت حیاتی گروه ملخ در مرحله‌ی بزرگسالی است. در هر دو مرحله‌ی GOA، فرآیند جستجوی منبع غذایی به دو گرایش تقسیم شده است: اکتشاف و بهره‌برداری. در اکتشاف، ملخ‌ها (عوامل جستجو) تمایل دارند که به سرعت حرکت کنند، در حالی که آنها در مرحله‌ی بهره‌برداری به حرکت محلی تشویق می‌شوند (صارمی و همکاران، ۲۰۱۷).

۲-۷-ارزیابی و عملکرد مدل‌ها

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل‌ها، از نمایه‌های ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و درصد بایاس (PBIAS) طبق روابط زیر استفاده گردید. بهترین مقدار برای این چهار معیار به ترتیب یک، صفر، یک و صفر می‌باشد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{oi}-\bar{M}_0)(M_{ei}-\bar{M}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_{oi}-\bar{M}_0)^2.\sum_{i=1}^{n}(M_{ei}-\bar{M}_e)^2}}\right]^2 , 0 \le R^2 \le 1 \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|M_{ei} - M_{oi}| , 0 \le MAE \le +\infty \quad (۲)$$

$$\text{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{ei}-M_{oi})^2}{(M_{ei}-\bar{M}_e)^2} , -\infty < NSE < 1 \quad (۳)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{oi}-M_{ei})}{\sum_{i=1}^{n}M_{ei}} \times 100 , -100 \le PBIAS \le 100 \quad (۴)$$

در روابط بالا، M_{oi} و M_{ei} به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی i ام، n تعداد گام‌های زمانی، $\bar{M}_0$ و $\bar{M}_e$ نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی است. علاوه‌بر معیارهای فوق از نمودارهای پراکنش و سری زمانی مقادیر مشاهداتی- محاسباتی نسبت به زمان نیز جهت تحلیل بیشتر نتایج استفاده‌شده است.

۳-نتایج و بحث

به منظور برآورد دبی سیلابی حوضه‌ی آبریز کشکان واقع در استان لرستان مدل‌ها و الگوریتم‌های نوین با یک مجموعه داده مشاهداتی ارزیابی شد و کارایی مدل‌ها بررسی گردید. به طور خلاصه بررسی مدل‌های برآورد شبیه‌سازی دبی سیلابی، طبق جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی–تفنگدار خلاق عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های هیبریدی از جمله شبکه عصبی مصنوعی- عنکبوت بیوه سیاه، شبکه عصبی مصنوعی- ازدحام مرغ و شبکه عصبی مصنوعی- ملخ داشته و نیز مدل‌های هیبریدی نسبت به مدل منفرد از عملکرد بهتری برخوردار است. بگونه‌ای که طبق شاخص‌های ارزیابی مدل شبکه عصبی مصنوعی–تفنگدار خلاق دارای مقادیرR^2=۰/۹۹۶، MAE=۳/۲۲۵، NSE=۰/۹۹۶ و BIAS=۰/۰۰۳ می‌باشد. در مجموع می‌توان بیان نمود مدل شبکه عصبی منصوعی-تفنگدار خلاق بهترین عملکرد و مدل شبکه عصبی مصنوعی منفرد ضعیف‌ترین عملکرد را دارا هستند.

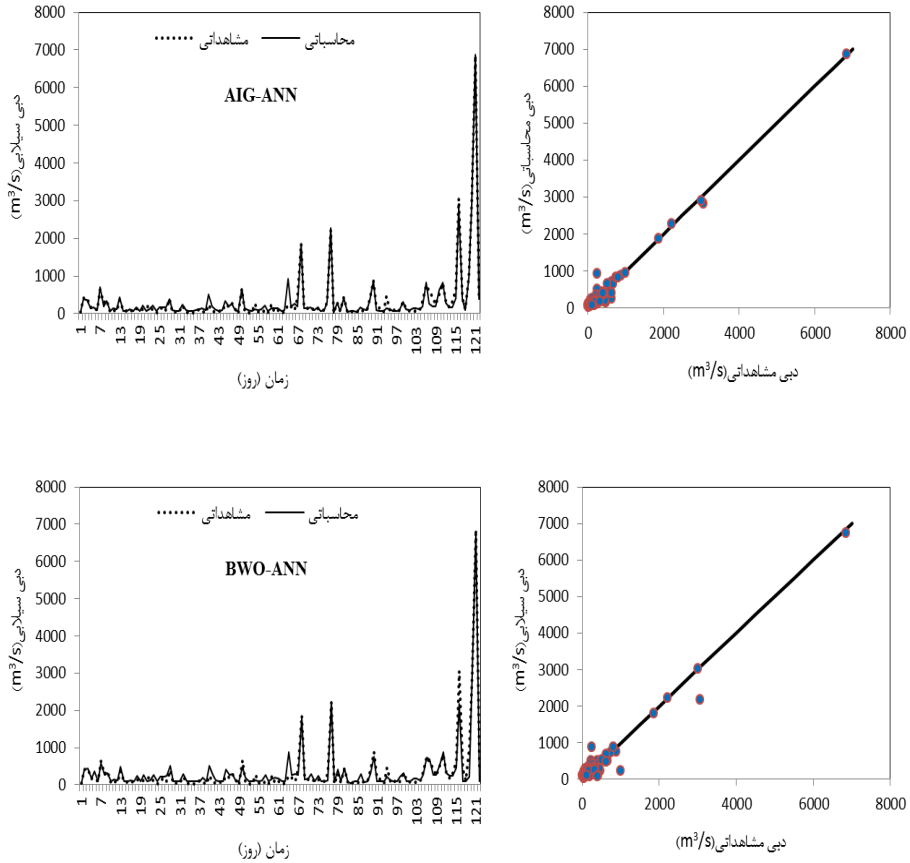
جدول (۱): نتایج عملکرد مدل‌های هیبریدی مورد بررسی در برآورد دبی سیلابی ایستگاه هیدرومتری کشکان

Table (1): Results of performance of hybrid models in estimating flood flow rate of Kashkan hydrometric station

مدل	آموزش				صحت‌سنجی			
	R^2	MAE	NSE	PBIAS	R^2	MAE	NSE	PBIAS
شبکه عصبی مصنوعی-تفنگدار خلاق	۰/۹۵۱	۵/۳۶۶	۰/۹۹۳	۰/۰۰۴	۰/۹۹۶	۳/۲۲۵	۰/۹۹۶	۰/۰۰۳
شبکه عصبی مصنوعی-عنکبوت سیاه	۰/۹۳۸	۶/۵۹۱	۰/۹۹۰	۰/۰۰۵	۰/۹۸۶	۴/۶۱۳	۰/۹۹۲	۰/۰۰۴
شبکه عصبی مصنوعی-ازدحام مرغ	۰/۹۲۳	۷/۷۳۲	۰/۹۸۷	۰/۰۰۷	۰/۹۶۸	۵/۷۲۶	۰/۹۸۸	۰/۰۰۶
شبکه عصبی مصنوعی-ملخ	۰/۹۱۶	۸/۸۰۷	۰/۹۸۲	۰/۰۰۷	۰/۹۵۷	۶/۹۱۲	۰/۹۸۴	۰/۰۰۶
شبکه عصبی مصنوعی	۰/۹۰۱	۹/۳۴۷	۰/۹۷۱	۰/۰۰۹	۰/۹۳۰	۷/۶۵۸	۰/۹۷۷	۰/۰۰۸

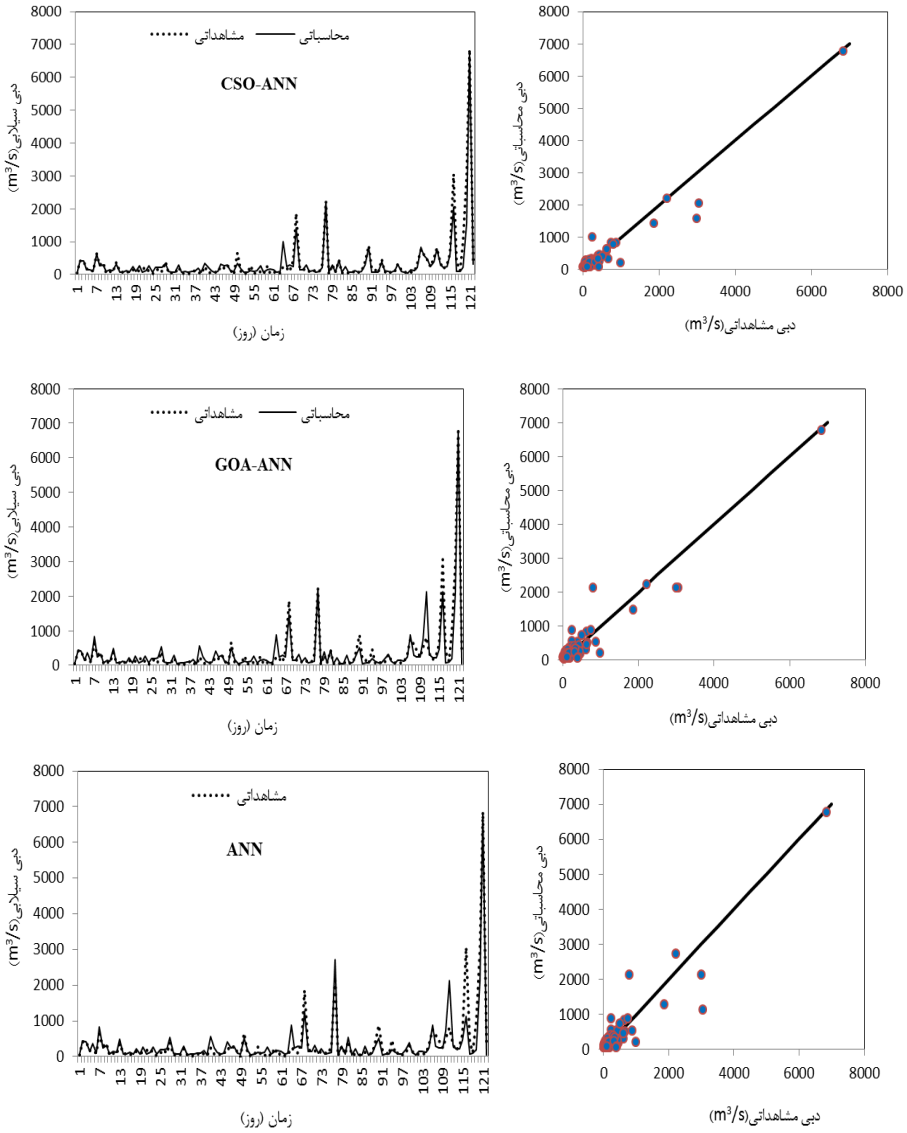
در شکل ۲ نمودار پراکنش و مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همانطور که مشهود است مدل شبکه عصبی مصنوعی– تفنگدار خلاق (AIG-ANN) در اکثر مقادیر با مقادیر مشاهداتی مطابقت خوبی دارد و همچنین در برآورد مقادیر ماکزیمم و مینیمم از عملکرد مطلوبی برخوردار است و مدل شبکه عصبی مصنوعی منفرد عملکرد ضعیفی در برآورد دبی سیلابی داشته، بگونه‌ای که در تخمین اکثر مقادیر عملکرد مطلوبی ندارد. همچنین همانطور که مشاهده می گردد، مدل‌های هیبریدی شبکه عصبی مصنوعی- عنکبوت بیوه سیاه (BWO-ANN)، شبکه عصبی مصنوعی- ازدحام مرغ (CSO-ANN) و شبکه عصبی مصنوعی- ملخ (GOA-ANN) از عملکرد بهتری نسبت به مدل منفرد برخوردار هستند و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب الگویتم‌های بهینه‌سازی باعث بهبود عملکرد مدل منفرد می‌شود که این نتیجه با یافته‌های دهقانی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد.

برای تحلیل و ارزیابی مدل‌های بکار رفته در تحقیق، نمودارهای تیلور و جعبه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. یک مزیت بارز دیاگرام تیلور این است که از دو آمار همبستگی رایج یعنی ضریب همبستگی و انحراف معیار استفاده می‌کند. هر چه مقدار پیش‌بینی‌شده از نظر ضریب همبستگی و انحراف معیار به مقدار مشاهداتی نزدیک‌تر باشد، قابلیت پیش‌بینی نیز بالاتر می‌رود (سیگارودی و همکاران، ۲۰۱۴). مزیت نمودار جعبه‌ای این است که می‌تواند نشان دهد که یک مدل چگونه مقادیر بیشینه، میانه و چارک‌ها را پیش‌بینی می‌کند.



شکل(۲): نمودار پراکنش و مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل‌های مورد بررسی

Figure (2): Distribution diagram and observational and computational values of the studied models



ادامه‌ی شکل(۲): نمودار پراکنش و مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل‌های مورد بررسی

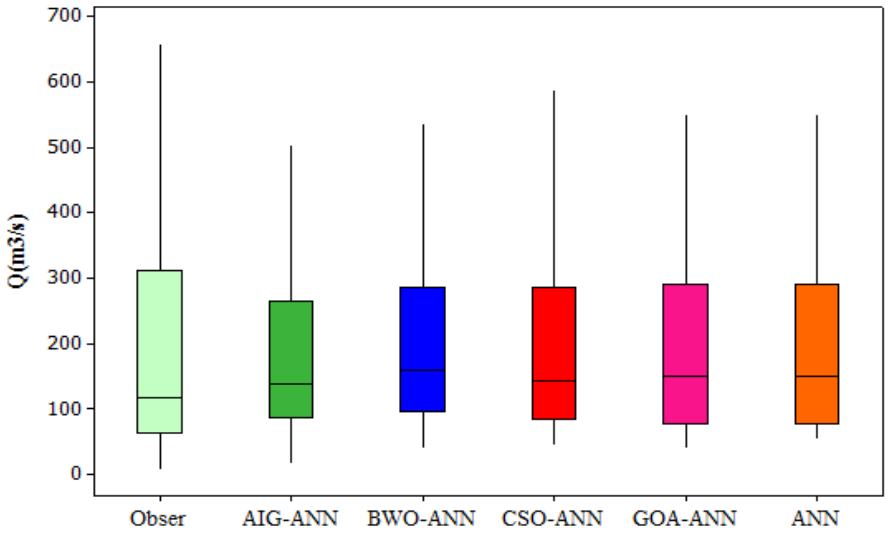
Continued Figure (2): Distribution diagram and observational and computational values of the studied models

نمودار جعبه‌ای مدل‌های مورد بررسی جهت برآورد دبی سیلابی در شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق مطابقت مناسبی با دبی سیلابی مشاهداتی دارد. همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی منفرد کمترین تطابق و همخوانی را دارا می‌باشند. همین نتیجه برای پیش‌بینی حداقل دبی سیلابی مشاهداتی

مشاهده گردید. این دو نتیجه نشان می‌دهد که اگر چه شبکه عصبی مصنوعی منفرد 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 الگوریتم های بهینه‌سازی ترکیب شود، عملکرد آن در پیش‌بینی مقادیر بیشینه بسیار بهبود می‌یابد که با نتایج پژوهش دهقانی و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

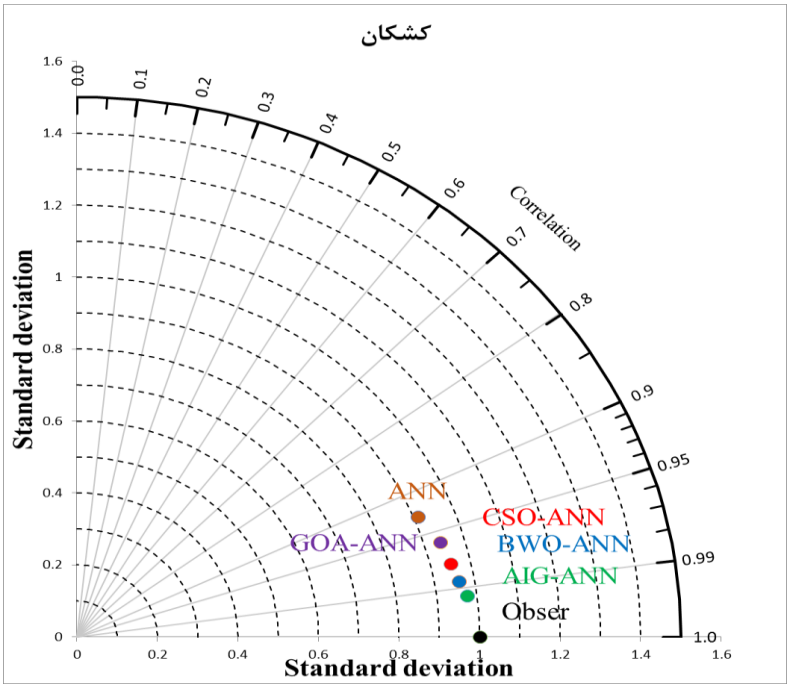
همچنین طبق شکل ۳ مدل شبکه عصبی مصنوعی-تفنگدار خلاق در برآورد مقادیر مینیمم از عملکرد مطلوبی برخوردار است و نیز در برآورد مقادیر ماکزیمم، چارک سوم و میانه مدل شبکه عصبی مصنوعی- ازدحام مرغ از عملکرد بهتری برخوردار است. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی- ملخ در برآورد مقادیر چارک اول از دقت مطلوبی برخوردار است.

نمودار عملکرد تیلور به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده در برآورد دبی سیلابی در شکل ۴ نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق دارای بالاترین کارایی و عملکرد بوده است، زیرا انحراف معیار پیش‌بینی‌شده دبی سیلابی نزدیک‌ترین فاصله را به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی دارد و ضریب همبستگی نیز بالاترین میزان را نشان می‌دهد. با توجه به تمام معیارهای ارزیابی در کنار هم، مدل شبکه عصبی مصنوعی-تفنگدار خلاق بالاترین قدرت پیش‌بینی و مدل شبکه عصبی منفرد قابلیت پیش‌بینی کمتری دارد.



شکل(۳): نمودار باکس پلات مدل‌های مورد بررسی

Figure (3): Box plot diagram of the studied models



شکل(۴): نمودار تیلور مدل‌های مورد بررسی

Figure (4): Taylor diagram of the studied models

۴-جمع‌بندی

در این تحقیق از هیبرید شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد دبی سیلابی حوضه آبریز کشکان واقع در استان لرستان استفاده شد. مطالعات محققان مختلف در سراسر دنیا نشان می‌دهد که عموماً شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل وجود ماهیت سعی و خطا در برآورد وزن‌ها و بایاس عملکرد مطلوبی برای برآورد رواناب یا دبی سیلابی ندارند. به‌عبارتی ساده‌تر، محاسبه ضرایب وزنی و بایاس در شبکه‌های عصبی مصنوعی بصورت دستی و بر مبنای روش سعی و خطا صورت می‌گیرد که در این تحقیق نیز برای بهبود عملکرد مدل مستقل و منفرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیدا کردن ضرایب وزنی بهینه از چهار الگوریتم بهینه‌ساز فرا ابتکاری در تحقیق استفاده شد. نتایج نشان داد مدل‌های هیبریدی عملکرد قابل قبولی در افزایش توانایی برآورد مدل شبکه عصبی مصنوعی دارند.

همچنین با توجه به معیارهای ارزیابی نتیجه شد که هر چهار مدل مورد بررسی، می‌توانند با دقت نسبتاً بالایی میزان دبی سیلابی را برآورد نمایند. در این میان، مدل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق دقت بیشتر و خطای کمتری نسبت به مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی- عنکبوت بیوه سیاه، شبکه عصبی مصنوعی- ازدحام مرغ، شبکه عصبی مصنوعی- ملخ و شبکه عصبی مصنوعی منفرد از خود نشان داده است.

در مجموع نتایج این تحقیق نشانگر برتری مدل تفنگدار خلاق در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بوده است (بر اساس ضریب تعیین و میانگین قدرمطلق خطا). این مدل بهترین جواب ممکن را داشته و دارای بهترین دقت و بالاترین قدرت پیش‌بینی بوده است. این برتری به ساختار قدرتمند درونی این الگوریتم و استفاده از پارامترهای اولیه و ثانویه، کاهش تابع هزینه و صرفه‌جویی در زمان جهت رسیدن به جواب بهینه و همگرایی مؤثرتر بازمی‌گردد که وزن‌ها را بهینه‌ترین مقدار همگرا نموده است. در حقیقت می‌توان گفت که بیشتر تمرکز الگوریتم‌هایی چون الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه (BWO) و ازدحام مرغ (CSO) بر روی تابع هزینه و معیارهای اولیه است درحالی‌که در ساختار تفنگدار خلاق علاوه بر موارد بالا تأثیر پارامترهای ثانویه نیز لحاظ می‌شود که این امر تأثیر بسزایی در نتایج بهینه مدل داشت. همچنین با توجه به ساختار قدرتمند الگوریتم تفنگدار خلاق امکان همگرایی به جواب بهینه و مینیم های محلی بیشتر می‌باشد. به‌عبارتی ساده‌تر می‌توان گفت که تأثیر این پارامترهای ثانویه باعث افزایش سرعت همگرایی می‌گردد. همچنین عملکرد این پارامترهای ثانویه در کنار سایر عوامل موجب کاهش دامنه‌ی جستجو درنتیجه همگرایی بهتر و سریع‌تر می‌گردد زیرا هرچه دامنه‌ی جستجو محدودتر شود سرعت و دقت دستیابی به جواب بهینه و همگرایی سریع‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. در مجموع این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی- تفنگدار خلاق می‌تواند در زمینه‌ی برآورد دبی سیلابی مؤثر باشد. همچنین، این مدل می‌تواند به‌نوبه خود برای تسهیل توسعه و پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریت منابع آب‌های سطحی مفید باشد و گامی در اتخاذ تصمیمات مدیریتی در جهت بهبود کمیت منابع آب‌های سطحی است.

۵-منابع

Adnan, R.M., Liang, Z., Heddam, S., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Li, B. (2020). Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro-meteorological data as inputs. *Journal of Hydrology*, 586,371-388.

Aljarah, I., Ala'M, A.Z., Faris, H., Hassonah, M.A., Mirjalili, S., & Saadeh, H. (2018). Simultaneous feature selection and support vector machine optimization using the grasshopper optimization algorithm. *Cognitive Computation*, 10(3), 478-495.

Arora, S., & Anand, P. (2019). Chaotic grasshopper optimization algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 31(8), 4385-4405.

Babaali, H.R., Dehghani, R. (2017). The prediction of the flood peak discharge using a wavelet neural network, *Journal of Hydrogeomorphology*, 4(11), 21-42.

Dehghani, R., Torabi, H. (2022). The effect of climate change on groundwater level and its prediction using modern meta- heuristic model. *Groundwater for Sustainable Development*, 16(4), 224-238, https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100702

Dehghani, R., Torabi, H., Younesi, H., Shahinejad, B. (2020). Investigating the Application of Hybrid Support Vector Machine Models in Predicting River Flow of Karkhe Basin, *Journal of Hydrogeomorphology*, 7(22), 155-175.

Ghorbani, M.A., Deo, RC., Karimi, V., Yassen, ZM., Terzi, O, (2018). Implementation of a hybrid MLP-FFA model for water level prediction of Lake Egirdir, Turkey, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(6), 1683-1697.

Kilinc, H.C., Haznedar, B.(2022). A Hybrid Model for Streamflow Forecasting in the Basin of Euphrates. *Water*, 14(80), 2-15

Kisi, O., Karahan, M., and Sen, Z. (2006). River suspended sediment modeling using fuzzy logic approach, *Hydrology of Process*, 20(2), 4351-4362.

Malik, A., Tikhamarine, Y., Souag-Gamane, D., Kisi, O., & Pham, Q. B. (2020). Support vector regression optimized by meta-heuristic algorithms for daily streamflow prediction. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(11), 1755-1773.

Meng, X., Liu, Y., Gao, X., & Zhang, H. (2014). A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization. *In International Conference in Swarm Intelligence*, 8, 86-94

Nagy, H., Watanabe, K., and Hirano, M. (2002). Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model, Journal of Hydraulics Engineering, 128(3), 558-559.

Nourani, V., Kisi, Ö., Komasi, M. (2011). Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *Journal of Hydrology*, 402(1–2), 41–59.

Nourani, V., Alami, MT., Aminfar, MH. (2009) .A combined neural-wavelet model for prediction of Ligvanchai watershed precipitation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(2), 466–472.

Pijarski, P., & Kacejko, P. (2019). A new metaheuristic optimization method: the algorithm of the innovative gunner (AIG), *Engineering Optimization*, 51(12), 2049-2068.

Saremi, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2017). Grasshopper optimisation algorithm: theory and application. *Advances in Engineering Software*, 105, 30-47.

Sebastian, P.A., & Peter, K.V. (2009). Spiders of India. *Universities press*.

Sigaroodi, S.K., Chen, Q., Ebrahimi, S., Nazari, A., Choobin, B. (2014). Long-term precipitation forecast for drought relief using atmospheric circulation factors: a study on the Maharloo Basin in Iran. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 18, 1995–2006, doi:10.5194/hess-18-1995-2014.

Tokar, A., Johnson, P. (1999). Rainfall-Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks. *J Hydrol. Eng,* 4(3), 232-239.

Zouache, D., Arby, Y. O., Nouioua, F., & Abdelaziz, F. B. (2019). Multi-objective chicken swarm optimization: A novel algorithm for solving multi-objective optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 377-391.