

مقاله پژوهشی

## تعیین ویژگی‌های مؤثر برای تخمین حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ترکیبی با الگوریتم چرخه آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی سد سفیدرود)

حسین حکیمی خانسر<sup>۱\*</sup> و علی شعبانی چافجیری<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مطالعه قابلیت الگوریتم فرا ابتکاری چرخه آب در زمینه مدل‌سازی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و تعیین ویژگی‌های مؤثر بر آن با ترکیب با شبکه عصبی بررسی شد. پنج ویژگی شامل حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل، دبی و حجم ورودی در هفت روز قبل، تراز و حجم مخزن در ده روز قبل برای ورودی مدل‌های هوشمند انتخاب شد. با اجرای الگوریتم هیبریدی WCA-ANN، روش انتخاب ویژگی و تحلیل حساسیت ترکیب سه‌تایی از ویژگی‌ها با مقدار خطا (MSE) برابر ۰/۰۰۰۴۵ بهترین ترکیب ورودی محسوب می‌شوند. حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل با توجه به تحلیل حساسیت مؤثرترین ویژگی در مدل‌سازی آن است. در ادامه در این مطالعه وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی به کمک دو الگوریتم فرا ابتکاری چرخه آب بدون عمل تخییر (WCA) و چرخه آب با عمل تخییر (ER.WCA) به منظور افزایش کارایی بهینه گردید. از لحاظ اولویت مدل هیبرید ANN-ER.WCA با بیشترین دقت و کمترین خطا و با مقادیر  $MAE$ ،  $NRMSE$ ،  $R$  و  $NS$  به ترتیب برابر با ۰/۹۹۱۵، ۰/۰۹۷۵، ۰/۰۰۹۰ و ۰/۹۸۲۹ در دوره آزمون، در اولویت اول و مدل‌های ANN و ANN-WCA به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم چرخه آب، انتخاب ویژگی، شبکه‌ی آبیاری سد سفیدرود، شبکه عصبی مصنوعی، هیدرواینفورماتیک

### مقدمه

دارد (هاشمی شاهدانی و همکاران، ۱۳۹۵). شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود یکی از بزرگ‌ترین شبکه‌های آبیاری و زهکشی کشور به حساب می‌آید و کشت محصول راهبردی برنج، در بیش از ۹۰ درصد وسعت اراضی این شبکه (با مساحت حدود ۲۰۰ هزار هکتار) به عمل می‌آید.

بعضی از عوامل از جمله: توسعه اراضی کشاورزی در نواحی بالادست، وقوع خشک‌سالی‌های اخیر و تغییر اقلیم، افزایش تقاضا در سایر بخش‌های مصرف آب، محدودیت منابع آب، عدم توسعه کامل شبکه آبیاری مذکور بعد از گذشت بیش از ۴۰ سال از بهره‌برداری آن و ... از یک سو و از سوی دیگر لزوم حفظ جایگاه محصول راهبردی برنج در امنیت غذایی جمعیت در حال رشد کشور، ارتقاء درآمد بهره‌برداران از فعالیت‌های کشاورزی، باعث وقوع چالش‌های فراوانی در مدیریت آب این شبکه بزرگ آبیاری

مخازن و سدهای ذخیره آب نقشی کلیدی در توسعه اقتصاد و برطرف نمودن نیازهای آبی در کشور دارند (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). تأمین آب کشاورزی یکی از اهداف ساخت سدها است (سلماسی و حکیمی خانسر، ۱۳۹۹). کشاورزی فاریاب نقش مهمی در فعالیت‌های کشاورزی کشورهای در حال توسعه،

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران و کارشناس کنترل و پایداری، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ایران (\* نویسنده مسئول: hakimi1904@yahoo.com)  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران و کارشناس بهره‌برداری و نگهداری از سازه‌های آبی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۸  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۱

یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، غلامی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد حل مناقشه‌ی شبکه‌ی آبیاری و زهکشی سفیدرود با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها، امینی و همکاران (۱۳۹۶) در مورد ارزیابی شاخص اکو-بهره‌وری در واحد عمرانی F1 از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، حبیبی کندین و همکاران (۱۳۹۵) در مورد ارزیابی عملکرد مدول‌های نیرپیک به‌عنوان سازه آبرگیر در تأمین آب اراضی پایین‌دست خود در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، حسن پور نوده‌ی و همکاران (۱۳۹۸) در مورد ارزیابی کیفیت زه آب اراضی شالیزاری برای استفاده مجدد در آبیاری و تخلیه به محیط‌زیست در واحد عمرانی F4 شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، منتظر و همکاران (۱۳۸۸) در مورد توسعه مدل ارزیابی آب مجازی شبکه‌های آبیاری سفیدرود با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، نبویان و همکاران در مورد بررسی تأثیر تاریخ نشاء بر برنامه‌ریزی آبیاری متناوب در شالیزارها با استفاده از مدل (SWAP) Navabian et al., 2020) و مطهری و همکاران (۱۳۹۹) در مورد ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج در مقیاس حوضه‌ای بر اساس تبخیر و تعرق واقعی در حوضه سفیدرود اشاره کرد، ولی در مورد پیش‌بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی آن با توجه به منابع مطالعاتی تحقیقی صورت نگرفته است.

در پژوهش حاضر از الگوریتم چرخه‌ی آب (WCA) به‌عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری به منظور انتخاب ویژگی (انتخاب بهترین ترکیب از ویژگی‌های ورودی) در مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری استفاده شده است. همچنین از آنجاکه بر اساس منابع مطالعاتی، تاکنون پژوهشی در خصوص تخمین حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری انجام نشده است، در این تحقیق ورودی‌های جدید در مدل‌سازی هوش مصنوعی برای این منظور پیشنهاد گردید و کارایی مدل ANN با دو مدل‌های هیبریدی ANN-WCA و ANN-ER.WCA مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود

و زهکشی کشور شده است (شاوردی و تهامی پور، ۱۳۹۶). تأمین آب، یک زیرساخت اساسی برای توسعه کلیه بخش‌ها به‌شمار می‌آید. همچنین به دلیل محدود بودن منابع و ارزش اقتصادی آن، پیش‌بینی دقیق حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری برای تأمین آب شبکه، مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) در محدوده آن و مدیریت عرضه و تقاضای آب کشاورزی به‌منظور بیشینه کردن بهره‌وری آن در این اراضی را غیرقابل اجتناب کرده است.

حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری به عواملی زیادی، بستگی دارد که توزیع آن در هر پروژه تصادفی است، بنابراین با توجه به پیچیدگی و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در چنین پدیده‌های، به‌کارگیری مدل‌های هوش مصنوعی که ورودی و خروجی مشاهداتی را دریافت نموده و فرایند موردنظر را پیش‌بینی می‌کنند، می‌تواند در بهبود مدل‌سازی آن‌ها مفید باشد. اگرچه روش‌های متعددی جهت محاسبه پیش‌بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری وجود دارد ولی با گسترش روش‌های هوش مصنوعی، استفاده آن‌ها در تخمین متغیرهای مختلف در علوم گوناگون بسیار متداول شده است. به دلیل عدم وجود داده‌های موردنظر برای مدل‌سازی این پدیده و هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری آن‌ها برای مدل‌سازی این پدیده، از مدل هوش مصنوعی استفاده شده است.

از میان روش‌های هوش مصنوعی به شبکه عصبی و سیستم‌های فازی بیشتر توجه شده است. با توجه به گسترش کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری و داده‌کاوی استفاده از این دو مدل به‌تنهایی مناسب نیست. همچنین ترکیب شبکه‌های عصبی با الگوریتم‌های داده‌کاوی جواب‌های بهتری نسبت به مدل آموزش کلاسیک شبکه عصبی داده است (پارسا و همکاران، ۱۳۹۹).

در مورد شبکه آبیاری سد سفیدرود مطالعاتی صورت گرفته است از جمله می‌توان به مطالعات شاوردی و تهامی پور (۱۳۹۶) در مورد ارزیابی اثر شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر بازده نهایی آب آبیاری در استان گیلان، اسلامی و همکاران (۱۳۹۹) در مورد تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت

تأمین می‌شود و مابقی توسط سد سفیدرود تأمین می‌شود (الهام و همکاران، ۱۳۷۵).

### مشخصات سد مخزنی سفیدرود

سد مخزنی سفیدرود بر روی رودخانه سفیدرود و در پایین‌دست محل تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود، در ۷۵ کیلومتری جنوب شهر رشت و در مجاورت شهر منجیل احداث گردیده است. هدف اصلی سد سفیدرود تنظیم جریان‌های ورودی به رودخانه سفیدرود جهت آبیاری ۱۸۹۸۳۲ هکتار اراضی شالی‌کاری دشت گیلان و فومنت واقع در پایین‌دست و اهداف فرعی آن کنترل سیلاب، تولید انرژی برق‌آبی با ظرفیت اسمی ۸۷/۵ مگاوات ساعت، تأمین آب شرب و صنایع شهرهای مرکزی و شرق نزدیک گیلان، تأمین نیازهای شیلات و آبی‌پروری و دام‌پروری سفیدرود و همچنین تأمین نیاز محیط‌زیست است. سد سفیدرود، وزنی پایه‌دار است. ارتفاع از پی ۱۰۶ متر، ارتفاع از بستر رودخانه ۸۶ و عرض پی آن ۱۰۶ متر است. تراز حداکثر مجاز مخزن ۲۷۶/۲۵ متر و تراز حداقل بهره‌برداری آن ۲۴۰ متر است. سطح اولیه مخزن در تراز نرمال ۵۴ کیلومترمربع و حجم کل مخزن اسمی ۱۷۶۵ میلیون مترمکعب است. حجم مفید مخزن فعلی ۱۱۵۸ میلیون مترمکعب و حجم آب قابل تنظیم سالانه اسمی ۲۵۰۰ میلیون مترمکعب است. همچنین حجم آب قابل تنظیم سالانه فعلی ۲۱۰۰ میلیون مترمکعب و مساحت حوزه آبریز ۵۶۲۰۰ کیلومترمربع و آب دهی متوسط رودخانه در درازمدت ۴۸۳۵ مترمکعب در سال است.

### الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب (WCA)

همانند تمام الگوریتم‌های فراابتکاری، با جمعیت اولیه (اصطلاح قطرات باران)، الگوریتم چرخه آب شروع به کار می‌کند. نخست، فرض می‌شود که باران یا دیگر انواع بارش وجود دارند. بهترین قطره‌ی آب یا بهترین فرد به‌عنوان دریا انتخاب می‌شود. در ادامه، برخی از قطرات باران خوب به‌عنوان رود و مابقی قطرات باران به‌عنوان نهرهایی که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان دارند، در نظر گرفته می‌شوند (Eskandar et al., 2012).

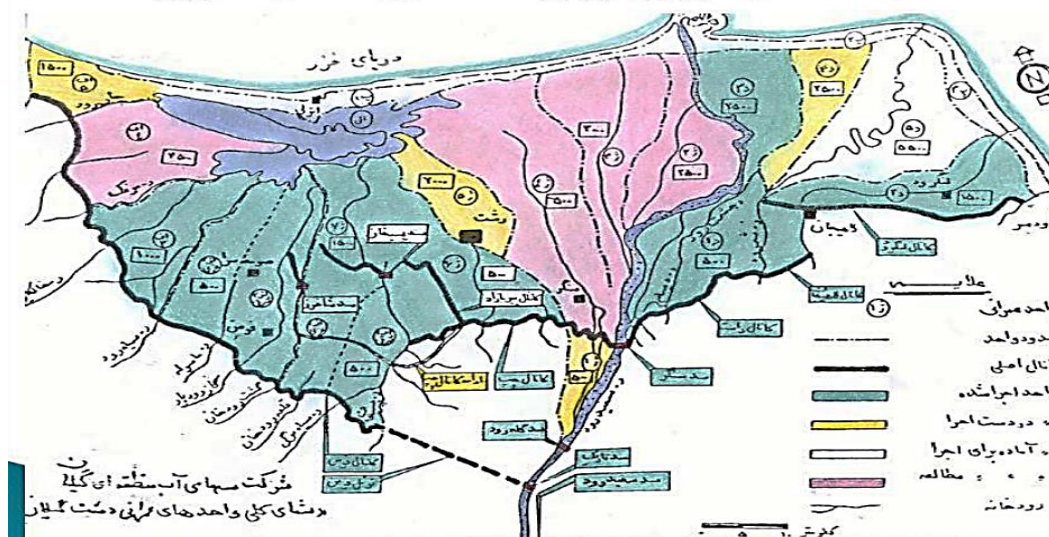
سد مخزنی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود (شکل ۱)، سد سفیدرود (بتنی وزنی پایه‌دار) و سدهای انحرافی آن سد تاریک، سد گله رود (امام رضا)، سد سنگر هستند. از دیگر سدهای انحرافی آن می‌توان به سد پسیخان، سد شاخرز، سد قوام، سد املش را نام برد. طول کانال انتقال آب ۲۶۰ کیلومتر و طول کانال اصلی درجه یک و دو، ۱۹۶۵/۸ کیلومتر و طول زهکش اصلی درجه یک و دو، ۱۵۶۴/۲ کیلومتر است. تعداد ابنیه (شوت، دراپ، رگلاتورهای استاتیک و دینامیک، انواع سیفون، کالورت، مقسم‌ها، تخلیه اضطراری‌ها و ...) آن ۱۵۰۰۰ مورد است. مساحت اراضی شالیزارهای استان ۲۳۸۰۰۰ هکتار و مساحت اراضی شالی‌کاری داخل شبکه (تلفیقی و مدرن) ۱۷۱۰۰۰ هکتار و همچنین مساحت اراضی شالی‌کاری مناطق سنتی ۶۷۰۰۰ هکتار است.

اقلیم منطقه مورد مطالعه شامل دو قسمت است. یک قسمت مربوط به محل قرارگیری سد سفیدرود که دارای اقلیم یا آب و هوای نیمه‌خشک است. این آب و هوا مساحت کمی از استان گیلان در محدوده شهرستان رودبار را در برمی‌گیرد و مهم‌ترین ویژگی آن بارش کم و خشکی هوا است. میانگین ریزش جوئی سالانه کمی بیش از ۳۶ میلی‌متر است. قسمت دوم که مربوط به خود شبکه آبیاری و زهکشی است دارای اقلیم یا آب‌وهوای معتدل مرطوب است. این آب و هوا مناطق جلگه‌ای و کوهپایه‌ای را در برمی‌گیرد، زمستان‌های معتدل، تابستان‌های گرم و مرطوب و بارندگی سالانه بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر از ویژگی‌های این نوع آب و هوا است. متوسط بارندگی سالانه در سطح استان گیلان حدود هزار و صد میلی‌متر است که مقدار آن در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در این حدود برآورد می‌شود ولی چون پراکنش بارندگی در فصول گرم سال خیلی کمتر بوده و با توجه به اینکه برنج محصول غالب این شبکه دارای نیاز آبی بالایی است و به‌صورت غرقابی کشت می‌شود، از آب ذخیره‌شده سد سفیدرود برای این منظور استفاده می‌شود. میزان تبخیر تفرق گیاه برنج طی دوره رشد در این شبکه حدود ۵۰۰ میلی‌متر است. درحالی‌که میانگین بارندگی طی دوره رشد برنج حدود ۲۰۰ میلی‌متر است. به‌عبارت‌دیگر ۴۰ درصد نیاز آبی از طریق باران

$$\text{Population Raindrop} = \begin{bmatrix} \text{Raindrop1} \\ \text{Raindrop2} \\ \vdots \\ \text{Raindrop}_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & \dots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که  $N_{POP}$  و  $N_{Var}$  به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی است. مقادیر تابع هدف (C) از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$C_i = \text{Cost}_i = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_{var}}), i = 1, 2, 3 \dots N_{pop} \quad (3)$$



شکل ۱ - موقعیت سد سفیدرود و شبکه آبیاری و زهکشی آن

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \hat{1}^{Sea} \quad (4)$$

$$N_{Raindrop} = N_{pop} - N_{SR} \quad (5)$$

برای تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه‌ی ذیل استفاده می‌شود:

$$N_{S_n} = \text{round} \left\{ \left( \frac{\text{Cost}_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} \text{Cost}_i} \right) \times N_{var} \right\} \quad (6)$$

, n = 1, 2, 3 ... N<sub>SR</sub>

چنین آرایه‌ای در الگوریتم GA و PSO اصطلاحاً به ترتیب کروموزوم و موقعیت ذرات را شامل می‌شوند. در مسائل بهینه‌سازی چندبعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل  $1 * N_{Var}$  را تشکیل و با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\text{Raindrop} = X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_{var}} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $X_1$  تا  $X_{N_{var}}$  متغیرهای تصمیم هستند. نخست، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه‌ی  $N_{POP} * N_{Var}$  و به طور تصادفی ایجاد می‌شود.

در رابطه بالا،  $C_i$  مقدار تابع هدف هر قطره است. در اولین گام، به تعداد  $N_{POP}$  قطره‌ی باران ایجاد می‌شود و سپس به تعداد  $N_{SR}$  از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به‌عنوان دریا و رود برگزیده می‌شوند. در مسائل مربوط به کمینه‌سازی، قطره‌ی باران با حداقل مقدار به‌عنوان دریا در نظر گرفته می‌شوند.  $N_{SR}$  مجموع تعداد رودها و یک دریا از رابطه‌ی ۴ و مابقی جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به‌طور مستقیم به دریا بریزند) با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌گردند.

(بارش) شروع خواهد شد.  $d_{max}$  شدت جستجو را در نزدیکی دریا (راه حل بهینه) تنظیم می کند. مقدار  $d_{max}$  با توجه به رابطه ی زیر در هر مرحله کاهش می یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\text{max iteration}} \quad (11)$$

پس از برآورده شدن فرآیند تبخیر، فرآیند بارندگی اعمال می شود. در فرآیند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان های مختلف تشکیل می دهند (مانند عملگر جهش در الگوریتم GA). برای تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل گرفته، از رابطه ی زیر استفاده خواهد شد.

$$X_{Stream}^{new} = LB \times \text{randn} \times (UB - LB) \quad (12)$$

LB و UB در رابطه بالا، به ترتیب، کران پایین و بالای مسئله هستند. بهترین قطرات باران جدید تشکیل شده به عنوان رود و بقیه ی قطرات باران جدید به عنوان نهرهای جدید که به سمت رودخانه ها در جریان اند و یا ممکن است به طور مستقیم به دریا بریزند، در نظر گرفته می شوند (Eskandar et al., 2012). در این مطالعه، معیار همگرایی در الگوریتم مذکور، رسیدن به تعداد تکرار برابر، ۱۰۰۰ مدنظر قرار گرفته است. در این مطالعه، در ترکیب ANN با الگوریتم چرخه آب، از دو حالت با عملکرد تبخیر یا الگوریتم چرخه آب مبتنی بر نرخ تبخیر (ER-WCA) و بدون عمل تبخیر یا الگوریتم چرخه آب (WCA) استفاده شد. بدین معنا که در الگوریتم چرخه آب (WCA)، فرآیند تبخیر نادیده گرفته شد.

### ترکیب شبکه عصبی با الگوریتم های فرا ابتکاری

در این مطالعه، به منظور انتخاب بهترین ترکیب ورودی از ویژگی ها در شبکه عصبی از الگوریتم چرخه آب استفاده گردید. کلیدی ترین اصل فرایند انتخاب ویژگی، انتخاب ویژگی های مؤثرتر و حذف ویژگی های اضافی است. این فرآیند برای انتخاب زیرمجموعه ای از ویژگی های مرتبط با یک هدف مشخص کاربرد دارد. (Kumar and Minz, 2014). انواع ترکیب های متفاوت از

که در آن،  $NS_n$  نهرهایی هستند که به رودهای خاص و یا دریا ریخته می شوند. یک نهر جریان تا رسیدن به رودخانه در امتداد خط اتصال بین آن ها با استفاده از یک فاصله که به طور تصادفی انتخاب شده، جریان می یابد که این فاصله با رابطه ی زیر مشخص می شود.

$$\epsilon(0, c \times d), \quad c > 1 \quad (7)$$

که در آن  $c$  مقادیری بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای  $c$  عدد ۲ است.  $d$  در رابطه بالا، فاصله ی فعلی بین نهر و رودخانه است. مقدار  $X$  در رابطه بالا متناظر با یک عدد تصادفی توزیع شده (یکنواخت و یا ممکن است هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و  $(c \times d)$  است. موقعیت جدید نهرها و رودخانه ها را می توان از روابط زیر به دست آورد.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + \text{rand} \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (8)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + \text{rand} \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (9)$$

در این روابط،  $\text{rand}$  یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع شده بین صفر و یک است. اگر راه حل ارائه شده به وسیله ی یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر باهم عوض می شود. این جابه جایی می تواند برای رودخانه ها و دریا نیز اتفاق بیفتد. یکی از مهم ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم (همگرایی نابالغ) و به دام افتادن در بهینه های محلی جلوگیری می کند، فرآیند تبخیر است. این فرآیند باعث خواهد شد که آب دریا با تبخیر به صورت جریان رودها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. رابطه ی ۱۰ نشان می دهد که آیا رود به دریا می ریزد یا نه.

$$|X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i = 1, 2, 3, \dots, NSR - 1$$

→ تبخیر و بارش

→ پایان

$$(10)$$

که در آن،  $d_{max}$  عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است، بنابراین، اگر فاصله ی بین رود و دریا از  $d_{max}$  کمتر باشد، بیانگر آن است که رود به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرآیند تبخیر اثر می کند و همانند طبیعت، بعد از تبخیر کافی، باران

ویژگی‌ها با شبکه عصبی، توسط الگوریتم چرخه آب مدل‌سازی شده و بهترین ترکیب ورودی که دارای کمترین خطا (MSE) است به عنوان مدل بهینه نهایی شبکه عصبی انتخاب می‌شود. بر این اساس، برنامه شبکه عصبی با الگوریتم فرا ابتکاری چرخه آب با استفاده از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۴ باهم ادغام شده است. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده در سد سفیدرود در طی دوره ۱۵ ساله، دبی ورودی (QI(i-7)) بر حسب مترمکعب بر ثانیه، حجم آب ورودی (VI(i-7)) بر حسب میلیون مترمکعب، تراز مخزن (RL(i-10)) بر حسب (m.a.s.l)، حجم مخزن (RV(i-)) (10) بر حسب میلیون مترمکعب و حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی یک روز قبل (VO(i-1)) بر حسب میلیون مترمکعب به‌عنوان ورودی و حجم آب خروجی فعلی سد (VO) بر حسب میلیون مترمکعب، به عنوان خروجی مدل در روش انتخاب ویژگی، انتخاب گردید. داده‌های تحقیق طی یک دوره ۱۵ ساله می‌باشند و به‌طور تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰ درصد) و آزمون (۳۰ درصد) تقسیم بندی شدند و از میانگین وزنی خطاهای آموزشی و آزمون با توجه به رابطه زیر، برای محاسبه خطای مدل، استفاده شد.

بهینه لایه پنهان در جهت انتخاب ساختار بهینه تعیین شد. در این مطالعه جهت انتخاب ساختار بهینه، از شبکه‌هایی با ۱ تا ۱۰ لایه و ۱ تا ۲۰ نرون و از روش آزمون و خطا برای تعیین بهترین معماری برای این شبکه، استفاده گردید. تابع انتقال شامل توابع سیگموئید و خطی، به ترتیب برای لایه پنهان و خروجی بوده است (شکل ۲). به علت گسترش روزافزون الگوریتم‌های فرا ابتکاری، استفاده از آن‌ها در بهینه کردن ساختار و وزن‌های شبکه عصبی متداول شده است که این امر باعث شده است که کارایی شبکه‌های عصبی بهبود یابد؛ بنابراین در این مطالعه، به جای استفاده از توابع آموزشی پیش فرض شبکه عصبی از دو الگوریتم فرا ابتکاری به نام‌های الگوریتم چرخه آب با عمل تخییر (ER-WCA)، الگوریتم چرخه آب بدون عمل تخییر (WCA) در بهینه کردن وزن‌های شبکه عصبی استفاده گردید.

### شاخص‌های آماری

در مطالعه حاضر از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا RMSE، ضریب همبستگی (R)، میانگین خطای مطلق (MAE)، نش ساتکلیف (NS) (نوری و سلماسی، ۱۳۹۷) برای بررسی و ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده گردیده است. شاخص‌های مذکور با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$Error_f = 0.8error_{tr} + 0.2error_{te} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳،  $Error_f$ ،  $error_{tr}$  و  $error_{te}$  به ترتیب خطای نهایی، خطای داده‌های آموزشی و آزمون هستند. شاخص خطا MSE انتخاب گردید.

چون در فرایند انتخاب ویژگی، هدف نهایی انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر متغیر هدف است و پیش‌بینی مدنظر نیست، بنابراین خطای مربوط به داده‌های آموزشی اهمیت بالایی دارد، زیرا رابطه بین ویژگی‌های ورودی و خروجی مدل با استفاده از این نوع داده‌ها می‌شود (امیری میجان و همکاران، ۱۳۹۸).

برای مدل‌سازی متغیر هدف (حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) (Ahmed et al., 2021)، متغیرهای انتخاب‌شده از فرایند انتخاب ویژگی، برای ورودی آن استفاده گردید. با سعی و خطا، تعداد لایه‌های بهینه پنهان و همچنین تعداد نرون‌های

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad (14)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}}}{\bar{O}_i} \quad (15)$$

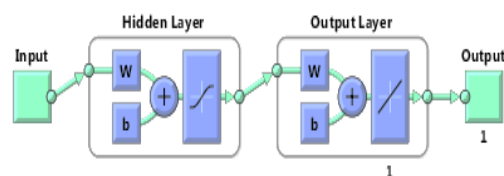
$$MAE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \right] \quad (16)$$

$$NS = \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right| \quad (17)$$

در روابط اخیر به ترتیب  $P_i$  مقادیر محاسبه‌شده از هوش مصنوعی و  $O_i$  مقادیر واقعی و N نمایانگر تعداد داده‌ها است.

کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر چولگی مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچک تر مقدار چولگی منفی است. در مورد کشیدگی ویژگی های تراز آب و حجم مخزن دارای کشیدگی منفی و مابقی ویژگی ها دارای کشیدگی مثبت هستند. کشیدگی نشان دهنده ارتفاع یک توزیع است. کشیدگی مثبت یعنی قله توزیع موردنظر از توزیع نرمال بالاتر و کشیدگی منفی نشانه پایین تر بودن قله از توزیع نرمال است.

تحلیل همبستگی برای تصمیم گیری درباره تأخیر زمانی داده ها و همچنین بررسی درستی نتایج مدل هیبریدی با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۰۱۴ انجام گردید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۷). در این مطالعه، با استفاده از تابع همبستگی متقاطع انتخاب مقادیر پیشین ویژگی های ورودی که دارای بیشترین همبستگی با حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی در هر روز بود، صورت گرفت. همچنین از تابع خودهمبستگی جزئی برای تعیین رابطه مقادیر حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی در هر روز با مقادیر پیشین آن استفاده گردید.



شکل ۲- ساختار شبکه عصبی مصنوعی در تحقیق

## نتایج و بحث

### آمار توصیفی و تحلیل همبستگی داده های ورودی

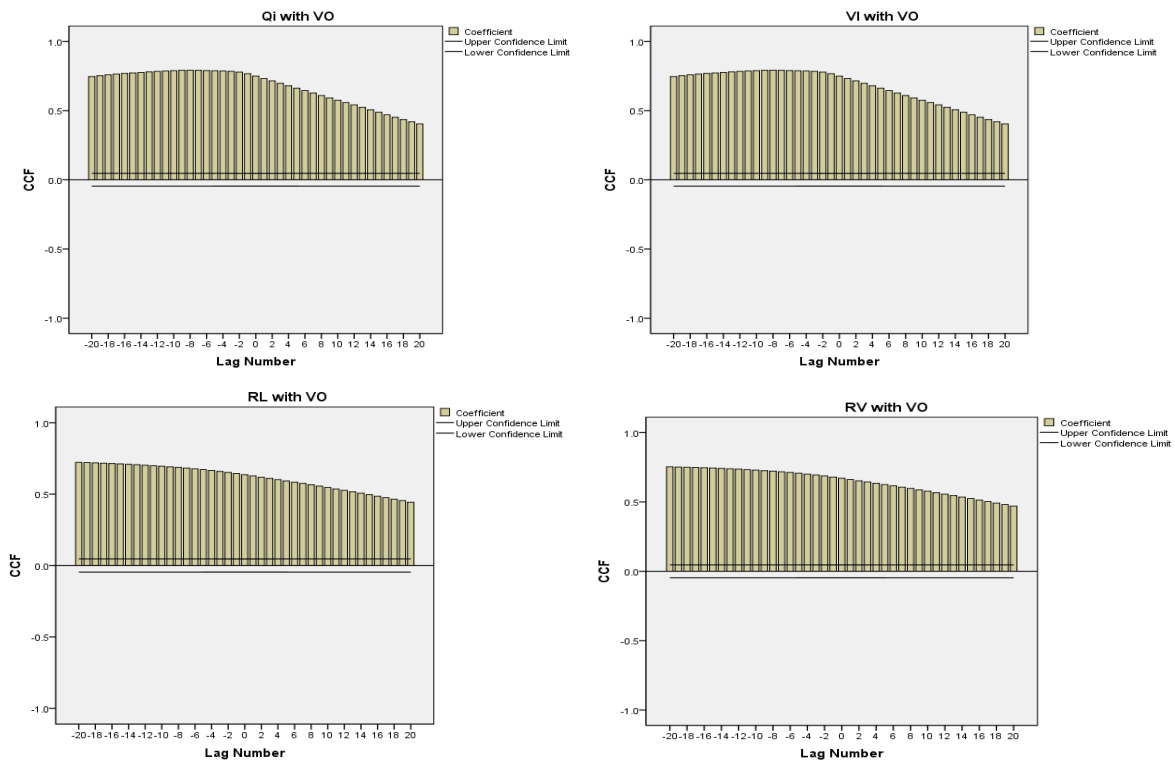
جدول ۱ آمار توصیفی متغیرهای اندازه گیری شده توسط ابزار دقیق سد سفیدرود برای هر یک از ویژگی های ورودی و متغیر خروجی را نشان می دهد. بیشترین ضریب تغییرات (CV)، میانه، انحراف معیار (SD)، میانگین در مورد متغیرهایی که به عنوان ورودی مدل هوش مصنوعی به کار رفتند مربوط به حجم مخزن است. در مورد چولگی همه ویژگی ها دارای چولگی مثبت هستند. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با

جدول ۱- آمار توصیفی متغیرهای اندازه گیری شده توسط ابزار دقیق سد

ویژگی های ورودی	میانگین	میانه	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
VO	۶/۵۵	۰/۶۰	۹/۴۰	۰/۳۵	۵۱/۸۴	۵۱/۴۹	۱/۸۲	۳/۴۱
RV	۵۹۴/۸۰	۵۳۰/۱۹	۲۸۴/۴۹	۲۲۷/۶۷	۱۱۱۱/۸۷	۸۸۴/۲۰	۰/۴۱۲	-۱/۲۱۵
RL	۲۵۹/۵۴	۲۵۸/۸۲	۸/۳۵	۲۴۶/۷۷	۲۷۳/۰۴	۲۶/۲۷	۰/۱۱	-۱/۳۲
VI	۶/۲۴	۲/۸۹	۲/۸۹	۰/۱۷	۶۱/۰۹	۶۰/۹۱	۲/۷۲	۸/۱۹
QI	۷۲/۲۹	۳۳/۵۰	۱۰۲/۹۶	۲	۷۰۷	۷۰۵	۲/۷۲	۸/۱۹

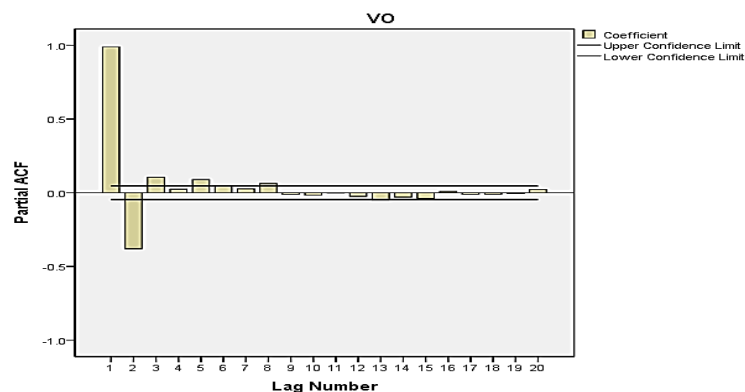
داده های دبی و حجم ورودی به مخزن سد در ۷ روز قبل بیشترین همبستگی را دارد. همچنین داده های حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود در هر روز با داده های تراز و حجم مخزن به سد در ۱۰ روز قبل بیشترین همبستگی را دارد. همان طوری که قبلاً بیان شد برای انتخاب بهترین ترکیب ورودی مدل های هوشمند از مدل هیبریدی شبکه عصبی و الگوریتم چرخه آب (WCA-ANN) استفاده شد.

به منظور برآورد تأخیرهای زمانی از تابع خودهمبستگی، تأخیر (۲۰ تا -۲۰) و محدوده اطمینان ۹۵ درصد استفاده شده است (مقادیر منفی، نشان دهنده زمان قبل و مقادیر مثبت، نشان دهنده زمان بعد است). در شکل های ۳ و ۴ زمان بر حسب روز و محور Y نشان دهنده مقادیر همبستگی بین ویژگی ها با حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی (تا ۲۰ روز) است. نتایج در شکل ۳ با توجه به تابع همبستگی متقاطع نشان داد که داده های حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی در هر روز با



شکل ۳- تحلیل همبستگی متقاطع داده‌های مورد استفاده:

همبستگی متقابل بین دبی ورودی و حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی (Qi with VO)، همبستگی متقابل بین حجم ورودی و حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی (Vi with VO)، همبستگی متقابل بین تراز آب مخزن و حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی (RL with VO)، همبستگی متقابل بین حجم مخزن و حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی (RV with VO)



شکل ۴- نمودار خودهمبستگی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی

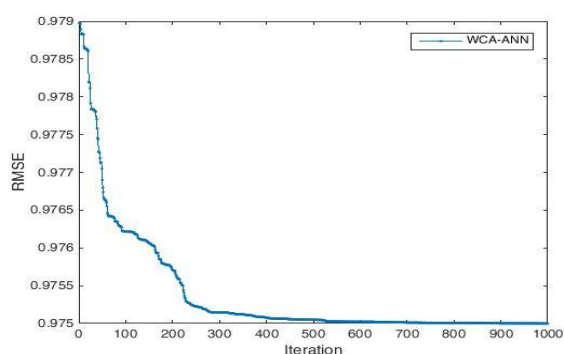
مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود استفاده گردید. در این شکل از بین ۵ ویژگی ورودی، انتخاب ترکیب سه ویژگی بیشترین تأثیر را در مدل سازی آن دارد، زیرا با توجه به نتایج این شکل، زیرمجموعه سه تایی، کمترین خطا

### انتخاب ویژگی با الگوریتم هیبریدی WCA-ANN

شکل ۵ نتایج به دست آمده از روش انتخاب ویژگی و تعیین بهترین ترکیب ورودی با الگوریتم هیبریدی WCA-ANN را نشان می‌دهد. در این مطالعه از ترکیب ۱ تا ۵ ویژگی برای



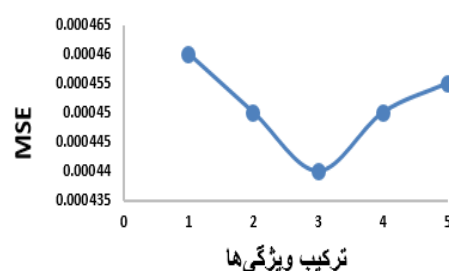
شبکه های آبیاری سد سفیدرود است، زیرا در نمودار مربوط مقادیر محور  $y$  به صفر نزدیک تر است. این محور مقدار MSE را نشان می دهد، هر چه این شاخص به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده کارایی بهتر مدل سازی و خطای کمتر بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی است. شکل ۶، روند همگرایی الگوریتم چرخه آب در مدل هیبریدی WCA-ANN برای ترکیب ویژگی های برتر (سه ویژگی) را نشان می دهد.



شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم WCA برای ترکیب ویژگی های برتر در مدل WCA-ANN

تنش خاک در مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود تأثیرگذار است، اما نتایج نشان داد که در مقایسه با ویژگی های مانند حجم و دبی ورودی به سد از اهمیت کمتری در مدل سازی آن، برخوردار است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود ویژگی های تراز و حجم مخزن دارای حساسیت یکسان هستند. این نتایج در مورد دو ویژگی دبی و حجم ورودی نیز صدق می کند، بنابراین در صورت فقدان هر یک از داده های ورودی می توان از جایگزین آن ها استفاده نمود؛ بنابراین در مجموع حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود بیشترین حساسیت را به حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل دارد. دبی و حجم ورودی نسبت به تراز و حجم مخزن دارای اهمیت بیشتری در مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود هستند. تأثیر ترکیب باهم این سه ویژگی، نشان دهنده این واقعیت است که این ویژگی ها بر

(مقدار MSE برابر ۰/۰۰۰۴۴) را در مدل سازی ویژگی هدف (حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود) را دارا است. البته نتایج نشان داد اختلاف خطا یا مقدار MSE در بین ترکیب های دو تا چهار تایی بسیار ناچیز است. نتایج در این شکل نشان داد که افزایش تعداد ویژگی ها باعث بهبود مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود شده است و سپس نمودار روند نزولی پیدا کرده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، انتخاب ترکیب با ۳ ویژگی (زیرمجموعه ۳ تایی) دارای خطای کمتری در مدل سازی حجم آب تحویلی به



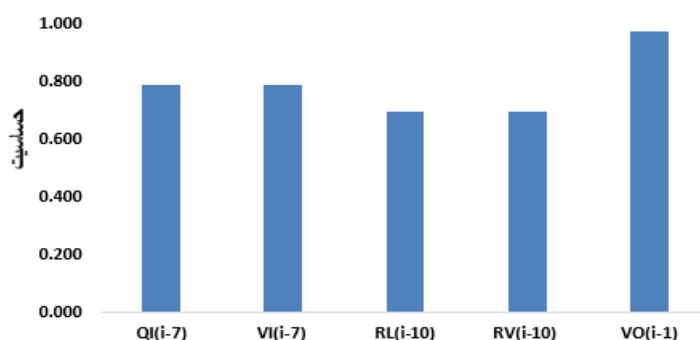
شکل ۵- مقادیر ویژگی ها در روش انتخاب ویژگی

### تحلیل حساسیت

برای تعیین حساس ترین ویژگی ها برای مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود، تحلیل حساسیت انجام گردید. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در شکل ۷ به روش هیل (Hill, 2000)، از بین ۵ ویژگی ورودی، به ترتیب حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل، دبی و حجم ورودی در هفت روز قبل، تراز و حجم مخزن در ده روز قبل بیشترین تأثیر را در مدل سازی حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود داراست. در شکل ۷ (( $VI(i-7)$ ) حجم دبی ورودی در هفت روز قبل، (( $RL(i-10)$ ) تراز مخزن در ده روز قبل، (( $RV(i-10)$ ) حجم مخزن در ده روز قبل و (( $VO(i-1)$ ) حجم آب تحویلی به شبکه های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل است. اگرچه تراز و حجم مخزن بر

رگرسیون با مقدار  $R$  برابر  $0/9899$  به خوبی روند افزایش و کاهش تغییرات حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود را در مرحله آزمون تخمین زده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر خطا به صورت نرمال توزیع شده است.

مقدار حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی تأثیر بالایی دارند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود روش ANN به خوبی عمل شبیه‌سازی را (با توجه به نمودارهای رگرسیونی، خطا و نمودار مشاهداتی-پیش بینی) انجام داده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که مدل ANN با توجه به نمودار



شکل ۷- تحلیل حساسیت ویژگی‌های ورودی با استفاده از روش هیل

تفکیک بیان شده است.

### مدل‌سازی

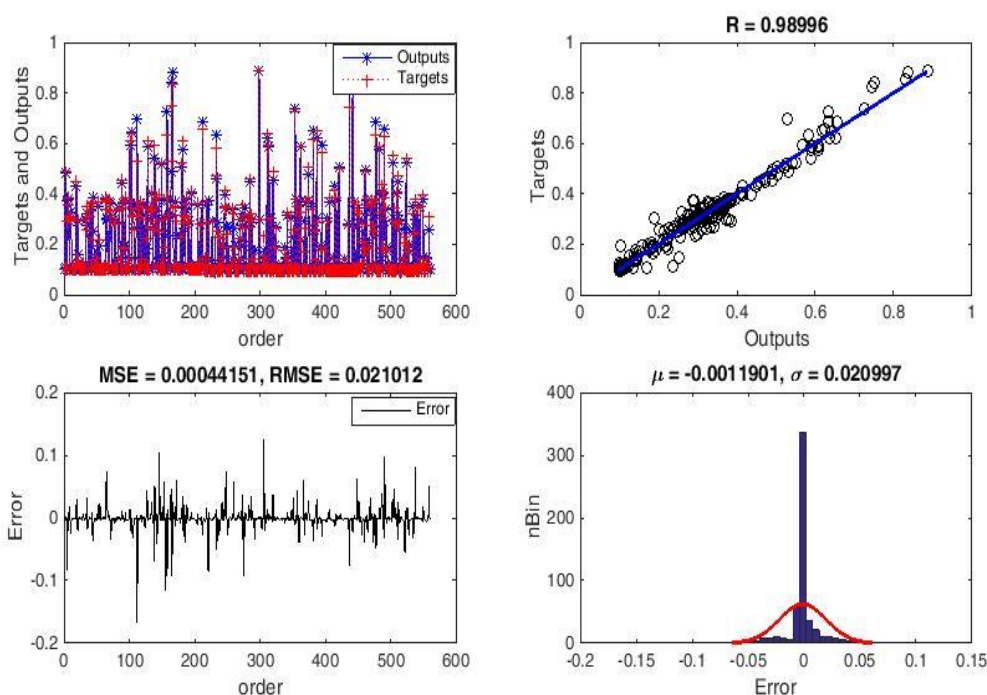
در این قسمت نتایج مدل‌سازی متغیر هدف (حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود) با استفاده از مدل شبکه عصبی (ANN) و ترکیب شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری چرخه آب (ANN-WCA) و چرخه آب با تبخیر (ANN-ER.WCA) با استفاده از ویژگی‌های حاصل شده از فرآیند انتخاب ویژگی، به

### شبکه عصبی مصنوعی

همان طوری که بیان شد، با اجرای الگوریتم هیبریدی، تحلیل حساسیت و روش انتخاب ویژگی، ترکیب سه تایی از ویژگی‌ها با توجه به جدول ۲ به عنوان ورودی مدل‌های مختلف انتخاب شده است.

جدول ۲- ورودی مدل‌های هوشمند در تحقیق

ورودی‌ها	مدل
VO(i-1), ((QI(i-7)) or (VI(i-7))), ((RL(i-7)) or (RV(i-7)))	ANN
VO(i-1), ((QI(i-7)) or (VI(i-7))), ((RL(i-7)) or (RV(i-7)))	ANN-ER.WCA
VO(i-1), ((QI(i-7)) or (VI(i-7))), ((RL(i-7)) or (RV(i-7)))	ANN-WCA



شکل ۸- نمودار رگرسیونی، مقادیر خطا و مقادیر مشاهداتی و تخمینی مرحله آزمون مدل ANN

مشاهده می‌شود مقادیر خطا به صورت نرمال توزیع شده است.

### هیبرید شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم چرخه

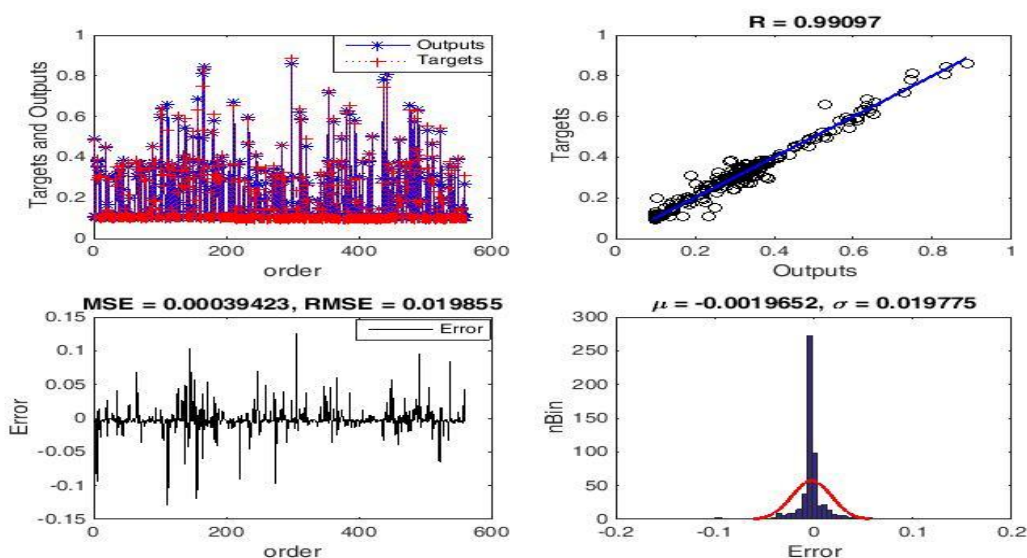
#### آب با تبخیر (ANN-ER.WCA)

در این مدل هیبریدی نیز اندازه‌های متفاوت جمعیت، تعداد قطرات باران و تعداد رودخانه در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود مدل هیبریدی ANN-ER.WCA به خوبی توانسته عمل شبیه‌سازی را (با توجه به نمودارهای رگرسیونی، خطا و نمودار مشاهداتی-پیش بینی) انجام دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که این مدل با توجه به نمودار رگرسیونی با مقدار  $R$  برابر  $0.9915$  به خوبی روند افزایش و کاهش تغییرات حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود را تخمین زده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر خطا به صورت نرمال توزیع شده است. همچنین در جدول ۳، مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده الگوریتم‌های مختلف هیبریدی در روش انتخاب ویژگی و بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی آورده شده است.

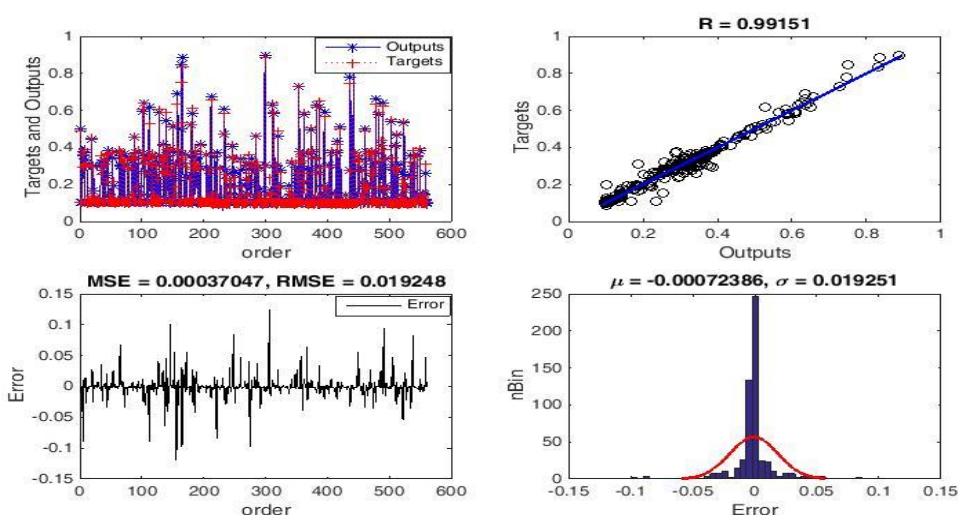
### هیبرید شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم چرخه

#### آب (ANN-WCA)

اندازه‌های متفاوت جمعیت، تعداد قطرات باران و تعداد رودخانه برای مدل ANN-WCA در نظر گرفته شد. همچنین در جدول ۳، مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده الگوریتم WCA در بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی را آورده شده است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مدل هیبریدی ANN-GA به خوبی توانسته در مراحل آموزش و آزمون، حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود را پیش‌بینی کند. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود مدل هیبریدی ANN-WCA با توجه به نمودار رگرسیونی با مقدار  $R$  برابر  $0.9909$  به خوبی عمل تخمین حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود را (با توجه به نمودارهای رگرسیونی، خطا و نمودار مشاهداتی-پیش بینی) انجام داده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که این مدل به خوبی روند افزایش و کاهش تغییرات حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود را تخمین زده است. همان‌طور که در این شکل



شکل ۹- نمودار رگرسیونی، مقادیر خطا و مقادیر مشاهداتی و تخمینی مرحله آزمون مدل ANN-WCA



شکل ۱۰- نمودار رگرسیونی، مقادیر خطا و مقادیر مشاهداتی و تخمینی مرحله آزمون مدل ANN-ER.WCA

برابر با ۰/۹۹۱۵، ۰/۰۹۷۵، ۰/۰۰۹۰ و ۰/۹۸۲۹ در دوره آزمون و همچنین مدل ANN-WCA با مقادیر R، RMSE، MAE و NS به ترتیب برابر با ۰/۹۹۱۰، ۰/۱۰۰۵، ۰/۰۱۰۵ و ۰/۹۸۱۸ نسبت به شبکه عصبی مصنوعی از قابلیت بالاتری در تخمین حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود، برخوردار هستند. فرآیند محاسبات برای دو مدل ANN-ER.WCA و ANN-WCA کندتر و وقت‌گیر است ولی استفاده از آن‌ها،

### بررسی آماری مدل‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۴ و همچنین شاخص‌های آماری نشان‌دهنده برتری استفاده از مدل هیبریدی ANN-ER.WCA دارد، ولی در حالت کلی نتایج حاکی از دقت بیشتر هر دو مدل ANN-ER.WCA و ANN-WCA نسبت به شبکه عصبی مصنوعی است. نتایج تحقیق نشان داد ANN-ER.WCA با مقادیر R، RMSE، MAE و NS به ترتیب

هیبریدی نیازمند انتخاب جمعیت جدید و تکرار در هر مرحله برای رسیدن به نقطه بهینه است که به زمان بیشتری نیازمند است؛ با این حال بهبود شاخص‌های عملکردی در پیش‌بینی حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود، این مورد را پوشش دهد.

شاخص‌های عملکردی مدل را بهبود داده است. لازم به ذکر است که مدل‌های مذکور در این مطالعه از نظر سرعت از مدل شبکه عصبی ضعیف‌تر هستند، چراکه در مدل شبکه عصبی فرآیند آموزش شامل یک مرحله است و نیاز به تکرار دوره‌های آموزشی نیست، حال آنکه استفاده از دو مدل

جدول ۳- پارامترهای کنترلی بهینه الگوریتم چرخه آب در مدل‌های هیبریدی

ANN-ER.WCA	ANN-WCA	WCA-ANN	مدل
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	تعداد جمعیت (عامل جستجو)
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	حداکثر تعداد تکرارها
[-۳, +۳]	[-۳, +۳]	[-۳, +۳]	حد پایین و بالای وزن‌ها و بایاس‌ها
dmax=1e-16 Nsr=4	dmax=1e-16 Nsr=4	dmax=1e-16 Nsr=4	پارامترهای دیگر

جدول ۴- مؤلفه‌های آماری مدل‌های هیبریدی در دوره آموزش و آزمون

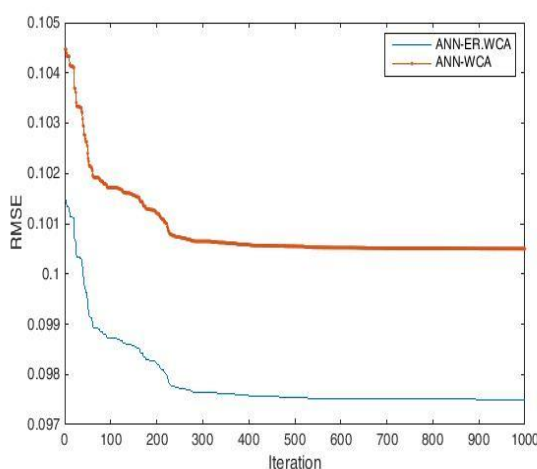
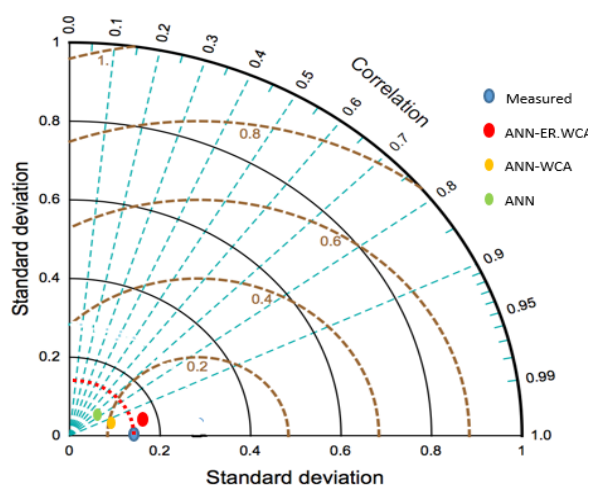
آزمون				آموزش				مدل
R	NRMSE	MAE	NS	R	NRMSE	MAE	NS	
۰/۹۹۰۰	۰/۱۰۶۴	۰/۰۰۹۸	۰/۹۷۹۶	۰/۹۸۹	۰/۱۱۱۳	۰/۰۰۹۷	۰/۹۷۷۶	ANN
۰/۹۹۱۵	۰/۰۹۷۵	۰/۰۰۹۰	۰/۹۸۲۹	۰/۹۹۰۹	۰/۱۰۰۵	۰/۰۰۹۰	۰/۹۸۱۷	ANN-ER.WCA
۰/۹۹۱۰	۰/۱۰۰۵	۰/۰۱۰۵	۰/۹۸۱۸	۰/۹۹۰۹	۰/۱۰۱۳	۰/۰۱۰۲	۰/۹۸۱۴	ANN-WCA

ANN-ER.WCA تمرکز خطا در اطراف صفر را تأیید می‌کند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر این دو مدل هیبریدی نسبت به مدل ANN است. شکل ۱۲، روند همگرایی دو الگوریتم مختلف ترکیبی را نشان می‌دهد. همان طوری که در این شکل مشاهده می‌شود الگوریتم ANN-ER.WCA روند همگرایی بهتری نسبت به الگوریتم ANN-WCA دارا می‌باشند و زودتر به جواب بهینه همگرا شده است. علت عملکرد بهتر این مدل ترکیبی را می‌توان به آموزش خوب سیستم شبکه عصبی مصنوعی و توانایی بالای آن در بهینه کردن وزن‌ها و ساختار شبکه عصبی مصنوعی دانست. دقت بالای مدل ANN-ER.WCA در مقایسه با مدل ANN-WCA نشان‌دهنده عملکرد آن برای فرار از بیشینه و کمینه‌های محلی است که باعث می‌شود این مدل به عنوان ابزاری قدرتمند برای تخمین حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود به کار رود.

شکل ۱۱ سه مدل ANN-ER.WCA، ANN-WCA و ANN را در یک نمودار جعبه‌ای برای همه داده‌های آزمون، بر اساس توزیع خطای کلی نشان می‌دهد. اختلاف بین مقادیر حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در این جعبه به عنوان مقادیر خطا محاسبه شد. خطاهای مثبت، تخمین‌های کم و خطاهای منفی، تخمین‌های زیاد را نشان می‌دهند. نمودار جعبه‌ای روشی استاندارد برای نشان دادن توزیع خطا بر اساس چهار مقدار است: چارک اول (Q1)، چارک سوم (Q3)، محدوده بین ربع (IQR) و بخشی در داخل مستطیل که میانه را نشان می‌دهد و هرچه قدر مقدار IQR کمتر باشد دقت مدل بالاتر است (Maroufpoor et al., 2019). موقعیت این مقادیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به طور کلی و مطابق شکل ۱۱، طول جعبه کم (IQR کوچک‌تر) در مدل‌های ANN-WCA و

در دیاگرام تیلور نشان می‌دهند. این عوامل برای مدل‌های ترکیبی محاسبه گردیده و نتایج به صورت نقاط دایره‌ای رنگی روی شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این دیاگرام نقطه مرجع نقطه حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود مشاهده شده است و هر نقطه‌ای که به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشد مقادیر دقیق‌تری را شامل می‌شود. با توجه به این شکل نزدیک‌ترین نقطه به نقطه مرجع نقطه مربوط به مدل ANN-ER.WCA است که شامل بهترین نتیجه است.

این مسئله را می‌توان با پیچیدگی‌های موجود در مسئله بهینه‌سازی توجیه کرد. این مطلب نشان‌دهنده این است که این الگوریتم دارای راه‌برد اکتشاف بهتری بوده و گام حرکت بهینه مؤثرتری را انتخاب نموده است. همچنین شکل ۱۲ روش‌های مورد مطالعه را با دیاگرام تیلور (Taylor, 2001) مورد مقایسه و مطالعه قرار داده است. محورهای افقی و عمودی هر دو انحراف از معیار، قطاع‌های سیاه‌رنگ مربوط به ضریب همبستگی و قطاع‌های قهوه‌ای ریشه میانگین مربعات خطا را



شکل ۱۲- روند همگرایی مدل‌های هیبریدی (سمت راست) و نمودار تیلور (سمت چپ)

برای پیش بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی، توسعه داده شد که این روش مشکلات آموزش الگوریتم‌های بر پایه کلاسیک را ندارد. نتایج نشان داد آموزش شبکه عصبی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری نسبت به آموزش کلاسیک این شبکه سبب بهبود نتایج در پیش بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی می‌شود. نتایج با استفاده از تعدادی نمودار بصری و شاخص‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پتانسیل الگوریتم ANN-ER.WCA را به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی تأیید کرد. مدل‌های پیشنهادی توانایی خوبی برای تخمین پیش بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی نشان

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای مؤثر برای مدل‌سازی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی سد سفیدرود، بیان و از آن‌ها استفاده شد پنج ویژگی شامل حجم آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری سد سفیدرود در یک روز قبل، دبی و حجم ورودی در هفت روز قبل، تراز و حجم مخزن در ده روز قبل با توجه به توابع خودهمبستگی و همبستگی متقاطع برای ورودی مدل‌های هوشمند انتخاب گردیده است. از ترکیب الگوریتم‌های فرا ابتکاری شامل الگوریتم چرخه آب بدون عمل تبخیر و الگوریتم چرخه آب با عمل تبخیر، برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی و به‌روزرسانی وزن‌های آن استفاده شد و در نهایت بهترین مدل‌ها

دادند، با این وجود، آزمایش مدل‌های مذکور با استفاده از داده‌های ورودی و در شبکه‌های آبیاری مختلف ضروری است تا از کاربرد این مدل‌ها در شرایط واقعی اطمینان حاصل شود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی به طور مستقیم نیاز به هزینه و زمان دارد، توسعه روش‌های داده محور می‌تواند بسیار کارگشا باشد.

پیشنهاد می‌شود برای سایر کمیت‌های سد سفیدرود از جمله دبی ورودی و خروجی و تراز مخزن نیز مدل‌سازی با مدل‌های ترکیبی مذکور انجام شود. همچنین در مطالعه‌های آتی از دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت آموزش ANN در پیش‌بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی استفاده شده و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از این مطالعه مقایسه شود.

**منابع**

ابراهیم زاده، ع.، ضرغامی، م. و نورانی، و. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک روگذری سدهای خاکی با مدل پویایی سیستم‌ها تحت شبیه‌سازی مونت کارلو و روش آبرمکعب لاتین، مطالعه موردی: سد حاجیلر چای. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۳۱-۱۴.

الهام، م.، داود براری، ت.، ابراهیم، ا.، یوسف نیک، ن.، هرمز، ف. و مهدی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی و برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه برنج در استان‌های شمالی کشور. جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای). سال نهم. ۵۶۱-۵۷۲.

اسدی، ه.، شاهی، ک.، سایدل، ر. و مصطفی، س.م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی رسوب معلق با استفاده از داده‌های هیدرولوژیک و هیدروژئومورفیک در مدل‌های هوشمند. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۳): ۱۰۵-۱۱۹.

اسلامی، ز.، جنت رستمی، س.، اشرف زاده، ا. و پورمحمد، ی. ۱۳۹۹. تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. آب و خاک. ۳۴(۱): ۱۱-۲۵.

امیری میجان، ف.، شیرانی ح.، اسفندیارپور ع.، بسالت پور ع.ا و شکفته ح. ۱۳۹۸. مدل‌سازی شاخص S و تعیین عوامل مؤثر بر آن با استفاده از الگوریتم هیبرید شبیه‌سازی تبرید- شبکه عصبی مصنوعی در خاک‌های آهکی جنوب شرق ایران. مجله علوم آب و خاک. ۲۳(۳): ۳۸۱-۳۹۴.

امینی، ک.، جنت رستمی، س.، پیرمردیان، ن. و اشرف زاده، ا. ۱۳۹۶. ارزیابی شاخص اکو-بهره وری در واحد عمرانی F1 از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۳): ۱۱۴-۱۲۴.

پارسا، ج.، حکیمی خانسر، ح.، دلیر حسین زاده، ع.، و شیرینی، ج. ۱۳۹۹. مدل‌سازی تنش خاک در سدهای خاکی با روش‌های هوش مصنوعی و تعیین ویژگی‌های مؤثر. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۲(۳): ۵۰-۶۵.

حبیبی کندی، ع.، میلاد دوستی، م. و ملاقدیمی، ا. ح. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد مدول‌های نریپیک به عنوان سازه آبیگر در تأمین آب اراضی پایین دست خود در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. آب و توسعه پایدار. ۴(۱): ۶۵-۷۲.

حسن پور نودهی، م.، نوابیان، م. و اسمعیلی ورکی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی کیفیت زه‌آب اراضی شالیزاری برای استفاده مجدد در آبیاری و تخلیه به محیط زیست (مطالعه موردی: واحد عمرانی F4 شبکه آبیاری و زهکشی سفید رود). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۴): ۹۰۹-۹۱۸.

سلماسی، ف. و حکیمی خانسر، ح. ۱۳۹۹. تخمین رفتار سد کیودوال در حین ساخت با مدل‌سازی عددی سه بعدی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۳(۹): ۲۰-۲۰.

شاوردی، ع.، و تهامی پور، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر بازده نهایی آب آبیاری در استان گیلان. اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۲۴(۹۵): ۸۹-۱۰۶.

غلامی، م.، شاهنظری، ع.، مرتضی پور، م.ر. و شاه نوریان، م.م. ۱۳۹۵. حل مناقشه‌ی شبکه‌ی آبیاری و زهکشی سفیدرود با استفاده از نظریه بازی‌ها. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳(۳): ۱۰۱-۱۱۱.

مطهری، م.، ستوده‌نیا، ع.، نظری، ب. و یزدانی، م. ر. ۱۳۹۹. ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج در مقیاس حوضه‌ای بر اساس تبخیر و تعرق واقعی در حوضه سفیدرود.

داند، با این وجود، آزمایش مدل‌های مذکور با استفاده از داده‌های ورودی و در شبکه‌های آبیاری مختلف ضروری است تا از کاربرد این مدل‌ها در شرایط واقعی اطمینان حاصل شود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی به طور مستقیم نیاز به هزینه و زمان دارد، توسعه روش‌های داده محور می‌تواند بسیار کارگشا باشد.

پیشنهاد می‌شود برای سایر کمیت‌های سد سفیدرود از جمله دبی ورودی و خروجی و تراز مخزن نیز مدل‌سازی با مدل‌های ترکیبی مذکور انجام شود. همچنین در مطالعه‌های آتی از دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت آموزش ANN در پیش‌بینی حجم آب تحویلی به شبکه آبیاری و زهکشی استفاده شده و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از این مطالعه مقایسه شود.

**منابع**

ابراهیم زاده، ع.، ضرغامی، م. و نورانی، و. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک روگذری سدهای خاکی با مدل پویایی سیستم‌ها تحت شبیه‌سازی مونت کارلو و روش آبرمکعب لاتین، مطالعه موردی: سد حاجیلر چای. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۳۱-۱۴.

الهام، م.، داود براری، ت.، ابراهیم، ا.، یوسف نیک، ن.، هرمز، ف. و مهدی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی و برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه برنج در استان‌های شمالی کشور. جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای). سال نهم. ۵۶۱-۵۷۲.

اسدی، ه.، شاهی، ک.، سایدل، ر. و مصطفی، س.م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی رسوب معلق با استفاده از داده‌های هیدرولوژیک و هیدروژئومورفیک در مدل‌های هوشمند. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۳): ۱۰۵-۱۱۹.

اسلامی، ز.، جنت رستمی، س.، اشرف زاده، ا. و پورمحمد، ی. ۱۳۹۹. تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. آب و خاک. ۳۴(۱): ۱۱-۲۵.

امیری میجان، ف.، شیرانی ح.، اسفندیارپور ع.، بسالت پور ع.ا و شکفته ح. ۱۳۹۸. مدل‌سازی شاخص S و تعیین عوامل مؤثر بر آن با استفاده از الگوریتم هیبرید شبیه‌سازی تبرید- شبکه عصبی مصنوعی در خاک‌های آهکی جنوب شرق ایران. مجله علوم آب و خاک. ۲۳(۳): ۳۸۱-۳۹۴.

امینی، ک.، جنت رستمی، س.، پیرمردیان، ن. و اشرف زاده، ا. ۱۳۹۶. ارزیابی شاخص اکو-بهره وری در واحد عمرانی F1 از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۳): ۱۱۴-۱۲۴.

پارسا، ج.، حکیمی خانسر، ح.، دلیر حسین زاده، ع.، و شیرینی، ج. ۱۳۹۹. مدل‌سازی تنش خاک در سدهای خاکی با روش‌های هوش مصنوعی و تعیین ویژگی‌های مؤثر. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۲(۳): ۵۰-۶۵.

حبیبی کندی، ع.، میلاد دوستی، م. و ملاقدیمی، ا. ح. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد مدول‌های نریپیک به عنوان سازه آبیگر در تأمین آب اراضی پایین دست خود در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. آب و توسعه پایدار. ۴(۱): ۶۵-۷۲.

حسن پور نودهی، م.، نوابیان، م. و اسمعیلی ورکی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی کیفیت زه‌آب اراضی شالیزاری برای استفاده مجدد در آبیاری و تخلیه به محیط زیست (مطالعه موردی: واحد عمرانی F4 شبکه آبیاری و زهکشی سفید رود). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۴): ۹۰۹-۹۱۸.

سلماسی، ف. و حکیمی خانسر، ح. ۱۳۹۹. تخمین رفتار سد کیودوال در حین ساخت با مدل‌سازی عددی سه بعدی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۳(۹): ۲۰-۲۰.

شاوردی، ع.، و تهامی پور، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر بازده نهایی آب آبیاری در استان گیلان. اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۲۴(۹۵): ۸۹-۱۰۶.

غلامی، م.، شاهنظری، ع.، مرتضی پور، م.ر. و شاه نوریان، م.م. ۱۳۹۵. حل مناقشه‌ی شبکه‌ی آبیاری و زهکشی سفیدرود با استفاده از نظریه بازی‌ها. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳(۳): ۱۰۱-۱۱۱.

مطهری، م.، ستوده‌نیا، ع.، نظری، ب. و یزدانی، م. ر. ۱۳۹۹. ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی محصول برنج در مقیاس حوضه‌ای بر اساس تبخیر و تعرق واقعی در حوضه سفیدرود.

- problems. *Computers & Structures*, 110(111): 151-166.
- Hill, M. C. 2000. *Methods and guidelines for effective model calibration Building Partnerships*. pp. 1-10.
- Kumar, V. and Minz, S. 2014. Feature selection: a literature review. *SmartCR*. 4(3): 211-229 .
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., Bozorg-Haddad, O., Shiri, J. and Yaseen, Z. M. 2019. Soil moisture simulation using hybrid artificial intelligent model: Hybridization of adaptive neuro fuzzy inference system with grey wolf optimizer algorithm. *Journal of Hydrology*. 575: 544-556 .
- Navabian, M., Heydarian, M. and Vazifeh Dost, M. 2020. Investigation the Effect of Transplanting Date on Intermittent Irrigation Planning in Paddy Fields Using SWAP Model (Case Study: Astaneh-Kochesfahan Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 14(5): 1789-1802 .
- Taylor, K. E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 106(D7):7183-7192.
- فضای جغرافیایی. ۲۰(۷۲): ۱۳۹-۱۵۷.
- منتظر، ع. ا.، زادباقر، ا.، و حیدری، ن. ۱۳۸۸. توسعه مدل ارزیابی آب مجازی شبکه های آبیاری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۴): ۷۷-۸۹.
- نوری، م.، و سلماسی، ف. ۱۳۹۷. برآورد مقادیر نشت از سدهای خاکی با استفاده از روش های هوش مصنوعی. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۲(۱): ۸۳-۹۷.
- هاشمی شاهدانی، س. م.، حسنی، ی. و هرمزی، م. ۱۳۹۵. توزیع و تحویل بهینه آب در کانال اصلی آبیاری از نظر اقتصادی در شرایط کم آبی. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳(۳): ۳۳-۴۲.
- Ahmed, M., Mumtaz, R. and Hassan Zaidi, S. M. 2021. Analysis of water quality indices and machine learning techniques for rating water pollution: a case study of Rawal Dam, Pakistan. *Water Supply*. 3(1): 1-15.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. and Hamdi, M. 2012. Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization



## Determining Effective Features for Estimating the Volume of Water Delivered to the Irrigation and Drainage Network using Artificial Intelligence Methods (Case study: Irrigation and Drainage Network of Sefidrood Dam)

H. Hakimi Khansar<sup>1\*</sup> and A. Shabani Chafjiri<sup>2</sup>

### Abstract

In this study, the ability of water cycle algorithm in combination with ANN to model the volume of water delivered to the Irrigation and drainage network and determine the effective characteristics, was investigated. For the input of artificial intelligence models, five Features include the volume of water delivered to Sefidrood Irrigation and drainage network for one lags, flow and inlet volume for seven lags, level and reservoir volume for ten lags, were chosen. Using a hybrid algorithm, feature selection method and sensitivity analysis, a triple combination of features (with MSE of 0.00045) is the best input combination. The volume of water delivered to Sefidrood Irrigation and drainage network for one lags according to sensitivity analysis has been the most effective feature in its modeling. Then the artificial neural network weights were optimized to increase efficiency and with the help of two meta-innovative algorithms: water cycle without evaporation (WCA) and water cycle with evaporation (ER.WCA). The ANN-ER.WCA hybrid model with the highest accuracy (with values of R, NRMSE, MAE and NS equal to 0.9915, 0.0975, 0.0090 and 0.9829 in the test period, respectively) is in the first priority and the ANN-WCA and ANN models are next in line, respectively.

**Keywords:** Artificial neural network, Feature selection, Irrigation and drainage network Of Sefidrood Dam, Hydroinformatics, Water cycle algorithm

<sup>1</sup> Ph.D Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran and Control and stability expert, Regional Water company of Guilan, Iran (\*Corresponding Author Email: hakimi1904@yahoo.com)

<sup>2</sup> Master of Civil Engineering, majoring in hydraulic structures, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran and Expert in operation and maintenance of Regional Water company of Guilan, Iran

Received: 30 Sept 2021

Accepted: 12 Nov 2021

