

## مقایسه عملکرد سامانه استنتاج فازی - عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن به منظور تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک

مهران رستم‌لو<sup>۱</sup>، حسن اوجاقلو<sup>۲\*</sup> و مسعود کرباسی<sup>۳</sup>

### چکیده

یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد در طراحی سامانه‌های آبیاری تحت فشار و به‌خصوص سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک، شاخص یکنواختی پخش آب می‌باشد. در این تحقیق، عملکرد سامانه استنتاج فازی-عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن به منظور تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در شرایط مختلف از نظر سرعت باد، آرایش آبپاش‌ها، دبی و نوع آبپاش‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. به همین منظور، یک سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با در نظر گرفتن آرایش‌های مختلف لوله‌ها و آبپاش‌ها طراحی و اجرا شد. تعداد ۵۴ آزمایش مزرعه‌ای برای ارزیابی عملکرد یک سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت انجام شد. کمترین مقدار میانگین خطای مطلق برای روش‌های استنتاج فازی و بیان ژن به ترتیب برابر با ۶/۲ و ۵/۱ درصد و بیشترین مقادیر ضریب همبستگی برای روش‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۲ به دست آمد. به طور کلی، اختلاف بین عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و سامانه استنتاج فازی ناچیز بود و حساسیت‌سنجی مدل‌ها نشان داد، عامل دما و سرعت باد به ترتیب کمترین و بیشترین اثر را بر تغییرات ضریب یکنواختی پخش آب داشتند. همچنین بررسی مقادیر تخمین‌یافته ضریب یکنواختی پخش آب نشان داد، مدل‌های هوشمند به خوبی توانسته‌اند اثر عواملی همچون سرعت باد و فواصل آبپاش‌ها را بر کاهش مقدار یکنواختی پخش آب شبیه‌سازی کنند.

**واژه‌های کلیدی:** آرایش آبپاش، پیش‌بینی، سرعت باد، مدل‌های هوشمند.

**ارجاع:** رستم‌لو م.، اوجاقلو ح. و کرباسی م. ۱۳۹۷. مقایسه عملکرد سامانه استنتاج فازی-عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن به منظور تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک. مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۸۵-۹۴.

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه زنجان.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

\* نویسنده مسئول: [ojaghlo@znu.ac.ir](mailto:ojaghlo@znu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۰

## مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب در اغلب نقاط کشور، ضرورت استفاده بهینه از آب در طرح‌های توسعه منابع آب، امری محدود و بهره‌بردار از راهکارهای علمی و عملی در این خصوص، از جمله ارزیابی مداوم عملکرد سامانه‌های آبیاری و زهکشی مورد توصیه و تأکید است (سهرابی و همکاران، ۱۳۸۹). یکی از راهکارهای استفاده بهینه از منابع آبی در کشور، توسعه سامانه‌های آبیاری نوین، از جمله روش‌های آبیاری تحت فشار می‌باشد. ارزیابی مزرعه‌ای و اطلاع دقیق از عملکرد سامانه‌های آبیاری تحت فشار در شرایط مختلف طرح، به‌عنوان ابزاری مهم در توسعه صحیح این سامانه‌ها محسوب می‌شود که در نهایت، منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات آب خواهد شد. یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد در طراحی سامانه‌های آبیاری تحت فشار و به‌خصوص سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک، شاخص یکنواختی پخش آب می‌باشد. از سوی دیگر، اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای شاخص یکنواختی پخش آب در شرایط مختلف اقلیمی، هیدرولیکی و مشخصات اجرایی طرح‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد و از این‌رو، استفاده از روش‌های غیرمستقیم، از جمله مدل‌سازی و روش‌های هوشمند می‌تواند مفید واقع باشد. در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به خوبی به‌عنوان یک راهکار جایگزین برای غلبه بر مشکلات روش‌های سنتی ارتقا یافته‌اند. به‌کارگیری ساختارهای محاسباتی سامانه بیولوژیکی، می‌تواند منجر به ایجاد الگوهای محاسباتی بهتری برای مسائل مبهم و پیچیده شود (قرلباش و همکاران، ۱۳۹۳). در ادامه، به مهم‌ترین مطالعات انجام گرفته در خصوص ارزیابی‌های مزرعه‌ای و مدل‌سازی شاخص یکنواختی پخش آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک پرداخته شده است. شیخ اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی مقادیر بهینه پارامترهای طراحی، نظیر آرایش، فواصل آبیاری و اثر آن‌ها بر یکنواختی توزیع آب در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری متحرک به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار ضریب یکنواختی با آرایش مربعی به‌دست می‌آید. همچنین، ضریب یکنواختی با افزایش سرعت باد در همه حالت‌های آرایش و فواصل آبیاری به طور خطی کاهش می‌یابد. منتظر (۱۳۸۷) به بررسی اثر سرعت باد، فشار کارکرد آبیاری

شیب زمین بر یکنواختی توزیع رطوبت خاک در اراضی مجهز به سامانه آبیاری بارانی پرداخت. در نهایت، معادله‌ای بین ضریب یکنواختی توزیع رطوبت خاک با دو پارامتر شیب بستر و ضریب یکنواختی توزیع آب ارائه داد. طبق نتایج به‌دست آمده، وابستگی ضریب یکنواختی توزیع آب به پارامتر سرعت باد در مقایسه با فشار کارکرد سامانه بیشتر بود. رحمت آبادی و همکاران (۱۳۸۹) تلفات تبخیر و بادبردگی و همچنین ضریب یکنواختی توزیع در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاری ADF 25° متحرک را مورد بررسی قرار دادند. سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع محیط به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تلفات تبخیر و بادبردگی شناخته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، با کاهش نسبت فواصل آبیاری به قطر پاشش در فواصل در نظر گرفته‌شده، ضریب یکنواختی پخش آب افزایش می‌یابد. هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) از روش الگوریتم ژنتیک برای برآورد شاخص یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی، در مقادیر مختلف فشار کارکرد، ارتفاع پایه آبیاری، فاصله آبیاری روی لوله جانبی و فاصله لوله‌های جانبی از یکدیگر استفاده کردند و کارایی بالای این روش را در مدل‌سازی شاخص مذکور تأیید کردند. اکبری و همکاران (۱۳۹۱) دریافته‌اند که ارتباط بین فشار و یکنواختی توزیع آب در کلیه آبیاری‌های مورد آزمایش خطی نبوده و در فشارهای پایین، شیب منحنی فشار-ضریب یکنواختی بیشتر شده و بیشترین یکنواختی توزیع آب در کلیه فشارهای مورد بررسی مربوط به آرایش ۲۰×۲۵ متر آبیاری بود. از طرفی، ارتباط بین سرعت باد و یکنواختی توزیع آب نشان می‌دهد که معادله سرعت باد و ضریب یکنواختی در آبیاری‌های مورد بررسی خطی نبوده و با افزایش سرعت باد، ضریب یکنواختی با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. آبابایی و وردی‌نژاد (۱۳۹۲) عملکرد هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری تحت فشار را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون ناپارامتری برآورد کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، امکان ساده-سازی مدل‌های پیچیده هیدرولیکی با جایگزینی کل یا بخشی از این مدل‌ها با مدل‌های ساده‌تر آماری و شبکه عصبی وجود دارد و این مسئله با توجه به پیچیدگی مدل‌های هیدرولیکی، به‌ویژه در فرایند بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. قرلباش و همکاران (۱۳۹۳) عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه

عوامل اثرگذار بر یکنواختی پخش آب مورد بررسی مزرعه‌ای قرار گیرند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد سامانه استنتاج فازی عصبی و مقایسه آن با نتایج روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در شرایط مختلف اقلیمی، هیدرولیکی و فیزیکی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور اندازه‌گیری ضریب یکنواختی پخش آب در مزرعه‌ای به مساحت تقریبی ۲/۲ هکتار واقع در نزدیکی دانشگاه زنجان انجام شد. سامانه آبیاری بارانی، شامل یک عدد الکتروپمپ شناور، خط اصلی، دو لاترال و تعداد چهار آبیاش هم‌زمان در حال کار، طراحی و اجرا شد. آبیاش‌های مورد مطالعه در این پژوهش، شامل دو نوع مدل Ambo دو نازله و VYR-۱۵۵ سه نازله بود. برای اجرای آبیاش‌های مختلف آبیاش‌ها، شامل سه مقدار فاصله آبیاش و سه مقدار فاصله لاترال‌ها، شیرخودکارها در سه فاصله ۱۸، ۲۲ و ۲۵ متری از هم بر روی لوله‌های فرعی نصب شدند. همچنین، فواصل نصب لوله‌های فرعی بر روی لوله اصلی برای سه مقدار ۱۸، ۲۲ و ۲۵ متری تنظیم و اجرا شد. به‌منظور کنترل فشار کارکرد آبیاش‌ها، از شیر فلکه‌ای که بر روی لوله رانش پمپ وجود داشت، استفاده شد. آب مازاد بر نیاز چهار آبیاش در حال کار که در لوله اصلی جریان داشت، توسط یک لوله دیگر به استخر موجود در مزرعه انتقال می‌یافت. تعداد ۵۴ آزمایش تعیین ضریب یکنواختی پخش آب از ترکیب دو نوع مدل آبیاش (دبی خروجی ۰/۹۳ و ۱/۲۳ لیتر بر ثانیه)، تعداد نه آبیاش مختلف آبیاش‌ها (۱۸×۱۸، ۲۲×۲۲، ۲۲×۲۵، ۲۵×۱۸، ۱۸×۲۲، ۱۸×۲۵، ۲۲×۲۲ و ۲۵×۲۵) و در سه محدوده سرعت باد مختلف (۲/۵-، ۵-۲/۵ و بیشتر از ۵ متر بر ثانیه) انجام شد. در هر آزمایش به‌منظور تعیین ضریب یکنواختی پخش آب از یک شبکه قوطی نمونه‌برداری آب استفاده شد. فواصل قوطی‌ها به طور متوسط ۳×۳/۵ متر در نظر گرفته شد. بسته به نوع آبیاش آبیاش‌ها تعداد قوطی‌ها نیز متفاوت بود؛ به طوری که کمترین و بیشترین تعداد قوطی چیده‌شده در سطح زمین به ترتیب ۲۵ و ۴۹ عدد بود. در

عصبی مصنوعی را برای تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی مورد مقایسه قرار دادند. با مقایسه آماری نتایج محاسباتی، ریشه میانگین مربعات خطا برای روش‌های ANN و GEP در آبیاش ۲۰-AQ برابر ۰/۰۶ و ۰/۰۶۲ و در آبیاش ۶-KA نیز به ترتیب برابر ۰/۰۶۷ و ۰/۰۶۴ به دست آمد. از آن جایی که مدل GEP قادر به ارائه معادله‌ای صریح برای تخمین ضریب یکنواختی بود، به‌عنوان روش کاربردی‌تر معرفی شد. فوکویی و همکاران (۱۹۸۰) در ارزیابی رایانه‌ای یکنواختی آبیاری بارانی نشان دادند که حداکثر ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاش مثلی و در فواصل کمتر آبیاش‌ها از هم حاصل می‌شود. معروف‌پور و همکاران (۲۰۱۰) ضریب یکنواختی سامانه‌های آبیاری بارانی را تحت شرایط مختلف مزرعه‌ای در استان کردستان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از ضرایب یکنواختی مختلف بستگی به شرایط مزرعه دارد و همچنین، هر ضریب یکنواختی خاص فقط برای شرایط مزرعه‌ای مخصوص مناسب است. منصور و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم تفاضل‌های تقسیمی را برای تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از الگوریتم مورد نظر، ضرایب بهینه‌سازی‌شده معادله تخمین CU حاصل شد. نتایج نشان داد، الگوریتم مورد نظر دقت بالایی برای تخمین یکنواختی توزیع آب دارد. منزس و همکاران (۲۰۱۵) مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای شبیه‌سازی توزیع آب در آبیاری بارانی مورد بررسی قرار دادند. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر شدت پخش آب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در محدوده ۹۲ تا ۹۷ درصد به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد، مدل شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی شدت بارش سامانه‌های آبیاری بارانی عملکرد مناسبی داشته است. بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه‌های آبیاری بارانی نشان داد، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش سامانه استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) انجام نگرفته است. اجرای آزمایش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری بارانی در شرایط مختلف از نظر اقلیمی و فیزیکی طرح همواره با محدودیت‌هایی از نظر هزینه و زمان مواجه می‌باشد که در این تحقیق نیز سعی شد تا حد امکان

$$O_{2,i} = W_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1, 2 \quad (۴)$$

لایه سوم، گره‌های متوسط می‌باشد و در این لایه آمین گره، نسبت درجه فعالیت قانون نام را به مجموع درجه فعالیت کلیه قوانین به صورت معادله (۵) نرمال‌سازی می‌کند. لایه چهارم، گره‌های نتیجه بوده و گره  $i$  در این لایه مشارکت قانون  $i$  ام را به سمت خروجی مدل با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌کند:

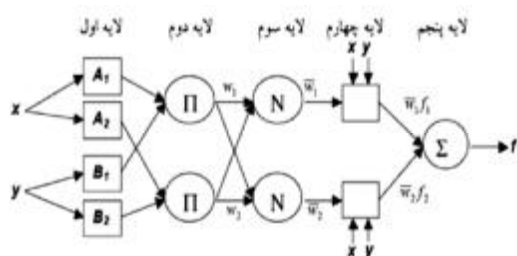
$$O_{3,i} = \bar{W}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (۵)$$

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f = \bar{w}_i (p_i + q_i + r_i), i = 1, 2 \quad (۶)$$

در معادلات (۵) و (۶)،  $\bar{w}_i$ ، خروجی لایه سه و  $\{p_i, q_i, r_i\}$ ، مجموعه پارامترها هستند. لایه پنجم، گره‌های خروجی است و تنها گره این لایه، خروجی کلی ANFIS را به‌عنوان جمع‌بندی از تمام ورودی‌های مدل که غیرفازی شده‌اند، مطابق معادله (۷) محاسبه می‌کند:

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^4 \bar{w}_i f = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i f}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (۷)$$

برای تولید سامانه فازی (فازی‌سازی) از سه روش می‌توان استفاده کرد: ۱- بخش‌بندی شبکه‌های؛ ۲- خوشه‌بندی جایگزین<sup>۲</sup> و ۳- خوشه‌بندی فازی- $C$  means. هنگامی که تعداد داده‌های ورودی زیاد باشند، روش بخش‌بندی شبکه‌ای با توجه به افزایش تعداد قواعد فازی به زمان زیادی برای محاسبات نیاز خواهد داشت. در شکل ۲، نمونه طراحی‌شده از مدل فازی-عصبی نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار مدل استنتاجی فازی - عصبی (ANFIS)

### برنامه‌ریزی بیان ژن

روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای اولین بار توسط فریرا ارائه شد (فریرا، ۲۰۰۱). در این برنامه‌ریزی، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آن چه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با

هر آزمایش مقدار دبی آبپاش به روش حجمی، فشار آب در روزنه اصلی آن از طریق یک فشارسنج فلزی و سرعت باد، دما و رطوبت نسبی در فواصل زمانی تقریبی ۵ دقیقه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری دیجیتالی هواشناسی (kestrel 4000) اندازه‌گیری شد. با توجه به نزدیکی محل آزمایش‌ها به ایستگاه هواشناسی دانشگاه زنجان، از آمار هواشناسی این ایستگاه برای صحت‌سنجی نتایج دستگاه استفاده شد. در نهایت، ضریب یکنواختی پخش آب کریستیانسن از معادله (۱) تعیین شد:

$$CU_t = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{\bar{V} \times n} \right] \times 100 \quad (۱)$$

در معادله (۱)،  $CU_t$  ضریب یکنواختی کریستیانسن (درصد)،  $V_i$  حجم آب در هر یک از قوطی‌های جمع‌آوری آب (میلی‌لیتر)،  $\bar{V}$  متوسط حجم‌های آب جمع‌شده در قوطی‌ها (میلی‌لیتر) و  $n$  تعداد قوطی‌های جمع‌آوری آب می‌باشد.

### سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)

برای برآورد ضریب یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت، شبکه‌های فازی-عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. این مدل‌ها توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت. شبکه‌های سامانه منطق فازی-عصبی ضمن داشتن قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و قدرت استنتاج سامانه‌های فازی، قابلیت یافتن هر نوع شبیه یا نگاشت غیرخطی را دارند و می‌توانند به طور دقیق، ورودی‌ها (مقادیر اولیه) را با خروجی (مقادیر پیش‌بینی‌شده) مرتبط سازند. ANFIS، شامل پنج لایه می‌باشد. لایه اول، گره‌های ورودی بوده و هر گره از این لایه مقادیر عضویتی را که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کند.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ for } i = 1, 2 \quad (۲)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ for } i = 3, 4 \quad (۳)$$

در معادلات (۲) و (۳)،  $x$  یا  $y$ ، ورودی‌های غیرفازی به گروه  $i$ :  $A_1$  و  $B_1$ ، برچسب‌های زبانی هستند که به ترتیب با توابع عضویت  $\mu_{A_i}$  و  $\mu_{B_i}$  مشخص می‌شوند. لایه دوم، گره‌های قاعده می‌باشد و هر گره در این لایه در سیگنال ورودی ضرب می‌شود و خروجی نتیجه‌ای از تمامی سیگنال‌های ورودی است.

میانگین دما ( $T_{mean}$ )، میانگین سرعت باد ( $Wind_{mean}$ ) و جهت باد غالب در مدت زمان آزمایش ( $Wind_{direction}$ ) بود. پارامتر خروجی در همه شبیه‌سازی‌ها، ضریب یکنواختی پخش آب (CU) بر حسب درصد بود. در اجرای هر دو مدل هوشمند، ۷۰ درصد داده‌های مزرعه‌ای به دست آمده برای یادگیری مدل‌ها و ۳۰ درصد داده‌ها نیز برای آزمون مدل‌ها استفاده شد. برای استانداردسازی داده‌های ورودی مورد استفاده در مدل‌ها، از معادله (۸) استفاده گردید:

$$X_n = 0.8 \left( \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) + 0.1 \quad (8)$$

در معادله (۸)،  $X_n$  داده استاندارد شده،  $X$  داده مشاهده‌ای،  $X_{max}$  و  $X_{min}$  به ترتیب معرف داده‌های مشاهده‌ای حداقل و حداکثر است.

### معیارهای آماری برای مقایسه مدل‌ها

به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های هوشمند در تخمین ضریب یکنواختی پخش آب سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک، از آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا به شرح معادلات زیر استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{mean})(y_i - y_{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{mean})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{mean})^2}} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (11)$$

در معادلات بالا،  $x_i$  داده‌های اندازه‌گیری شده،  $y_i$  داده‌های شبیه‌سازی شده،  $X_{mean}$  و  $y_{mean}$  به ترتیب میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشند.

### نتایج و بحث

مقدار ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. کمترین مقدار ضریب یکنواختی مربوط به آبیاش ۷yr-۱۵۵ با آرایش ۲۵×۲۵ متر و در سرعت باد ۲/۵ تا ۵ متر بر ثانیه برای آبیاش ۷yr-۱۵۵ برابر با ۴۵/۱ درصد تعیین شد. بیشترین مقدار ضریب یکنواختی نیز مربوط به آبیاش Ambo با

اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. اولین مرحله در شبیه‌سازی‌ها به کمک این نرم‌افزار، تولید جمعیت اولیه از راه‌حل‌هاست که به کمک یک سری توابع و ترمینال‌ها صورت می‌گیرد. سپس، کرموزوم‌ها به صورت بیان درختی نشان داده و توسط تابع برازش ارزیابی می‌شوند. در صورت دستیابی به راه‌حل مطلوب و یا رسیدن نسل‌ها به تعداد معین، تکامل متوقف و بهترین راه‌حل ارائه می‌شود. اگر شرایط توقف حاصل نشود، نخبه‌گزینی صورت می‌گیرد و باقی راه‌حل‌ها به فرایندی گزینشی واگذار می‌شوند. این فرایند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش‌رفتن نسل به جلو کیفیت جمعیت نیز به طور نسبی بهبود می‌یابد (فریرا، ۲۰۰۶). در این روش، پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و ترمینال‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. مجموعه توابع، معمولاً شامل توابع اصلی حسابی، مثلثاتی و یا توابع تعریف شده توسط کاربر هستند که معتقد است، می‌توانند برای تفسیر مدل مناسب باشند. مجموعه ترمینال‌ها، از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسئله تشکیل شده‌اند. همه پارامترهای ذکر شده در بالا با سعی و خطا تا دستیابی به حداکثر ضریب همبستگی مدل (R) توسط کاربر انتخاب می‌شوند. در این پژوهش، از نرم‌افزار GeneXpro Tools 5.0 برای به کارگیری مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد. مدل‌های گوناگون برنامه‌ریزی بیان ژن با همان ترکیب‌های ورودی مدل ANFIS در بهترین حالت‌های ورودی مدل ANFIS ایجاد شدند. گام نخست در بررسی مدل، انتخاب یک تابع برازش مناسب است. نتایج انتخاب اولیه تابع برازش نشان داد، استفاده از تابع برازش ضریب همبستگی (R) و ریشه نسبی مربعات خطا (RMSE) در مقایسه با سایر توابع، عملکرد بهتری دارند. همچنین، از بین توابع پیوند، شامل جمع و ضرب، تابع پیوند جمع عملکرد بهتری در مقایسه با تابع پیوند ضرب دارد و آخرین گام، انتخاب عملگرهای اصلی برای ساخت درخت تجزیه و توابع ریاضی مناسب برای تفسیر مدل می‌باشد.

### داده‌های ورودی و خروجی مدل‌ها

پارامترهای ورودی سامانه استنتاج فازی- عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن، شامل ترکیبی از عوامل دبی آبیاش (Q)، فواصل آبیاش‌ها (Area)، رطوبت نسبی هوا (RH)،

ضریب یکنواختی پخش آب در آزمایش‌های انجام‌شده به شدت تحت تأثیر سرعت باد قرار دارد.

### نتایج مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

اطلاعات ورودی، پارامترهای استفاده‌شده و نتایج به‌دست‌آمده در هر بار اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در جدول ۳ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج عملکرد توابع مختلف در مطالعات پیشین، بهترین نتایج به دست آمده مربوط به مجموعه توابع  $(\pm, \times, \div, \sqrt{\quad}, \sqrt[3]{\quad}, x^2, x^3, \text{ و } e^x)$  می‌باشد که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفت. مطابق جدول اشاره شده، بهترین عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مربوط به ترکیب داده‌های ورودی، شامل دبی آبپاش، فواصل آبپاش‌ها، سرعت و جهت باد می‌باشد؛ به طوری که در این شرایط و با در نظر گرفتن توابع پیوندی جمع، بیشترین مقدار ضریب همبستگی در مرحله آزمون برابر با  $0.72$  و کمترین مقدار RMSE معادل  $7/13$  درصد حاصل شد. یکی از مزیت‌های مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به مدل ANFIS و سایر مدل‌های هوشمند، ارائه معادله ریاضی بهینه بین متغیر وابسته ضریب یکنواختی و سایر متغیرهای مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. معادله به‌دست آمده توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن به‌منظور برآورد ضریب یکنواختی با پارامترهای ورودی مدل  $(Q, \text{Area}, \text{Wind}_{\text{mean}}, \text{Wind}_{\text{direction}})$  و با تعداد کروموزوم، طول رأس و تعداد ژن به‌ترتیب برابر با ۱۵۰، ۱۰ و ۵ در معادله (۱۲) ارائه شده‌اند. این معادله برای بهترین حالت اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با تابع پیوند جمع به‌دست آمد.

$$Cu = \bar{V}_w + \left( 224.05 + 2\bar{V}_w^2 \times Q \right)^{\frac{2}{3}} + \left( W_d - \bar{V}_w + 100.6 \times Q \times \bar{V}_w \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{6.66\bar{V}_w^2}{W_d} \right) + \left( \frac{2.25 \times e^{7.18 \times \bar{V}_w^{\frac{1}{2}}}}{Q^2(A-128.08)} \right) + \left( \frac{(Q+4.23) - \left( \bar{V}_w / Q \right)}{(Q-0.25)^3} \right) + \left( \frac{e^{-4.85 \times W_d} \times ((-10.35 - \bar{V}_w)^3 + 122.77)}{W_d - \bar{V}_w} \right) \quad (12)$$

یکدیگر حاصل می‌شود (مترمربع)،  $\bar{V}_w$  متوسط سرعت باد (متر بر ثانیه) و  $W_d$  جهت سرعت باد (درجه) می‌باشد. مقادیر ضریب یکنواختی تخمین‌یافته توسط مدل‌های هوشمند با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. شاخص‌های

آرایش  $18 \times 18$  متر و در سرعت باد  $2/5 - 5$  متر بر ثانیه برابر با  $88/6$  درصد به‌دست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد، در صورت استفاده از آبپاش Ambo، با افزایش فاصله لاترال‌ها و سرعت باد، میزان ضریب یکنواختی پخش آب کاهش می‌یابد. در آبپاش Vyr-155، با افزایش فاصله لاترال‌ها ضریب یکنواختی در برخی آزمایش‌ها افزایش یافته است. مشاهده‌های مزرع‌های بیانگر این بود که در شرایط یکسان، آبپاش Ambo نسبت به Vyr-155 عملکرد مناسب‌تری از نظر یکنواختی پخش آب داشته است.

### نتایج مدل ANFIS

در جدول ۲، ترکیب‌های مختلف از داده‌های ورودی به مدل ANFIS و نتایج به‌دست‌آمده از روش خوشه‌بندی جایگزین ارائه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد، استفاده از تمامی داده‌های ورودی، شامل دبی آبپاش، فواصل آبپاش‌ها، سرعت باد، جهت باد، رطوبت نسبی و متوسط دما و همچنین در نظر گرفتن شعاع مؤثر برابر یک منجر به بهترین نتیجه می‌شود؛ به طوری که مقدار ضریب همبستگی (R) برای مرحله آموزش و آزمون مدل به‌ترتیب برابر با  $1$  و  $0.77$  و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌ترتیب برابر  $0.33$  و  $7/7$  درصد به‌دست آمد. با حذف پارامترهای رطوبت نسبی و متوسط دما از ورودی‌های مدل، تغییر قابل توجهی در نتایج مدل مشاهده نشد؛ در حالی که با حذف پارامتر سرعت باد، نتایج خروجی مدل از جمله شاخص RMSE به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌یافت. این موضوع نشان داد، مقادیر

در معادله بالا، Cu ضریب یکنواختی به‌دست آمده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (درصد)، Q دبی آبپاش‌ها (لیتر بر ثانیه)، A مساحت تحت پوشش آبپاش‌ها که از ضرب فاصله بین آبپاش‌ها روی لاترال‌ها و فاصله بین لاترال‌ها از

(۲۰۱۵) در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ قرار داشت. شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه مقادیر ضریب یکنواختی تخمین‌یافته توسط مدل‌های هوشمند و مشاهداتی را نشان می‌دهند. مطابق شکل ملاحظه می‌شود، مدل GEP در مقادیر پایین ضریب یکنواختی، عملکرد بهتری از خود نشان داده است؛ ولی با افزایش مقادیر یکنواختی و به‌خصوص در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد، از میزان دقت آن کاسته شده است. مدل ANFIS نیز تقریباً مشابه GEP در مقادیر کم ضریب یکنواختی دقت قابل قبول‌تری داشته است؛ به عبارتی، می‌توان بیان داشت مدل‌های هوشمند به خوبی توانسته‌اند اثر عواملی همچون سرعت باد و فواصل آبپاش را بر کاهش مقدار یکنواختی پخش آب شبیه‌سازی کنند.

آماري محاسبه‌شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. مطابق جدول ملاحظه می‌گردد، عملکرد دو مدل ANFIS و GEP اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد. از سوی دیگر، با حذف پارامترهای ورودی دما و رطوبت نسبی، دقت نتایج مدل‌ها تغییر فاحشی نداشته است. نتایج به‌دست آمده برای روش GEP با نتایج مطالعات پیشین از جمله قزلباش و همکاران (۱۳۹۳) همخوانی دارد. مقدار ضریب همبستگی و شاخص RMSE گزارش‌شده برای مدل GEP توسط ایشان در آبپاش ۲۰-۶ KA برابر با ۰/۷۶ و ۰/۰۶ و در آبپاش ۶-۶ KA به‌ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۰۶۷ گزارش شده است. همچنین، مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن گزارش‌شده برای مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) توسط منرس و همکاران

جدول ۱- ضریب یکنواختی توزیع آب کریستیانسن (درصد) در تیمارهای مختلف

فواصل آبپاش‌ها بر حسب متر ( $S_m \times S_l$ )										سرعت باد (متر بر ثانیه)	نوع آبپاش
۱۸×۱۸	۱۸×۲۲	۱۸×۲۵	۲۲×۱۸	۲۲×۲۲	۲۲×۲۵	۲۵×۱۸	۲۵×۲۲	۲۵×۲۵			
۷۶/۳	۷۲/۱	۶۳/۹	۸۴	۶۷/۳	۵۹/۸	۶۹/۴	۷۴/۴	۶۷/۱	۰-۲/۵		
۸۸/۶	۷۲	۶۱/۵	۶۱/۳	۶۶/۱	۴۶/۳	۶۵/۱	۶۳	۶۶/۹	۲/۵-۵	Ambo	
۸۰/۹	۷۱/۹	۶۵/۲	۵۸/۷	۵۳/۲	۴۷/۵	۶۳/۱	۶۵/۴	۵۸	>۵		
۵۷/۹	۶۳/۴	۵۷/۲	۶۰/۳	۴۷/۷	۵۲/۲	۵۹/۹	۴۹	۶۴/۴	۰-۲/۵		
۶۴/۳	۵۷/۳	۶۰/۱	۶۲/۸	۶۰/۷	۴۵/۱	۶۹/۶	۶۹/۷	۶۱/۱	۲/۵-۵	Vyr-۱۵۵	
۶۸/۸	۶۷/۷	۵۹/۵	۶۶/۶	۶۵/۷	۵۸	۷۳/۶	۵۸	۵۷/۹	>۵		

جدول ۲- نتایج کلی آموزش و آزمون روش خوشه‌بندی جایگزین مدل ANFIS با ترکیب مختلف داده‌های ورودی

ردیف	داده‌های ورودی آموزش و آزمون	مشخصات شبیه‌سازی		ریشه میانگین مربعات خطا (%)	آموزش	آموزش	شعاع مؤثر خوشه
		ضریب همبستگی	ضریب همبستگی				
۱	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۲۵	۰/۴۷	۹/۲۸	۹/۱×۱۰ <sup>-(۶)</sup>	۱	۰/۲۵
۲	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۵	۰/۶۸	۷/۹۶	۸/۸۸×۱۰ <sup>-(۵)</sup>	۱	۰/۵
۳	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۷۵	۰/۶۱	۸/۶۷	۰/۰۰۰۱۷	۱	۰/۷۵
۴	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱	۰/۷۷	۷/۷	۰/۰۰۰۳۳	۱	۱
۵	Q-Area-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۲۵	۰/۴۰	۱۴/۵۳	۹/۶۷×۱۰ <sup>-(۶)</sup>	۱	۰/۲۵
۶	Q-Area-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۵	۰/۶۷	۸/۸۹	۳/۶۸×۱۰ <sup>-(۵)</sup>	۱	۰/۵
۷	Q-Area-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۷۵	۰/۷	۹/۴۳	۰/۰۱۲	۱	۰/۷۵
۸	Q-Area-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱	۰/۵۹	۱۳/۲۲	۰/۰۱۱	۱	۱
۹	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۲۵	۰/۵۳	۸/۷۷	۱/۷×۱۰ <sup>-(۵)</sup>	۱	۰/۲۵
۱۰	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۵	۰/۷۷	۷/۹۸	۵/۸۵×۱۰ <sup>-(۵)</sup>	۱	۰/۵
۱۱	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۰/۷۵	۰/۲۳	۱۹/۷۳	۰/۰۱۲	۱	۰/۷۵

ادامه جدول ۲-

ردیف	داده‌های ورودی آموزش و آزمون	مشخصات شبیه‌سازی			ضریب همبستگی		ریشه میانگین مربعات خطا (%)
		شعاع مؤثر خوشه	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	
۱۲	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱	۱	۰/۶۸	۰/۴۸	۱۱/۹۱	
۱۳	Q-Area-Wind <sub>direction</sub>	۰/۲۵	۰/۹۸	۰/۳۳	۱/۵۲	۱۵/۹۳	
۱۴	Q-Area-Wind <sub>direction</sub>	۰/۵	۰/۹۸	۰/۲۴	۱/۷۸	۲۱/۲۴	
۱۵	Q-Area-Wind <sub>direction</sub>	۰/۷۵	۰/۹۶	۰/۳۴	۲/۳۴	۴۵/۷۵	
۱۶	Q-Area-Wind <sub>direction</sub>	۱	۰/۸۵	۰/۵۹	۴/۲۳	۸/۶۴	

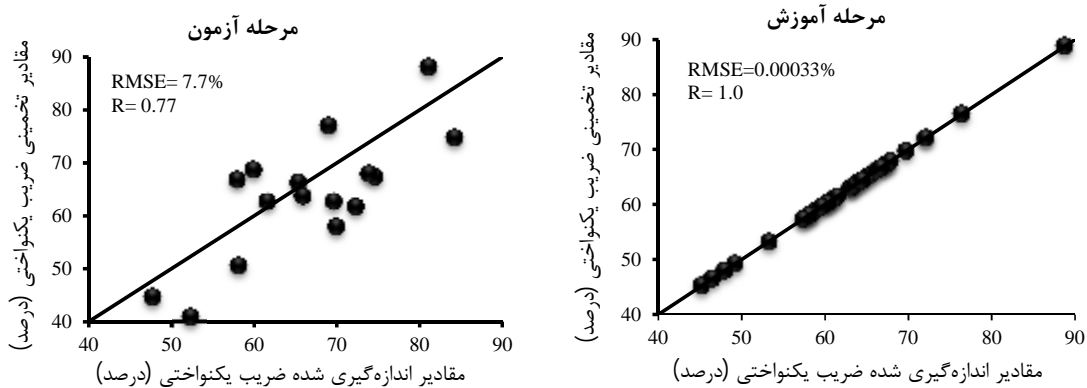
جدول ۳- نتایج آموزش و آزمون داده‌ها با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

ردیف	داده‌های ورودی آموزش و تست	تعداد کرموزوم‌ها	طول هر راس	تعداد ژن‌ها	رنگ پیوند	ضریب همبستگی		ریشه میانگین مربعات خطا (%)	
						آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۳	جمع	۰/۸۲	۰/۴۳	۴/۶۱	۱۰/۱۸
۲	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۳	ضرب	۰/۸۳	۰/۶۸	۴/۴۸	۷/۴۹
۳	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۵	جمع	۰/۸۱	۰/۵۵	۴/۶۸	۸/۴۹
۴	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۵	ضرب	۰/۷۹	۰/۵۸	۴/۹	۸/۵۹
۵	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۳	جمع	۰/۷۹	۰/۴	۵	۹/۴۳
۶	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۳	ضرب	۰/۸	۰/۳۴	۴/۸۷	۹/۷
۷	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۵	جمع	۰/۸۴	۰/۴۱	۴/۳۵	۱۳/۳۹
۸	Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۵	ضرب	۰/۸۳	۰/۶۲	۴/۵۸	۷/۹۱
۹	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۳	جمع	۰/۸۱	۰/۵۱	۴/۷۵	۹/۳۲
۱۰	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۳	ضرب	۰/۷۶	۰/۵۷	۵/۲۵	۸/۵۵
۱۱	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۵	جمع	۰/۸۷	۰/۵۵	۴/۰۴	۹/۰۴
۱۲	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۸	۵	ضرب	۰/۸۲	۰/۵۵	۴/۵۷	۹/۰۴
۱۳	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۳	جمع	۰/۸۱	۰/۶۲	۴/۷	۸/۱۷
۱۴	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۳	ضرب	۰/۸۱	۰/۵۴	۴/۷۱	۹/۱۳
۱۵	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۵	جمع	۰/۸۳	۰/۷۲	۴/۴۵	۷/۱۳
۱۶	Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	۱۵۰	۱۰	۵	ضرب	۰/۸۴	۰/۶	۴/۴۲	۸/۸۴

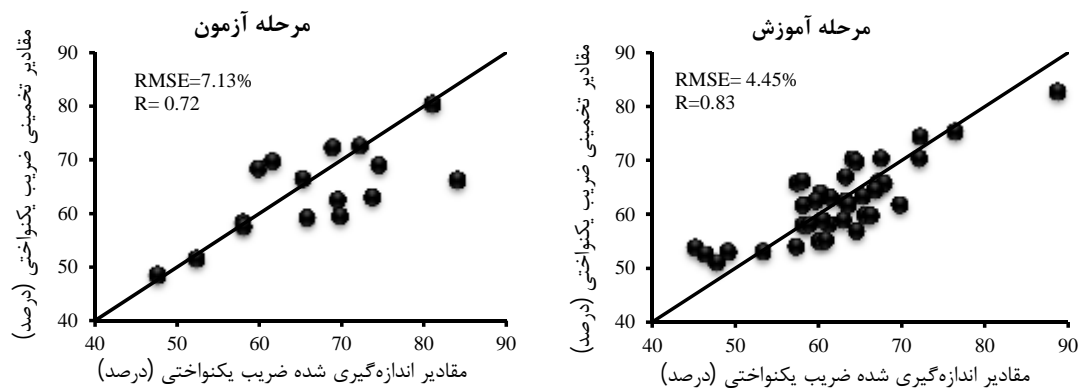
جدول ۴- مقادیر پارامترهای آماری مدل‌های انفیس و برنامه‌ریزی بیان ژن برای بهترین حالت اجرای مدل‌ها

پارامترهای ورودی	مدل	R	RMSE (%)	MAE (%)
Q-Area-RH-T <sub>mean</sub> -Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	ANFIS	۰/۷۷	۷/۷	۶/۹
	GEP	۰/۶۸	۷/۵	۵/۵
Q-Area-Wind <sub>mean</sub> -Wind <sub>direction</sub>	ANFIS	۰/۷۷	۷/۹	۶/۲
	GEP	۰/۷۲	۷/۱	۵/۱





شکل ۳- مقایسه مقادیر ضریب یکنواختی برای مرحله آموزش و آزمون در بهترین حالت اجرای مدل ANFIS



شکل ۴- مقایسه مقادیر ضریب یکنواختی برای مرحله آموزش و آزمون در بهترین حالت اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

## نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف مقایسه و ارزیابی عملکرد سامانه استنتاج فازی- عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن به منظور تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت انجام گرفت.

به همین منظور، تعداد ۵۴ آزمایش ارزیابی سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت انجام شد و اطلاعات به‌دست آمده در مدل‌های هوشمند مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد، روش استنتاج فازی- عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن عملکرد مناسبی در پیش‌بینی ضریب یکنواختی پخش آب با استفاده از داده‌های ورودی، شامل دبی، فواصل آبپاش‌ها، سرعت و جهت باد داشتند. با توجه به اینکه یکی از مزیت‌های مهم مدل GEP ارائه معادله ریاضی برای پیش‌بینی ضریب یکنواختی پخش آب می‌باشد؛ به همین جهت، می‌توان این روش را به‌عنوان گزینه برتر و پیشنهادی در مقایسه با سامانه استنتاج فازی- عصبی معرفی کرد.

## منابع

- آبایی ب. و وردی‌نژاد و. ر. ۱۳۹۲. برآورد عملکرد هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری تحت فشار با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون ناپارامتری. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۴): ۷۶۹-۷۷۹.
- اکبری م. صدراقین س. ح. زارعی ق. و نخجوانی مقدم م. م. ۱۳۹۱. تأثیر سرعت باد و خصوصیات هیدرولیکی بر یکنواختی توزیع آب در آبپاش‌های متداول در آبیاری بارانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱): ۲۱-۳۰.
- رحمت‌آبادی و. بهزاد م. برومندنسب س. و سخایی‌راد ح. ۱۳۸۹. بررسی تلفات تبخیر و باد و ضریب یکنواختی توزیع آبپاش  $ADF^{25}$  در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اسفند ۱۳۸۹، دانشگاه شهید

13. Mansouri R. Torabi H. and Mirshahi D. 2014. Differential evolution algorithm (DE) to estimate the coefficients of uniformity of water distribution in sprinkler irrigation. *Scientific Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(6): 335-342.
14. Maroufpoor E. Faryabi A. Ghamarnia H. and Moshrefi G. Y. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil and Water Research*. 5(4): 139-145.
15. Menezes P. L. Azevedo C. A. V. Eyng E. Neto J. D. and Lima V. L. A. 2015. Artificial neural network model for simulation of water distribution in sprinkle irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 19(9): 817-822.
- چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۸-۱.
۴. سهرابی ت.، علیزاده م.، وردی‌نژاد و.، آبابایی ب.، اوجاقلو ح. و نوری م. ۱۳۸۹. ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری تحت فشار شبکه آبیاری قزوین. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اسفند ۱۳۸۹، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۸-۱.
۵. شیخ اسماعیلی ا.، برومند نسب س. و موسوی جهرمی ح. ۱۳۸۶. بررسی اثرات آرایش و فواصل آبیاری بر یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک. *مجله علمی- پژوهشی علوم کشاورزی*. ۱۳(۲): ۲۹۹-۳۱۰.
۶. قزلباش ز.، ذاکری‌نیا م.، هزارجریبی ا. و دهقانی ا.ا. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۱(۶): ۹۵-۱۱۴.
۷. منتظر ع. ا. ۱۳۸۷. مطالعه اثر سرعت باد فشار کارکرد آبیاری و شیب زمین بر یکنواختی توزیع رطوبت خاک در روش آبیاری بارانی. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*. ۱۵(۲): ۱-۱۲.
۸. هزارجریبی ا.، دهقانی ا.ا.، حسام م. و شریفان ح. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۱۷(۴): ۱۲۹-۱۴۳.
9. Ferreira C. 2001. Gene expression programming a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*. 13(2): 87-129.
10. Ferreira C. 2006. Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence 2nd ed. Springer-Verlag, Germany. 456 p.
11. Fukui Y. Nakanishi K. and Okamura S. 1980. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Science*. 2(1): 23-32.
12. Jang J. S. R. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*. 23(3): 665-685.