

## Simulating of Changes in Water Distribution Uniformity Coefficient in Classic Stationary Sprinkler Irrigation Using Data-Mining Models

Fariborz Ahmadzadeh Kaleybar<sup>1\*</sup>  | Shahram Shahmohammadi Kalalagh<sup>2</sup>  | Sina Fard Moradinia<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Department of Water Sciences and Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran - Sustainable Development Management Research Center of Urmia Lake and Aras River Basin, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Department of Water Sciences and Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Article Info	ABSTRACT
<b>Article type:</b> Research Article	<b>Objective:</b> The lack of water in the world and its heavy consumption in the crop irrigation sector makes it necessary to use different sciences to increase water efficiency. The coefficient of uniform water distribution in sprinkler irrigation systems is one of the important effective indicators in evaluating their performance. Only high values can justify implementing these systems. The purpose of this research is to use support vector machine (SVM) and gene expression programming (GEP) models to simulate the coefficient of uniform water distribution in the farm conditions of Malekan Plain in the northwest of Iran, placed in the catchment area of the Urmia lake is experiencing severe water stress.
<b>Article history:</b> Received 04 Agust 2024 Received in revised form 31 October 2024 Accepted 10 November 2024 Published online 29 January 2024	<b>Methods:</b> Field experiments were carried out on seven farms equipped with a classic stationary sprinkler irrigation system with a movable sprinkler (Komet 162, 163) with variables of sprinkler intervals on laterals and manifolds, operating pressure, and wind speed. Then, uniform distribution coefficient data were obtained. Two models (SVM) and (GEP) were used to simulate the value of the uniformity coefficient. The sensitivity analysis showed that all three variables should be selected as model inputs. 70% and 30% of data were considered for the share of training and test processes, respectively. Using these data, the adjustment parameters of each model were calculated to reach the most optimal output. The evaluation of the performance of the models was done with four indicators: RMSE (sum of square mean error), MAE (mean absolute error), R <sup>2</sup> (explanation coefficient), and DDR (developed difference ratio).
<b>Keywords:</b> Gene expression programming Malekan plain Sensitivity analysis Support vector machine Performanceevaluation	<b>Results:</b> The first rank of simulation accuracy was assigned to the GEP model. The values of the indicators (RMSE, MAE, R <sup>2</sup> ) were obtained in the training and test steps, respectively (3.5087, 2.6827, 0.8634) and (1.1787, 0.9494, 0.9833) for GEP. The values of the evaluation indices (RMSE, MAE, R <sup>2</sup> ) for the most optimal SVM model in the test and training steps were obtained (4.8917, 4.2704, 0.7884) and (2.6790, 2.4113, 0.9185) respectively. In the training step, the value of CU <sub>(DDR(max))</sub> for GEP and SVM models was calculated as 7.0540 and 5.2925 respectively. The value of this index in the test step for these two models was 20.8355 and 9.2863 respectively. The comparison of the value of this index also showed that the GEP model was more accurate than the SVM model. In general, both models can simulate the amount of water distribution uniformity in sprinkler irrigation in field conditions. However, using the GEP model will lead to better results.

\*Corresponding author, Email: [f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir](mailto:f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir)

**Cite this article:** Ahmadzadeh Kaleybar, F., Shahmohammadi Kalalagh, Sh., Fard Moradinia, S (2024). Simulating of Changes in Water Distribution Uniformity Coefficient in Classic Stationary Sprinkler Irrigation Using Data-Mining Models *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*,



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.471274.1100>

Publisher: Gonbad Kavous University.



## شبیه‌سازی تغییرات ضریب یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی

فریبرز احمدزاده کلیبر<sup>۱\*</sup>، شهرام شاه‌محمدی کلالق<sup>۲</sup>، سینا فرد مرادی‌نیا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران - مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه

ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: کمبود آب در جهان و سهم عمده مصرف آن در بخش آبیاری محصولات، ضروری می‌دارد تا از علوم مختلف در جهت افزایش بهره‌وری آب بهره برد. ضریب یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری بارانی، از شاخص‌های مهمی است که در ارزیابی عملکرد آنها موثر بوده‌است و تنها مقادیر زیاد آن می‌تواند اجرای این سامانه‌ها را توجیه‌پذیر کند. هدف از این پژوهش استفاده از مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای شبیه‌سازی ضریب یکنواختی توزیع آب در شرایط مزرعه‌ای دشت ملکان در شمال‌غرب ایران است که در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، دچار تنش آبی سختی است.
برگرفته از طرح پژوهشی	مواد و روش‌ها: آزمایش‌های صحرایی بر روی هفت مزرعه مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک (Komet 162, 163) با متغیرهای فواصل آبپاش روی لترال‌ها و مانیفولد‌ها، فشار کارکرد و سرعت باد انجام شد و داده‌های ضریب یکنواختی توزیع به‌دست آمد. از دو مدل (SVM) و (GEP) برای شبیه‌سازی مقدار ضریب یکنواختی استفاده شد. تحلیل حساسیت نشان داد هر سه متغیر به‌عنوان ورودی‌های مدل‌ها باید انتخاب شود. سهم فرآیندهای آموزش و آزمون از داده‌ها به ترتیب ۷۰ درصد و ۳۰ درصد در نظر گرفته شدند. با استفاده از این داده‌ها، پارامترهای تنظیمی هر یک از مدل‌ها برای رسیدن به بهینه‌ترین خروجی محاسبه شدند. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با چهار شاخص RMSE (مجموع مربعات میانگین خطا)، MAE (میانگین خطای مطلق)، $R^2$ (ضریب تبیین) و DDR (نسبت تفاوت توسعه داده شده) انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴	نتایج: رتبه اول دقت شبیه‌سازی به مدل GEP اختصاص یافت. مقدار شاخص‌های (RMSE, MAE, $R^2$ ) در گام آموزش و آزمون به‌ترتیب (۰/۸۶۳۴، ۲/۶۸۲۷، ۳/۵۰۸۷) و (۰/۹۸۳۳، ۰/۹۴۹۴، ۱/۱۷۸۷) برای GEP به‌دست آمدند. مقدار شاخص‌های ارزیابی (RMSE, MAE, $R^2$ ) برای بهینه‌ترین مدل SVM در گام آموزش و آزمون نیز به‌ترتیب (۰/۷۸۸۴، ۰/۴۲۷۰۴، ۴/۸۹۱۷) و (۰/۹۱۸۵، ۲/۴۱۱۳، ۲/۶۷۹۰) حاصل شدند. در گام آموزش مقدار CU(DDR(max)) برای مدل GEP و SVM به‌ترتیب ۷/۰۵۴۰ و ۵/۲۹۲۵ محاسبه شد. مقدار این شاخص در گام آزمون برای این دو مدل به ترتیب ۲۰/۸۲۵۵ و ۹/۲۸۶۳ بود. مقایسه مقدار این شاخص نیز نشان از دقت بیشتر و بالاتر مدل GEP نسبت به مدل SVM داشت. در مجموع هر دو مدل قدرت شبیه‌سازی مقدار یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با شرایط مزرعه‌ای را دارند، اما استفاده از مدل GEP منجر به نتایج بهتری خواهد شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰	کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی بیان ژن، دشت ملکان، تحلیل حساسیت، ماشین بردار پشتیبان، ارزیابی عملکرد

\*نویسنده مسئول، Email: [f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir](mailto:f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir)

استناد: احمدزاده کلیبر، فریبرز، شاه‌محمدی کلالق، شهرام، فرد مرادی‌نیا، سینا. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی تغییرات ضریب یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری

بارانی کلاسیک ثابت با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.471274.1100>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



## مقدمه

به‌طور متوسط ۷۰ درصد کل مصرف آب در جهان مربوط به آبیاری است (FAO-WWC, 2015). انتظار می‌رود که در سال ۲۰۵۰، آبیاری همچنان مصرف‌کننده اصلی آب در جهان باقی بماند و بیش از نیمی از کل برداشت از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سفره‌های زیرزمینی را شامل شود. بنابراین، اهمیت فزاینده‌ای دارد که مصرف‌کنندگان آب نگران چنین منبع حیاتی باشند و سیستم‌های آبیاری‌ای را به‌کارگیرند که بازدهی آن فراوان باشد (Andrade et al., 2022). هنگامی که آب در زمان و به مقدار مناسب تامین شود، برآورده شدن اهداف آبیاری را تضمین خواهد کرد و اینجا است که یک سیستم آبیاری می‌تواند خود را یک استراتژی موفق نشان دهد (Siqueira et al., 2018; González et al., 2015). راندمان آبیاری را می‌توان به‌عنوان کسری از آب مصرفی توسط آبیاری که توسط محصولات جذب می‌شود، تعریف کرد که یک شاخص خوب برای مدیریت آب و فناوری‌های اخیر در آبیاری است (Wu et al., 2019). چنین بازدهی‌ای نتیجه کارایی کاربرد، توزیع و انتقال آب است (Filgueiras et al., 2020). راندمان توزیع را می‌توان با یکنواختی توزیع بیان کرد که شامل ظرفیت یک سیستم آبیاری برای اعمال مقدار مساوی آب در محیط آبیاری است (Mohamed et al., 2019). یکنواختی توزیع برای انواع مختلف آبیاری نیز تحت تأثیر عوامل مختلف مربوط به هر تکنیک آبیاری است (Andrade et al., 2022). برای سیستم‌های آبیاری بارانی، یکنواختی توزیع از اهمیت زیادی برخوردار است و نه تنها به جنبه‌های مکانیکی آن (سرعت جریان، فشار عملیاتی، فاصله، قطر نازل، و غیره) بلکه به شرایط هواشناسی، به‌ویژه جهت و سرعت باد مربوط می‌شود که برآورد آن اغلب بر اساس ضرایب یکنواختی انجام می‌شود (Faria et al., 2016; Keller and Bliesner, 2000). در میان ضرایب مورد استفاده برای بیان نحوه توزیع آب، اولین مورد را کریستیانسن (۱۹۴۲) پیشنهاد کرد که از انحراف میانگین مطلق به‌عنوان اندازه‌گیری پراکندگی استفاده می‌کند (ضریب یکنواختی کریستیانسن - CU). در سال‌های اخیر، رویکردهای مختلف مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم عصبی فازی بر مبنای شبکه (NF-GP)، سیستم عصبی فازی با خوشه‌بندی تفریقی (NFSC)، ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات (LS-SVM) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی در رشته‌های مختلف مهندسی منابع آب به خوبی توسعه یافته‌اند (Maroufpoor et al., 2019). برخی از این مدل‌ها برای برآورد ضریب یکنواختی در سیستم‌های آبیاری بارانی نیز به‌کار رفته‌اند.

ابراهیمی (۱۳۸۴)، عملکرد ۱۲ سامانه آبیاری بارانی کلاسیک و آبفشان غلطان را در استان خراسان ارزیابی کرد. در این تحقیق حداقل و حداکثر راندمان پتانسیل کاربرد ربع پایین به ترتیب ۴۵ و ۶۷ درصد و حداقل و حداکثر ضریب یکنواختی به ترتیب ۵۳ و ۷۵ درصد گزارش شد. Montazar & Moridnejad (۲۰۰۸)، در ارزیابی تعدادی از سیستم‌های آبیاری بارانی بیله‌سوار دشت مغان از ضرایب یکنواختی Christiansen (1942)، Hart and Reynolds (1965)، ضریب یکنواختی آماری (CUS)، یکنواختی توزیع (DU) و راندمان تخلیه (Ed)، به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی استفاده و گزارش کردند که ضریب یکنواختی رطوبت در داخل خاک به ضریب یکنواختی آب کاربردی بسیار حساس‌تر است تا شیب زمین. آنها همچنین دریافتند که مزارع دارای شیب ملایم‌تر برای بهبود یکنواختی توزیع رطوبت خاک بسیار مناسب‌تر هستند. Kara و همکاران (2008) در تحقیقی دریافتند تأثیر منفی باد بر توزیع آب بر فاصله زیاد بین آبپاش‌ها بستگی دارد و باید این فاصله کاسته شود. Bavi و همکاران (2009)، گزارش کردند که ضریب یکنواختی آب در سامانه‌های آبیاری بارانی قبل از هر چیز به وسیله میزان تلفات تبخیر و باد کنترل می‌شود و بازدهی واقعی آب در ربع پایین معرف بازدهی آب در داخل مزرعه است، که واقعیت عینی دارد. Faryabi و همکاران (2020)، سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک را در دشت دهگلان در استان کردستان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ضریب یکنواختی کریستیانسن، یکنواختی توزیع، راندمان پتانسیل کاربرد و راندمان واقعی کاربرد در ربع پایین به ترتیب ۶۶، ۵۰/۶، ۴۴/۸ و ۴۳/۸ درصد به‌دست آمد. هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰)، مدل الگوریتم ژنتیک را برای تخمین CU در تیمارهای مختلف آبیاری بارانی به‌کار گرفتند. با توجه به شاخص‌های آماری بهترین مدل تخمین CU با کمترین خطا ( $R^2=0/92$  و  $RMSE=3/57$ ) معرفی گردید. 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 ساده‌سازی مدل‌های پیچیده هیدرولیکی با جایگزینی کل یا بخشی از این مدل‌ها با مدل‌های ساده‌تر آماری و شبکه عصبی وجود دارد و این مسأله با توجه به پیچیدگی مدل‌های هیدرولیکی، به‌ویژه در فرایند بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. منصوری و همکاران (۱۳۹۳)، مقادیر ضریب CU را در تیمارهای مختلف با الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) با نرم‌افزار متلب مدل‌سازی کردند و رابطه‌ای با بهینه‌ترین ضرایب برای تخمین مقدار CU به‌دست آوردند. نتایج این الگوریتم دارای خطای مطلق ۲/۲ درصد با نتایج اندازه‌گیری شده دارد. قزلباش و همکاران (۱۳۹۷) پژوهشی باهدف بررسی عملکرد مدل درختی M5 در برآورد CU، انجام دادند و نتایج حاصل با عملکرد مدل K-NN را مقایسه کردند. نتایج بیانگر دقت مناسب هر دو روش در مدل‌سازی بود. از آنجایی که مدل M5 قادر به ارائه روابطی صریح برای تخمین ضریب یکنواختی است، جنبه کاربردی بیشتری دارد. رستم‌لو و همکاران (۱۳۹۷) عملکرد سامانه استنتاج فازی-عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن را به‌منظور تخمین ضریب یکنواختی پخش آب در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در شرایط مختلف از نظر سرعت باد، آرایش آبپاش‌ها، دبی و نوع آبپاش‌ها ارزیابی و مقایسه کردند. کمترین مقدار میانگین خطای مطلق برای روش‌های استنتاج فازی و بیان ژن به ترتیب ۶/۲ و ۵/۱ درصد و بیشترین مقادیر ضریب همبستگی برای روش‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۲ به‌دست آمد. قلیچ و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی، مقادیر ضریب یکنواختی آبپاش zb ساخت ایران را در ۳ تیمار مختلف فشار کارکرد آبپاش، ۲ تیمار ارتفاع پایه آبپاش و ۷ تیمار آرایش شبکه آبپاشها (SI×Sm) با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه تحقیقات پنبه هاشم‌آباد گرگان با الگوریتم PSO شبیه‌سازی کردند. با توجه به RMSE و انحراف معیار مقادیر تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده حاصل از محاسبات الگوریتم PSO معادله‌ای به‌عنوان مدل نهایی تخمین ضریب یکنواختی استخراج گردید. کاظمی و همکاران (۱۳۹۸)، براساس نتایج مطالعه خود در اقلید فارس دریافتند، می‌توان با کاهش فواصل آبپاش‌ها، تنظیم فشار و عدم استفاده از تعداد زیاد آبپاش به‌طور همزمان، یکنواختی توزیع را افزایش داد. Rather & Baba (2018)، در تحقیق خود تحت عنوان ارزیابی عملکرد سیستم آبیاری بارانی در دشت گندربال هند به‌تأثیر پارامترهای مختلف روی ضریب یکنواختی پخش پرداختند و نتیجه گرفتند ارتفاع ریزر و تغییرات فشار بیشترین تأثیر را روی یکنواختی پخش آبپاش‌ها دارد و سرعت باد به‌دلیل کم بودن آن در منطقه تأثیر چندانی روی ضریب یکنواختی پخش ندارد. Ngasoh et al. (2018)، ارزیابی اثرات سیستم آبیاری بارانی را در ایالت تارابای نیجریه بر روی مزارع چای انجام دادند. نتایج، زمانی که دبی آبپاش ۱/۲ لیتر بر ثانیه و شدت پخش آن ۷/۵ میلی متر در ساعت بود، مقدار CU را ۹۰/۹ درصد و DPR را ۰/۷۹ نشان داد. مقایسه مقادیر IP نیز از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ روند خوب عملکرد سیستم آبیاری را نشان داد. Faryabi et al. (2020)، در مطالعه‌ای ارتفاع پایه آبپاش، فشار کارکرد و فواصل آبپاش‌ها را از عوامل مهم سامانه آبیاری در یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی دانسته‌اند. Issaka et al. (2019)، با مقایسه عملکرد آبپاش‌های ضربه‌ای و چرخ‌دنده‌ای با استفاده از شبیه‌سازی توزیع آب به کمک برنامه Matlab نشان دادند که آبپاش‌های ضربه‌ای از منظر پایداری چرخش و توزیع آب، عملکرد بسیار بهتری نسبت به آبپاش‌های چرخ‌دنده‌ای دارند. آبپاش‌های ضربه‌ای دارای حرکت متناوب و آبپاش‌های چرخ‌دنده‌ای دارای حرکت پیوسته‌اند. براتی و همکاران (۱۴۰۱)، ارزیابی سیستم آبیاری بارانی سنتریپوت را انجام دادند که در آن ضریب یکنواختی در عبور دستگاه به‌صورت شعاعی و با سرعت ۱۰ و ۶۰ درصد، به ترتیب ۸۰/۳ و ۷۶/۴ درصد و یکنواختی توزیع آب به ترتیب ۷۲/۶ و ۶۵/۵ درصد به‌دست آمد. همچنین آزمایش ضریب یکنواختی در جهت عمودی در دو سرعت مذکور به ترتیب ۶۱/۱ و ۵۹/۳ درصد به‌دست آمد. کریمی و همکاران (۱۴۰۱) مطالعه‌ای برای بررسی اثر برخی عوامل بر یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان انجام دادند و نتیجه گرفتند اثر فشار کارکرد و فواصل آبپاش‌ها در دو سرعت باد کم و ملایم بر CU، معنی‌دار است و اثر آرایش آبپاش‌ها و ارتفاع پایه آبپاش معنی‌دار نیست. احمدزاده کلیر و امامی‌فر (۱۴۰۲)، مقادیر متوسط معیارهای ضریب یکنواختی کرسٹیانس (CU)، یکنواختی توزیع (DU)، راندمان پتانسیل کاربرد ربع پایین (PELQ) و راندمان واقعی کاربرد ربع پایین (AELQ) برای بلوک‌های آزمایشی در دشت ارسباران را به ترتیب برابر ۶۸/۸۶، ۵۲/۸۹، ۴۷/۹۳ و ۴۷/۷۳ درصد به‌دست

آوردند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مرور منابع کاربرد مدل‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی یکنواختی توزیع آبیاری بارانی ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه مرور منابع کاربرد مدل‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی یکنواختی توزیع آبیاری بارانی

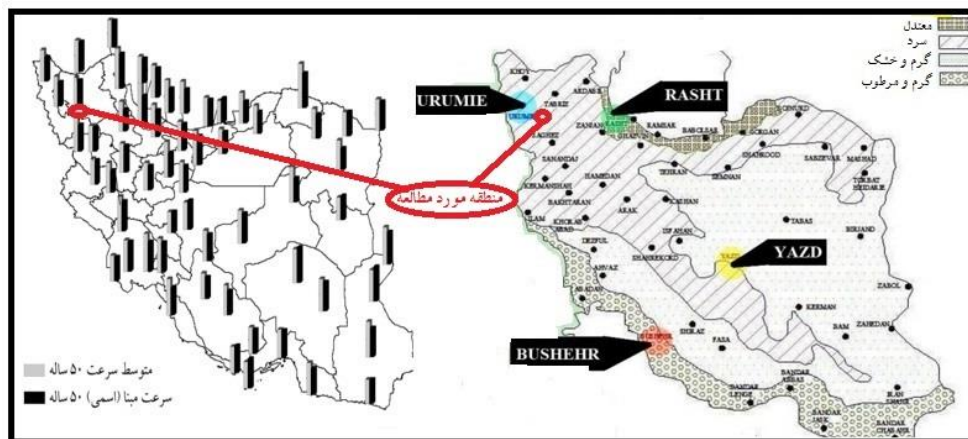
منبع	مدل‌های مورد استفاده	نتیجه
هزارجیبی و همکاران (۱۳۹۰)	الگوریتم ژنتیک	معرفی بهترین مدل تخمین $CU$ با کمترین خطا $R^2=0/92$ و $(RMSE=3/57)$
منصوری و همکاران (۱۳۹۳)	الگوریتم تکامل تفاضلی ( $DE$ )	معرفی رابطه‌ای با بهینه‌ترین ضرایب برای تخمین مقدار $CU$ با خطای مطلق ۲/۲ درصد
قزلباش و همکاران (۱۳۹۷)	مدل درختی $M5$ و مدل $K-NN$	تایید دقت مناسب هر دو روش در مدل‌سازی با جنبه کاربردی بیشتر برای مدل $M5$
رستم‌لو و همکاران (۱۳۹۷)	استنتاج فازی- عصبی و برنامه-ریزی بیان ژن	محاسبه میانگین خطای مطلق برای استنتاج فازی و بیان ژن بترتیب ۶/۲ و ۵/۱ درصد و ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۲
قلیچ و همکاران (۱۳۹۸)	الگوریتم $PSO$	استخراج معادله نهایی الگوریتم $PSO$ برای تخمین ضریب یکنواختی
معروف‌پور و همکاران (۲۰۱۹)	$NF-SC, NF-GP, ANN, SVM-LS, GEP$	تمامی مدل‌ها قابلیت خوبی در برآورد $CU$ ارائه کردند. شاخص درستی (قطر نازل بزرگ) کمترین تأثیر را در مدل‌سازی $CU$ دارد.

با توجه به اهمیت موضوع و از آنجاکه مطالعات محدودی در مورد کاربرد مدل‌های داده‌کاوی در تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در مزارع آبیاری بارانی انجام یافته‌است، مطالعه حاضر به بررسی کارایی کاربرد مدل‌های  $SVM$  و  $GEP$  برای تعیین یکنواختی توزیع آب برای سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک در اراضی تجهیز شده در دشت ملکان می‌پردازد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شهرستان ملکان یکی از شهرستان‌های جنوب غربی استان آذربایجان شرقی در مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۹ دقیقه شمالی و ۴۶ درجه و ۶ دقیقه شرقی قرار گرفته‌است. ملکان در جنوب شرق دریاچه ارومیه و در محل اتصال استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی و در ۱۵۰ کیلومتری جنوب تبریز واقع شده‌است. شهرستان ملکان با وسعت ۱۰۰۷ کیلومتر مربع حدود ۲/۲ درصد از مساحت استان را تشکیل می‌دهد. محدودیت شدید منابع آب و خطر خشک شدن دریاچه ارومیه، لزوم افزایش راندمان آبیاری در دشت ملکان را دوچندان کرده و دولت را مجاب به توسعه سیستم‌های آبیاری بارانی و جایگزینی آن با آبیاری‌های سنتی نموده‌است به طوری که سالانه هزینه‌های زیادی با عنوان یارانه دولتی صرف این پروژه‌ها می‌گردد. تداوم روند خشکی دریاچه ارومیه و تالاب‌های پیرامون آن در دهه گذشته، نشان‌گر نبود تعادل منابع و مصارف آب در چند دهه پیشین و گسترش مرز خشکیدگی در دشت‌های سبز پیرامون دریاچه و به سمت نواحی بالادست حوضه در آینده است (حاجی‌تلخابی و همکاران، ۱۴۰۲). شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان آذربایجان شرقی را نشان می‌دهد. شکل (۲) نیز زون‌بندی دمایی و میزان سرعت باد در ایستگاه‌های مختلف کشور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نقشه‌های زون‌بندی دمايي و باد ايران و موقعیت منطقه مورد مطالعه در آن

### اندازه‌گیری مزرعه‌ای

برای اجرای مدل‌های یادگیری ماشین روی داده‌های ضریب یکنواختی توزیع آب، از ۷۰ داده صحرایی اندازه‌گیری شده استفاده شده است که سهم مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد است. از اعداد اختصاص داده شده برای گام‌های آموزش و آزمون برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی هر یک از مدل‌ها استفاده شده است.

به منظور اندازه‌گیری یکنواختی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت اجرا شده در دشت ملکان، تعداد هفت مزرعه از لیست طرح‌های اجرا شده با یارانه دولتی توسط مدیریت آب و خاک سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی که با آبپاش Komet 162-163 (با دبی و فشار کارکرد استاندارد ۱/۹۳ لیتر بر ثانیه و ۴ اتمسفر) و با هفت فاصله متفاوت آبپاش‌ها (۲۵ \* ۲۵، ۲۵ \* ۲۰، ۲۲ \* ۲۲، ۲۰ \* ۲۰، ۲۰ \* ۱۵، ۱۸ \* ۱۸ و ۱۵ \* ۱۵ متر در متر) طراحی شده بود و حداقل یک فصل زراعی از بهره‌برداری آن‌ها سپری گردیده بود، انتخاب شد و در دو شرایط سرعت باد کم و متوسط و پنج فشار کارکرد متفاوت آزمایش شدند. وابستگی شدید یکنواختی توزیع به این متغیرها طبق مطالعات پیشین (Merriam & Keller, 1978; Maroufpoor et al., 2019; Ngasoh et al., 2018) و ثابت بودن ارتفاع پایه آبپاش‌ها و قطر نازل‌ها در بیشتر طرح‌های اجرا شده با یارانه دولتی در این دشت، علت انتخاب این متغیرها بود.

در مجموع ۷۰ تیمار با شرایط متفاوت استخراج و برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش از روش استفاده از یک لوله فرعی برای برآورد ضریب یکنواختی استفاده شد (Christiansen, 1942). برای ارزیابی سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت تعدادی قوطی در فاصله بین سه آبپاش در شبکه مربعی ۳\*۳ متوالی چیده شد، به طوری که آبپاش مورد آزمایش در مرکز شبکه قوطی‌ها قرار گرفت و قوطی‌ها در دو طرف این آبپاش تا آبپاش مجاور چیده شدند (Lemeister et al., 2007). قوطی‌ها استوانه‌ای شکل به قطر ۱۴ و ارتفاع ۹/۵ سانتیمتر بودند. بعد از گذشت یک و نیم ساعت از کارکرد آبپاش‌ها (Montazar & Moridnejad, 2008) بلافاصله حجم آب داخل قوطی‌ها با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری و یادداشت شد. تعدادی از قوطی‌ها (دو یا سه قوطی) که در ابتدای شروع آزمایش دارای حجم مشخصی از آب بود (تقریباً برابر با حجم میانگین آبی که انتظار می‌رفت در داخل قوطی‌ها جمع شود) دور از آبپاش‌ها، برای تخمین میزان تبخیر در مزرعه قرار داده شد و در انتهای آزمایش نیز حجم آب باقی‌مانده در آن‌ها اندازه‌گیری شد (Tarjuelo et al., 1999). اندازه‌گیری دبی آبپاش با روش حجمی با استفاده از یک گالن ۲۰ لیتری مدرج، دو قطعه شلنگ با قطرهای اندکی بزرگتر (برای سهولت اتصال شلنگ‌ها به نازل‌ها) از نازل‌های آبپاش به طول ۲ متر و کرونومتر انجام یافت. برای ثبت فشار در آبپاش در حال کار، در شیرخودکار بعدی، رایزر با یک فشارسنج نصب و فشار به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شد. تنظیم فشار از داخل ایستگاه پمپاژ و با شیرهای بای‌پس انجام می‌گرفت. پس از انجام

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، شرایط واقعی کارکرد و هم‌پوشانی آبیاری‌ها شبیه‌سازی شد و یکنواختی توزیع به‌صورت جداگانه برای هر بلوک آزمایشی با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید (Merriam & Keller, 1978).

$$CU_t = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})}{N \times \bar{D}} \right] \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه  $CU_t$  ضریب یکنواختی کریستیانسن (بر حسب درصد)،  $D_i$  عمق آب در هر یک از قوطی‌های جمع‌آوری (بر حسب میلیمتر)،  $\bar{D}$  متوسط عمق‌های آب جمع شده در قوطی‌ها (بر حسب میلیمتر) و  $N$  تعداد کل قوطی‌ها هستند. جدول (۲) نتایج محاسبات ضریب یکنواختی کریستیانسن را برای مزارع آزمایشی و سیستم‌های آبیاری مربوط نشان می‌دهد.

جدول ۲- ضریب یکنواختی کریستیانسن با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای برای مزارع آزمایشی

فشار (اتمسفر)	سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه)	فواصل آبیاری بر حسب متر (Sm*SI)						
		۱۵*۱۵	۱۸*۱۸	۱۵*۲۰	۲۰*۲۰	۲۲*۲۲	۲۵*۲۰	۲۵*۲۵
۲/۵	(۰-۱/۸)۰/۹۰	۷۸	۶۸	۷۰	۶۴	۶۰	۶۲	۵۷
	(۱/۸-۴/۵)۳/۱۵	۷۰	۶۵	۶۶	۵۸	۵۶	۵۴	۴۷
۳/۰	(۰-۱/۸)۰/۹۰	۸۱	۶۷	۷۳	۶۵	۶۶	۶۴	۶۰
	(۱/۸-۴/۵)۳/۱۵	۸۴	۷۶	۶۳	۶۰	۶۵	۶۱	۵۶
۳/۵	(۰-۱/۸)۰/۹۰	۸۳	۶۵	۶۹	۶۲	۵۶	۵۲	۵۳
	(۱/۸-۴/۵)۳/۱۵	۷۲	۶۹	۵۸	۵۸	۵۱	۴۶	۴۵
۴/۰	(۰-۱/۸)۰/۹۰	۷۶	۷۲	۷۳	۶۴	۵۸	۵۹	۵۴
	(۱/۸-۴/۵)۳/۱۵	۷۴	۶۹	۶۶	۶۲	۵۱	۵۲	۴۹
۴/۵	(۰-۱/۸)۰/۹۰	۷۳	۶۳	۶۱	۵۹	۵۷	۵۷	۴۲
	(۱/۸-۴/۵)۳/۱۵	۶۸	۵۲	۵۸	۵۲	۵۳	۵۱	۴۷

#### مدل‌های داده‌کاوی

#### مروری بر مدل SVM

مدل SVM نوعی سیستم یادگیری برای طبقه‌بندی، پیش‌بینی و برآورد تابع برازش داده‌ها است تا کمترین خطا در گروه‌بندی یا تابع برازش حاصل شود. در این مدل، مانند دیگر روش‌های رگرسیونی رابطه‌ای مانند

$$f(x) = W^T \cdot \Phi(x) + b \quad (2)$$

شکل می‌گیرد که مقدار متغیر وابسته به صورت حاصل جمع معادله (۱) و مقداری نویز به فرم

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (3)$$

ارائه می‌شود. در این معادله‌ها  $w$  (بردار ضرایب) و  $b$  (مقدار ثابت) پارامترهای تابع رگرسیونی و  $\Phi$  تابع هسته است. بهینه‌سازی با استفاده از به حداقل رساندن معادله (۳) تحت شرایط بیان شده در معادله (۴) انجام می‌شود:

$$\text{Min} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i - \xi_i^0) \quad (4)$$

$$\begin{cases} W^T \cdot \phi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^0 \\ y_i - W^T \cdot \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i, \xi_i^0 \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

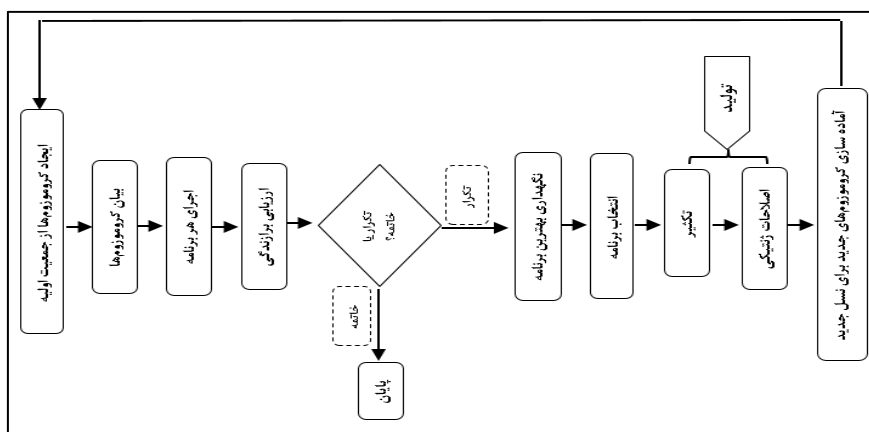
مقدار C در معادله (۴) به عنوان فاکتور تعیین جریمه در زمان وقوع خطای آموزش مدل با مقدار مثبت،  $\xi_i$  و  $\xi_i^0$  متغیرهای کمبود (حد بالا و پایین خطای آموزش مرتبط با مقدار خطای مجاز  $\epsilon$ ) و N تعداد نمونه‌ها هستند. اگر صفحه جداکننده داده‌ها، غیرخطی باشد، به کمک شیوه‌ای به نام ترفند کرنل، یک تابع عمومی‌تر مانند  $K(x_i, x_j)$  تعریف می‌شود که به وسیله آن می‌توان به فضاهای پیچیده‌تر راه یافت. انواع مختلف تابع کرنل در جدول (۳) نشان داده شده است (فولادی پناه و همکاران، ۱۳۹۸).

جدول ۳- انواع توابع کرنل

رابطه کرنل	نام کرنل
$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$	خطی
$K(x_i, x_j) = [(x_i, x_j) + 1]^d$	چند جمله‌ای
$K(x_i, x_j) = \exp\left[-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}\right]$	گوسین
$K(x_i, x_j) = \tanh[-\alpha(x_i, x_j) + c]$	سیگموئید

### مروری بر مدل GEP

این مدل در گروه مدل‌های مبتنی بر نظریه تکاملی داروین قرار می‌گیرد که تابع هدف براساس معیارهای کیفی تعریف می‌شود. تابع هدف به منظور مقایسه جواب‌های مختلف مسأله در قالب فرآیند گام‌به‌گام تصحیح ساختار داده‌ها برای دستیابی به جواب بهینه به کار گرفته می‌شود. برای این منظور، کدگذاری افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (ژنوم یا کروموزوم) انجام می‌شود و آنها به فرم نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف (بیان درختی) نمایش داده می‌شوند. انتظار از این روند با تکرار برای چند نسل و با پیشروی نسل به جلو، بهبود کیفیت جمعیت است. مراحل پنجگانه انجام مدل GEP به قرار زیر است: (۱) تعیین تابع برازش؛ (۲) انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها؛ (۳) انتخاب ساختار کروموزوم‌ها؛ (۴) انتخاب تابع پیوند؛ (۵) انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنها. فلوجارت مدل GEP در شکل نشان داده شده است (احمدزاده کلیبر و فولادی پناه، ۱۴۰۲).



شکل ۲- روندنمای مدل GEP

### آزمون گاما (GT)

در این فرآیند با استفاده از محاسبه آماره گاما ( $\Gamma$ )، برآوردی از بهترین مقدار میانگین مربعات خطا روی خروجی مدل انجام می‌شود. اگر  $x$  به عنوان برداری از فضای  $R_m$  و مقدار  $y$  به عنوان خروجی از فضای  $R$  فرض شوند و همچنین فرض بر این باشد که بردارهای  $x$  قابلیت پیشگویی فاکتورهای مورد استفاده مؤثر در خروجی  $y$  را داشته باشند، در این صورت مطابق تنها فرض باقی‌مانده تحت روابط سیستم کنترل، رابطه زیر دنبال خواهد شد.

$$y=f(x_1, \dots, x_m)+r \quad (6)$$

که در این معادله  $f$  یک تابع نرم و  $r$  یک متغیر تصادفی است که نشان‌دهنده مقدارهای اغتشاش است. آماره  $\Gamma$  از قسمتی از واریانس خروجی که نمی‌تواند برای یک مدل نرم محاسبه شود، به دست می‌آید. فرض می‌شود  $X \sim N[I, k]$  در بازه  $1 \leq i \leq M$  به ازای  $1 \leq k \leq p$  بیانگر  $k$ امین همسایه نزدیک در یک فاصله اقلیدسی باشد. مقدار  $p$  ثابت و محدود است و تقریباً برابر با ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. در این صورت الگوریتم آزمون گاما مقدار زیر را محاسبه می‌کند (Noori et al., 2013):

$$\delta_M(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |x_{N[N, k]} - x_i|^2 \quad (7)$$

که در این معادله  $| \cdot |$  بیانگر فاصله اقلیدسی است و در تابع

$$\gamma_M(k) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (y_{N[i, k]} - y_i)^2 \quad (8)$$

عبارت  $Y_N[I, k]$  مقدار خروجی متناظر با مقدار  $X_N[I, k]$  و مقدار  $\Gamma$  در واقع عرض از مبدا خط برازش یافته معادله (۹) خواهد بود.

$$\gamma_M(k) = \Gamma + A \delta_M(k) \quad (9)$$

حال اگر فرض شود  $N$  متغیر ورودی بر روی پدیده‌ای موثر باشند، می‌توان  $2N-1$  حالت برای ساخت مدل بین ورودی-خروجی به دست آورد که یافتن مدل برتر و بهینه بسیار وقت‌گیر خواهد بود. آزمون  $\Gamma$  می‌تواند برای یافتن برترین ترکیب خروجی برای دستیابی به بهینه‌ترین مدل برتر مورد استفاده قرار گیرد.

برای انجام  $\Gamma$ -test به منظور تحلیل حساسیت، نرم‌افزار WinGamma به کار گرفته شده است. مقادیر کم خطای استاندارد، مقدار پارامتر  $\Gamma$  و پارامتر  $V$ -Ratio بر ترکیب ورودی‌های مستقل بهینه برای دستیابی به مقدار ضریب یکنواختی دلالت خواهد داشت. متغیرهای مستقل مورد آزمایش در این پژوهش شامل فشار ( $P$ )، سرعت متوسط باد ( $V$ ) و فاصله آبی‌اش‌ها ( $S$ ) هستند. رقم‌های ۰ و ۱ به ترتیب برای شمول و عدم شمول هر یک از سه متغیر مستقل فوق در حساسیت‌سنجی برای محاسبه ضریب یکنواختی دارد. ترتیب معرفی پارامترهای مستقل برای تحلیل حساسیت به فرم PVS است. برای مثال ترکیب «۱۱۱» به معنی اعمال هر سه پارامتر و ترکیب «۰۱۱» به معنی عدم اعمال  $P$  در فرآیند حساسیت‌سنجی است. در جدول نتیجه تحلیل حساسیت متغیرهای مستقل PVS روی ضریب یکنواختی ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است ترکیب ردیف اول، یعنی «۱۱۱» کمترین مقادیر خطای استاندارد، مقدار پارامتر  $\Gamma$  و پارامتر  $V$ -Ratio را به خود اختصاص داده است. بنابراین در استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای مدل‌سازی با مدل‌های یادگیری ماشین، هر سه پارامتر به عنوان ورودی مدل‌ها باید مورد استفاده قرار گیرند (Noori et al., 2013).

جدول ۴- نتیجه آنالیز حساسیت با استفاده از  $\Gamma$ -test

V-ratio	خطای استاندارد	گاما	نام ترکیب	ردیف
۰/۲۳۵۶	۵/۴۰۹۹	۲۹/۳۹۲۱	۱۱۱	۱
۰/۳۷۵۴	۸/۷۳۵۵	۳۲/۸۷۶۴	۰۱۱	۲
۰/۳۸۸۴	۶/۲۰۷۳	۳۴/۰۱۹۱	۱۰۱	۳
۰/۹۳۱۷	۷/۶۸۰۰	۸۱/۶۰۴۲	۱۱۰	۴
۰/۳۱۹۶	۸/۲۶۸۰	۳۷/۹۸۸۸	۰۰۱	۵
۰/۹۳۴۴	۸/۵۵۴۲	۸۱/۸۴۴۸	۱۰۰	۶
۱/۲۵۳۴	۹/۱۲۵۸	۸۷/۵۸۷۱	۰۱۰	۷

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد

سه شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین اختلاف خطا (MAE) و آماره نسبت تفاوت توسعه یافته (DDR) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفتند (احمدزاده کلیبر و فولادی‌پناه، ۱۴۰۲):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{oi} - x_{pi})^2}{N}} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{N(\sum_{i=1}^N x_{oi}x_{pi}) - \sum_{i=1}^N x_{oi} \sum_{i=1}^N x_{pi}}{\sqrt{[N \sum_{i=1}^N x_{oi}^2 - (\sum_{i=1}^N x_{oi})^2][N \sum_{i=1}^N x_{pi}^2 - (\sum_{i=1}^N x_{pi})^2]}} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (12)$$

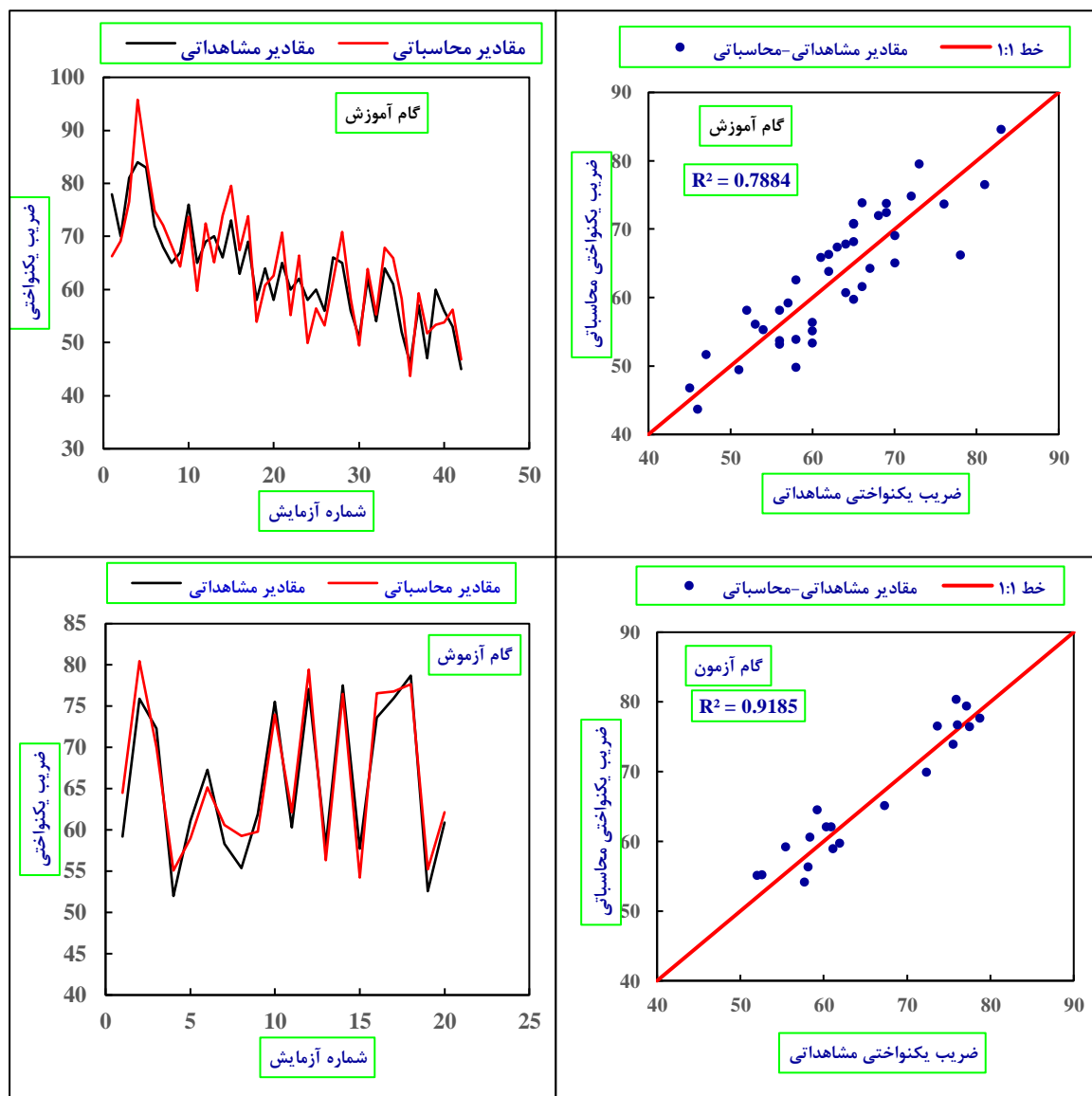
$$DDR = \frac{x_p}{x_o} - 1 \quad (13)$$

که در این روابط  $x_p$  و  $x_o$  به ترتیب داده‌های مشاهداتی و محاسباتی،  $\bar{x}_p$  و  $\bar{x}_o$  به ترتیب مقادیر متوسط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی هستند. ضریب تعیین  $R^2$  قدرت توضیح‌دهندگی مدل را نشان می‌دهد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. مقدار این شاخص بین صفر تا یک است و اگر از مقدار  $0/6$  بیشتر باشد، نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. شاخص  $RMSE$  یکی از شاخص‌های اصلی نیکویی برازش در مدل معادلات ساختاری است که در بیشتر تحلیل‌های عاملی تأییدی و مدل‌های معادلات ساختاری استفاده می‌شود. مقدار شاخص  $RMSE$  کمتر از  $0/1$  بیانگر برازندگی بسیار عالی مدل، محدوده بین  $0/1$  تا  $0/5$  نشان‌دهنده برازندگی خوب مدل و محدوده بین  $0/5$  تا  $0/8$  بیانگر برازندگی متوسط مدل است. با توجه به اینکه شاخص‌های معادله‌های (۱۰) تا (۱۲) بیانگر متوسط خطا هستند و قضاوت درستی در مورد توزیع خطاها ارائه نمی‌دهند، استفاده از آماره  $DDR$  را پیشنهاد داده‌اند. برای مشاهده توزیع خطاها و داوری بهتر در مورد عملکرد مدل پیش‌بینی‌کننده، محاسبه تابع گوسی مقادیر  $DDR$  به صورت رسم توزیع نرمال استاندارد (منحنی  $Z_{DDR} - X_{DDR}$ ) انجام می‌شود. در مقام مقایسه بین عملکرد دو مدل، هر چه مقدار بیشینه نرمال استاندارد شده متغیر وابسته ( $X_{DDR}$ ) بالاتر و منحنی  $Z_{DDR} - X_{DDR}$  مربوط به آن مدل به سمت محور عمودی متمایل باشد نشان از عملکرد بهتر آن مدل خواهد داشت (Noori et al., 2010).

## نتایج و بحث

### نتایج مدل SVM

برای دستیابی به بهینه‌ترین مقدار خروجی برای مدل SVM، برای توابع مختلف کرنل، مقادیر مختلف پارامترهای تنظیمی  $\gamma$ ،  $\epsilon$  و  $C$  مورد استفاده قرار گرفت و مقدار شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای هر کدام از آنها در هر مرحله تعیین شد. نتایج حاصل از این تحلیل، نشان داد بهینه‌ترین مقدار خروجی مدل SVM به ازای پارامترهای تنظیمی  $\gamma=0/25$ ،  $C=50$  و  $\epsilon=0/1$  برای تابع کرنل RBF حاصل شده است. مقدار شاخص‌های ارزیابی ( $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $R^2$ ) برای بهینه‌ترین مدل SVM در گام آموزش و آزمون به ترتیب  $(0/7884, 4/2704, 4/8917)$  و  $(0/9185, 2/4113, 2/6790)$  حاصل شده‌اند. بیان گرافیکی از میزان انطباق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی ضریب یکنواختی در مدل SVM در گام‌های آموزش و آزمون در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل، خط ۱:۱ نشان‌دهنده ایده‌آل‌ترین خروجی است. هر چه مقدار پراکندگی داده‌ها از این خط بیشتر باشد، نشان‌دهنده آن است که خروجی مدل از دقت کمتری برخوردار است. همان‌طور که مشخص است، انطباق مناسبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در خروجی مدل SVM وجود دارد. با گذر از مرحله آموزش به آزمون، مقادیر شاخص‌های کیفی در جهت بهبود تغییر کرده‌اند، به طوری که مقدار ضریب تبیین افزایش و مقدار دو شاخص  $RMSE$  و  $MAE$  کاهش یافته‌اند که حاکی از انجام صحیح فرآیندهای آموزش و آزمون در راستای تعیین مقادیر پارامترهای تنظیمی مدل است.



شکل ۱- میزان انطباق پذیری داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در مدل بهینه SVM

### نتایج مدل GEP

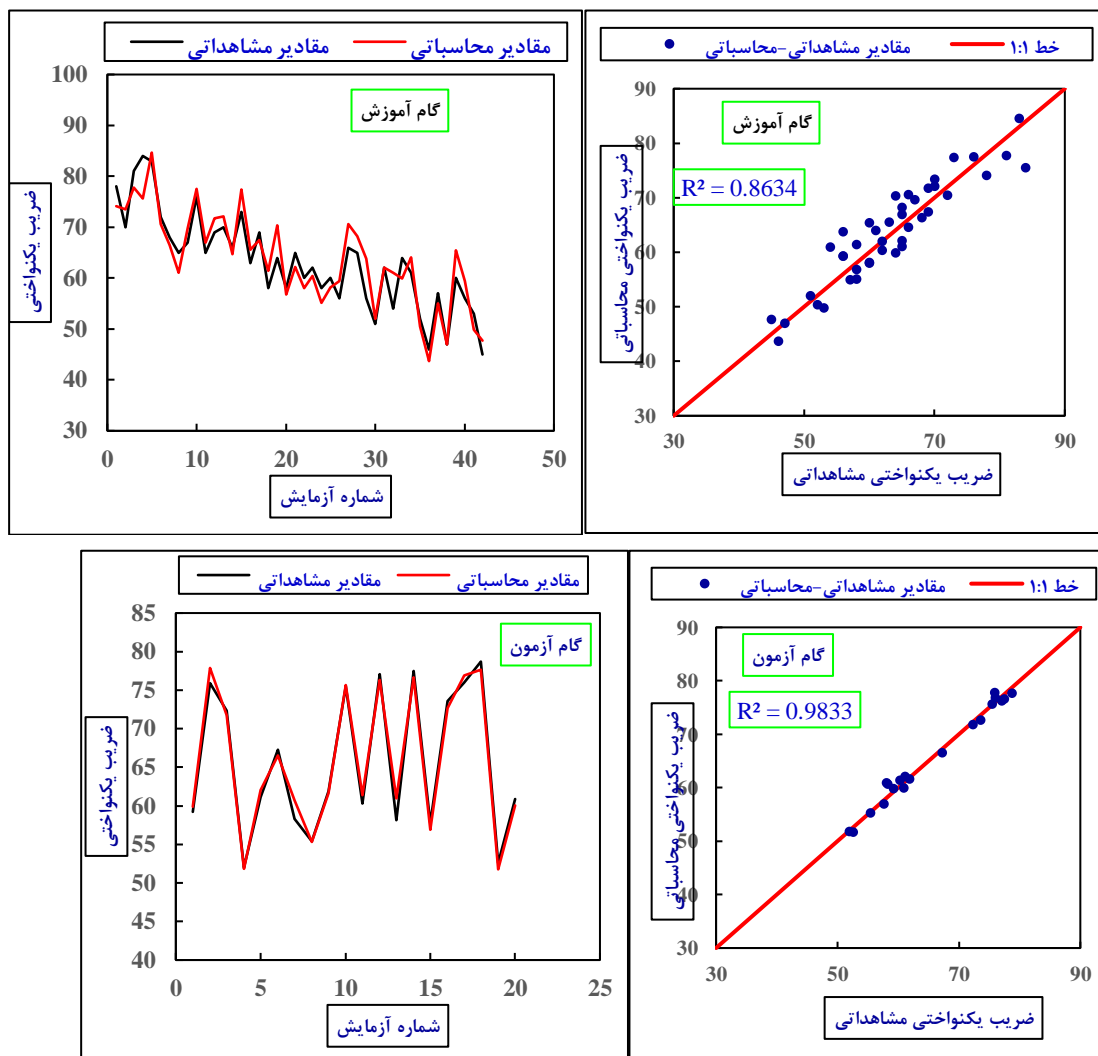
برای تعیین بهینه‌ترین خروجی مدل GEP، با استفاده از روش آزمون و خطا مقادیر مختلف پارامترهای تنظیمی لحاظ و مناسب-ترین مقدار شاخص‌های ارزیابی عملکرد ( $R^2$ , MAE, RMSE) در گام‌های آموزش و آزمون تعیین شدند. اندازه سر، تعداد کروموزوم، تعداد ژن در هر کروموزوم، تابع پیوند و انتخاب نوع عملوندهای بین متغیرهای مستقل ورودی به عنوان پارامترهای تنظیمی مدل GEP با استفاده از روش آزمون و خطا برای دستیابی به مدل بهینه مدنظر هستند.

جدول مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی مدل GEP را نشان می‌دهد. مقدار شاخص‌های ( $R^2$ , MAE, RMSE) در گام آموزش و آزمون به ترتیب (۰/۸۶۳۴، ۲/۶۸۲۷، ۳/۵۰۸۷) و (۰/۹۸۳۳، ۰/۹۴۹۴، ۱/۱۷۸۷) به دست آمده‌اند. نحوه انطباق بین داده‌ها در فازهای آموزش و آزمون در

شکل ۴ نمایش داده شده است. بهبود مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد از گام آموزش به آزمون نشان از صحت انتخاب پارامترهای تنظیمی مدل است.

جدول ۵-مقادیر پارامترهای تنظیمی مدل GEP بعد از بهینه‌سازی

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	اندازه رأس	۹
۲	تعداد کروموزوم	۴۳
۳	تعداد ژن در هر کروموزوم	۳
۴	تابع پیوند	ضرب (x)
۵	نرخ جهش	۰/۰۴۴
۶	نرخ وارون‌سازی	۰/۱
۷	نرخ ترانسپس درج متوالی	۰/۱
۸	نرخ ترانسپس ریشه درج متولی	۰/۱
۹	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	۰/۳

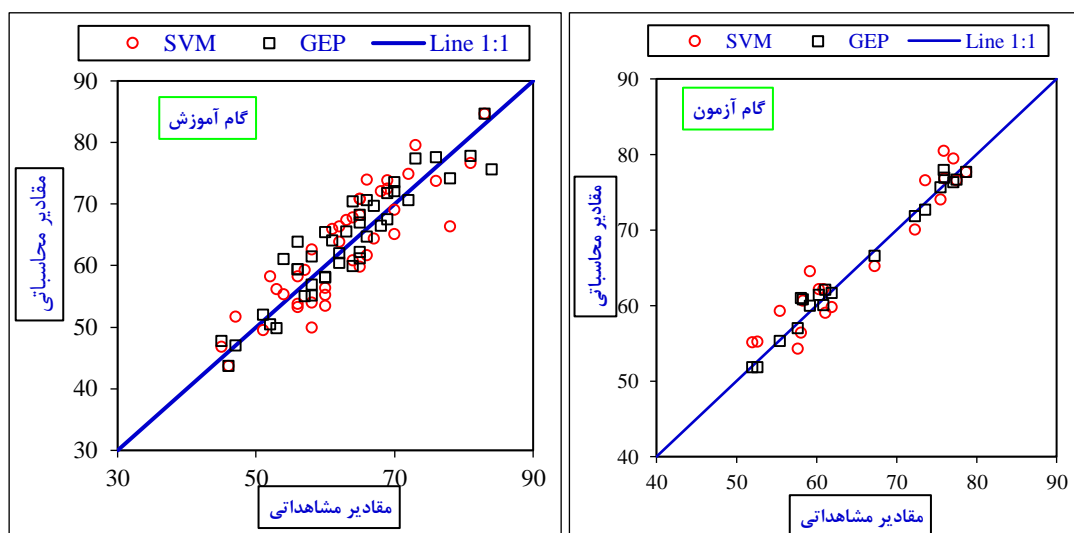


شکل ۴- میزان انطباق پذیری داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در مدل بهینه GEP

برای مقایسه بین دقت خروجی‌های دو مدل SVM و GEP، مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد در دو گام آموزش و آزمون در جدول ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است در هر دو گام آموزش و آزمون کمترین مقدار شاخص‌های RMSE و MAE متعلق به مدل GEP است که نشان از خطای کم خروجی‌های این مدل است. علاوه بر این، مدل GEP دارای بیشترین مقدار  $R^2$  در هر دو مرحله آموزش و آزمون است. یکی دیگر از شاخص‌هایی که در ارزیابی عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است شاخص DDR است. هر چه بیشترین مقدار این شاخص برای مدلی بزرگتر باشد حاکی از عملکرد برتر آن مدل است. در گام آموزش مقدار  $CU_{(DDR(max))}$  برای مدل GEP و SVM به ترتیب ۷/۰۵۴ و ۵/۲۹۲۵ محاسبه شده است. مقدار این شاخص در گام آزمون برای این دو مدل به ترتیب ۲۰/۸۳۵۵ و ۹/۲۸۶۳ است. مقایسه مقدار این شاخص نشان از دقت بیشتر و بالاتر مدل GEP نسبت به مدل SVM است. شکل ۲ مقایسه گرافیکی از انطباق پذیری خروجی‌های دو مدل GEP و SVM با مقادیر مشاهداتی در فازهای آموزش و آزمون را ارائه می‌کند. از نمودارهای رسم شده در این شکل مشخص است کمترین پراکندگی حول خط ۱:۱ متعلق به مدل GEP است که موید دقت بیشتر خروجی‌های این مدل است.

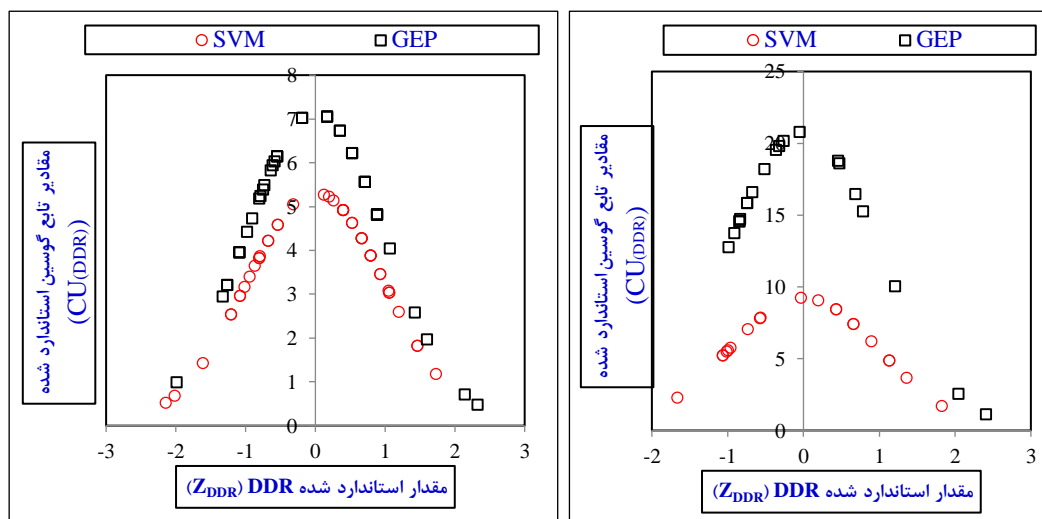
جدول ۶- مقایسه بین دو مدل GEP و SVM براساس مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد

گام آموزش				گام آزمون				مدل
$CU_{(DDR(max))}$	$R^2$	MAE	RMSE	$CU_{(DDR(max))}$	$R^2$	MAE	RMSE	
۲۰/۸۳۵۵	۰/۹۸۳۳	۰/۵۲۷۵	۰/۸۷۸۶	۷/۰۵۴۰	۰/۸۶۳۴	۱/۷۳۹۹	۲/۶۷۹۸	GEP
۹/۲۸۶۳	۰/۹۱۸۵	۱/۳۳۹۶	۱/۹۹۶۹	۵/۲۹۲۵	۰/۷۸۸۴	۲/۴۹۱۱	۳/۷۳۶۱	SVM



شکل ۲- مقایسه بین خروجی‌های دو مدل GEP و SVM در گام‌های آموزش و آزمون

در ادامه نمودار دیگری برای مقایسه گرافیکی خروجی دو مدل GEP و SVM براساس شاخص DDR ارائه شده است (شکل ۶). طبق ویژگی‌های این شاخص، هر چه منحنی باریکتر و مقدار بیشینه روی محور عمودی بالاتر باشد، دلالت بر کارکرد برتر آن مدل دارد.



شکل ۶- مقایسه کارکرد دو مدل SVM و GEP براساس بیان گرافیکی شاخص DDR در مراحل آزمون (چپ) و آموزش (راست)

مقایسه نتایج به دست آمده از روش SVM و GEP در تحقیق حاضر با نتایج مطالعه قزلباش و همکاران (۱۳۹۳) نشان از دقت زیاد مطالعه پیشین دارد. مقدار ضریب همبستگی و شاخص RMSE گزارش شده توسط ایشان برای مدل GEP در آبیاش AQ-۲۰ برابر با ۰/۷۶ و ۰/۰۶ و در آبیاش KA-۶ برابر ۰/۷ و ۰/۰۶۷ بوده است. همچنین، مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن گزارش شده برای مدل شبکه عصبی مصنوعی توسط Menezes et al., (2015) در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ قرار داشت که دقت این مطالعه و معادله پیشنهادی قلیچ و همکاران (۱۳۹۸) با الگوریتم PSO برای یکنواختی توزیع آب با ضریب همبستگی و شاخص RMSE برابر با ۰/۹۱ و ۲/۵۱۳ را اندکی بیشتر از مطالعه حاضر نشان می دهد. نتایج تحقیق هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۰) نیز که به برآورد ضریب یکنواختی توزیع آب با الگوریتم ژنتیک پرداخته است با اختلاف جزئی در مقدار RMSE بر مدل های مطالعه حاضر برتری دارد.

نتایج نشان داد بالاترین ضریب یکنواختی در این مطالعه در کمترین فاصله بین آبیاش ها (۱۵\*۱۵ متر) به دست آمده است که از این نظر با نتایج حاصل از پژوهش Osei et al., (2009) همخوانی دارد. مطابق با نتایج این پژوهش با توجه به کاهش یکنواختی توزیع آب در فشارهای بالا و پایین که به ترتیب ناشی از ایجاد ذرات پودری و درشت است، فشار ۳ الی ۴ اتمسفر یک فشار پیشنهادی برای حصول حداکثر یکنواختی توزیع آب است. اگرچه این نتایج مغایر با نتایج پژوهش Bavi et al., (2009) است که نشان دادند با افزایش فشار کارکرد، ضریب یکنواختی توزیع آب به صورت غیر خطی افزایش می یابد. به طور کلی یکنواختی توزیع آب با کاهش فواصل آب پاش ها افزایش می یابد، ولی به دلیل افزایش طول لوله ها و آبیاش های مورد نیاز طرح، ضروری است تا در این خصوص تحلیلی اقتصادی صورت گیرد. (وقتی فواصل آبیاش ها بیشتر است به لوله ها و آب پاش های کمتری نیاز است، ولی کاهش راندمان آبیاری به دلیل کاهش یکنواختی توزیع آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ممکن است از نظر اقتصادی به صرفه نباشد).

از آنجاکه هر نوع آبیاش پروفیل پاشش خاصی دارد که به اندازه نازل و فشار کارکرد وابسته است، بنابراین لازم است دقت شود که نتایج این تحقیق فقط برای آبیاش مدل Komet 162, 163 قابل استفاده است و باید برای سایر آبیاش ها و نیز سایر روش های آبیاری بارانی (سنتریوت، ویلمو، لینیر و ...) مدل جداگانه ای ارائه و ارزیابی گردد. همچنین پیشنهاد می گردد که انواع مدل های دیگر داده کاوی نیز برای تخمین ضریب یکنواختی آب مورد مطالعه قرار گیرد.

## نتیجه‌گیری

ساختار اصلی این پژوهش، بررسی توانایی دو مدل یادگیری ماشین شامل SVM و GEP برای شبیه‌سازی مقدار ضریب یکنواختی آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک (Komet 162, 163) در دشت ملکان است. برای انجام پژوهش از نتایج محاسبه یکنواختی توزیع کریستیانسن از روی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در شرایط متفاوت سرعت باد، فشار کارکرد و فاصله آبیاش‌ها استفاده گردید. سهم فرآیندهای آموزش و آزمون برای هر یک از مدل‌های یادگیری ماشین به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد انتخاب شد. ارزیابی عملکرد هر یک از مدل‌ها با چهار شاخص  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $R^2$  و  $CU_{(DDR(max))}$  (همراه با توزیع شاخص  $DDR$ ) انجام و برای انتخاب بهترین ترکیب ورودی برای مدل‌های یادگیری ماشین، از گاما-تست استفاده شد. پس از تحلیل حساسیت مشخص شد هر سه متغیر مستقل باید به عنوان ورودی در نظر گرفته شوند. نتایج پژوهش نشان داد رتبه اول دقت شبیه‌سازی به مدل GEP اختصاص دارد. مقدار شاخص‌های ( $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $R^2$ ) در گام آموزش و آزمون به ترتیب  $(۰/۹۸۳۳, ۰/۹۴۹۴, ۱/۱۷۸۷)$  و  $(۲/۶۸۲۷, ۰/۸۶۳۴, ۰/۲۶۷۹۰)$  و  $(۳/۵۰۸۷)$  و  $(۰/۹۸۳۳, ۰/۹۴۹۴, ۱/۱۷۸۷)$  برای GEP به دست آمده‌اند. مقدار شاخص‌های ارزیابی ( $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $R^2$ ) برای SVM در گام آزمون و آموزش نیز به ترتیب  $(۰/۷۸۸۴, ۴/۲۷۰۴, ۴/۸۹۱۷)$  و  $(۰/۹۱۸۵, ۲/۴۱۱۳, ۲/۶۷۹۰)$  حاصل شده‌اند. در گام آموزش مقدار  $CU_{(DDR(max))}$  برای مدل GEP و SVM به ترتیب  $۷/۰۵۴$  و  $۵/۲۹۲۵$  محاسبه شده است. مقدار این شاخص در گام آزمون برای این دو مدل به ترتیب  $۲۰/۸۳۵۵$  و  $۹/۲۸۶۳$  است. مقایسه مقدار این شاخص نیز نشان از دقت بیشتر و بالاتر مدل GEP نسبت به مدل SVM دارد. در مجموع می‌توان گفت هر دو مدل قدرت شبیه‌سازی مقدار یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی را دارند اما استفاده از مدل GEP منجر به نتایج بهتری خواهد شد.

## ملاحظات اخلاقی

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

### مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: نویسنده دوم و سوم تهیه گزارش پژوهش: نویسنده اول تحلیل داده‌ها: نویسنده اول

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز انجام شد.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به‌خاطر حمایت‌های مالی از این تحقیق که بر اساس قرارداد پروژه تحقیقاتی است تشکر می‌نمایند.

## منابع

آبایی، ب.، 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): ۷۶۹-۷۷۹.

احمدزاده کلپیر، ف.، امامی فر، م. ۱۴۰۲. ارزیابی فنی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک (Komet 162) در اراضی توسعه کشت آبی دشت ارسباران، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳: ۱۶۲-۱۴۸.

- احمدزاده کلایبر، ف.، فولادی پناه م. ۱۴۰۲. ارزیابی تابع‌های انتقالی رگرسیونی، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی پارامترهای رطوبتی خاک در دشت ارسباران. *مجله علوم آب و خاک*، ۲۷(۲): ۱۴۹-۱۳۵.
- فولادی پناه، م.، ماجدی اصل، م. و جعفری نیا، ر. ۱۳۹۸. کاربرد و ارزیابی الگوریتم SVM برای شبیه‌سازی هندسه‌ی گودال آبخستگی پایین دست سرریز سیفونی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۳): ۱۰۴۵-۱۰۳۲.
- گلیچ، ح.، ترابی پوده، ح.، منصوری، ر.، صادقی، م. ۱۳۹۸. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش الگوریتم ازدحام جمعیت (PSO). *فصلنامه علمی مهندسی منابع آب*، ۱۲(۴۰): ۱۳۶-۱۲۹.
- قزلباش، ز.، م. ذاکری نیا، ا. هزار جریبی و ا. دهقانی. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی به منظور تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۱(۶): ۱۱۴-۹۵.
- هزار جریبی، ا.، دهقانی، ا.ا.، حسام، م.، شریفان، ح. ۱۳۹۰. تخمین یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۴: ۱۴۴-۱۲۹.
- کریمی، ن.، دهقان، د.، مولودی، ش.، سی و سه مرده، ع. و معروف پور، ع. ۱۴۰۱. بررسی اثر برخی عوامل ساختمان آبیاش، سامانه آبیاری و مدیریت آن بر ضریب یکنواختی در آبیاری بارانی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۹: ۳.
- کاظمی، س. برومند نسب، س.، ایزدپناه، ز. ۱۳۹۸. ارزیابی فنی سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش متحرک (AMBOO, VYR155) در شهرستان اقلید-فارس. *نشریه علوم و مهندسی آبیاری*، ۱(۴۲): ۱۹۲-۱۸۶.
- منصوری، ر.، ترابی، ح.، گلیچ، ح.، میرشاهی، د. ۱۳۹۳. امکان‌سنجی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در سیستم آبیاری بارانی با آبیاش Zb. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳(۲۸): ۵۹۸-۵۸۵.
- رستمی، م.، اوجاقلو، ح.، 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، ۹۴-۸۵.
- Ababaei, B., Verdinejad, V.R. 2013. Estimating hydraulic performance of pressurized irrigation system using artificial neural networks and nonparametric regression. *Journal of water and soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 27(4), 769-779. (In Persian).
- Ahmadzadeh Kaleybar, F., Emamifar, M. 2023. Technical Evaluation of Classic Stationary Sprinkler Irrigation Systems with Travelling Sprinklers (Komet 162) in Arasbaran Plain of Development Lands for Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*. No. (13): 148-162. (In Persian).
- Ahmadzadeh Kaleybar, F., Fuladipناه, M. 2023. Assessment of Regression, Support Vector Machine, and Gene Expression Programming Transfer Functions to Predict Soil Humidity Parameters in Arasbaran Plain. *Journal of Water and Soil Science*. 27 (2): 135-149. (In Persian).
- Andrade, L.M., Pacheco, J.C.C., Costa, G.L.L., Alencar, C. A. B., Cunha, F. F. 2022. Uniformity of water distribution by a sprinkler irrigation system on a soccer field. *Bioscience Journal*. 38, e38012.
- Andrade, S.M., Zanini, J.R. and Soares, C.A. 2015. Hydraulic performance of new and used self-compensating micro-sprinklers. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(6), 3517-3528.
- Barati, M. R., Zakerinia, M., Hezarjeribi, A. 2022. Evaluation of the Center pivot system in different speeds Parallel and perpendicular to the water line. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(1), pp. 41-50. doi: 10.22034/nawee.2022.153888. (In Persian).
- Bavi, A., Kashkuli, H.A., Broomand, S., Naseri, A., Albaji, M. 2009. Evaporation losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. *Journal of Applied Sciences*, 9(3): 597-600.
- Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling*. (Bulletin, 670). Berkeley: University of California Agricultural Experiment Station.
- Ebrahimi, H. 2005. Analysis and evaluation of simplified irrigation systems in khorasan. *Journal of Agriculture Sciences*. 12(3): 577-589. (In Persian).
- Faryabi, A., Maroufpoor, E., Ghamarnia, H., Moshrefi, G.Y. 2020. Comparison of classical sprinkler and wheel move irrigation systems in dehgolan plain, north-west iran. *Irrigation and Drainage*. 69: 352-362.

- Faria, L. C., Beskow, S., Colombo, A., Nörenberg, B. G., Rettore, O., Neto, & Simões, M. C. 2016. Influence of the wind on water application uniformity of a mechanical lateral move irrigation equipment using rotating plate sprinklers. *Ciência Rural*, 46(1), 83-88.
- Filgueiras, R., Cunha, F. F., Venancio, L. P., Althoff, D., Santos, R. A., Santos, G. E. O., Alencar, C. A. B. 2020. Alternative low-cost precipitation kit for assessing irrigation systems. *Semina: Ciências Agrárias*. 41(5), 1783-1798.
- Food and Agriculture Organization & World Water Council. Towards a water and food secure future. 2015. Critical perspectives for policy-makers. *Roma: FAO-WWC*,
- Fuladipannah, M., Majedi Asl, M., Jafarinia, R. 2020. Application and Assessment of SVM Algorithm to Simulate the Geometry of Scour Hole Downstream of a Siphon Spillway. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(3): 1032-1045. (In Persian).
- González, J.F., Moreno, M. A., Molina, J. M., Madueño, A., Ruiz-Canales, A. (2015). Use of software to model the water and energy use of an irrigation pipe network on a golf course. *Agricultural Water Management*, 151(1), 37-42.
- Ghilich, H., Torabi, H., Mansouri, R. & Sadeghi, M. 2019. Estimation of the water distribution uniformity in sprinkler irrigation by using PSO Algorithm Method. *Water Resources Engineering*, 12(40), 129-136. (In Persian).
- Ghezalbash, Z., Zaherinia, M., Hezarjaribi, A., Dehghani, A. A. 2015. Performance comparison of gene expression programming and artificial neural network methods to estimate water distribution uniformity in sprinkler irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(6), 95-114. (in Persian).
- Ghezalbash, Z., Zaherinia, M., Hezarjaribi, A., Dehghani, A. A. 2018. Estimating of Water Distribution Uniformity in Sprinkler Irrigation Using Data Mining techniques. *Irrigation and Water Engineering*, 8(4), 156-171. (In Persian).
- Haji Talkhabi, G., Hemmati, M., Hejabi, S. 2023. Hydrological and Hydraulic Evaluation of Water Transfer from the Kani Sib Tunnel to Lake Urmia. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), pp. 67-80. doi: 10.22034/nawee.2023.392535.1038. (In Persian).
- Hezarjaribi, A., Dehghani, A.A., Hesam, M., Sharifan, H. 2011. Estimation of the water distribution uniformity in sprinkler irrigation by using genetic algorithm method. *Journal of water and soil conservation (journal of agricultural sciences and natural resources)*, 18(4), 129-142. (In Persian).
- Hart, W.E., Reynolds, W.N. 1965. Analytical design-sprinkler system. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*. 1:83-89.
- Issaka, Z., Li, H., Jiang, Y., Tang, P., Chao, C. 2019. Comparison of rotation and water distribution uniformity using dispersion devices for impact and rotary sprinklers. *Irrigation and Drainage*, 68: 5. 881-892.
- Kara, T., Ekmekci, E., Apan, M. 2008. Determination the uniformity coefficient and water distribution characteristics of some sprinklers. *Pakistan journal of biological sciences*, 11(2): 214-219.
- Karimi, N., Dehghan, D., Moloudi, S., Siosemardeh, A., Maroufpoor, E. 2022. Investigating the effect of some factors of sprinkler building irrigation system and its management on uniformity coefficient in sprinkler irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(3), 67-84. doi: 10.22069/jwsc.2022.20232.3556. (In Persian).
- Kazemi, S., Brooman Nasab, S., IzadPanah, Z. 2019. Technical Evaluation of Classic Stationary Sprinkler Irrigation Systems with Travelling Sprinklers in Eghlid, Fars Province. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(2), 181-196. doi: 10.22055/jise.2017.21215.1525. (In Persian).
- Keller, J., Bliesner, R. 2000. Sprinkle and trickle irrigation. Caldwell. In: *NJ. The Blackburn Press*. 351p.
- Lemeister, C., Pochop L., Kerr G., Wulff Sh.S. & Drew J. 2007. Evaluating the "Catch-Can" test for measuring lawn sprinkler application rates. *Journal of the American Water Resources Association*, (43)4: 938-946.
- Mansouri, R., Torabi, H., Ghilich, H., Mirshahi, D. 2014. Differential Evolution (DE) Algorithm to Estimate the Uniformity of Water Distribution Coefficient in ZB Sprinkler Irrigation System. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(3), 585-598. doi: 10.22092/jwra.2014.100009. (In Persian).
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., Khaledi, M. 2019. Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*, 223, 105691.
- Maroufpoor, S., Shiri, J., Maroufpoor, E. 2019. Modeling the sprinkler water distribution uniformity by data-driven methods based on effective variables. *Agricultural Water Management* 215 : 63-73.
- Menezes P. L. Azevedo C. A. V. Eyng E. Neto J. D., 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.

- Merriam, J.L., Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Dept of Agric. and Irrigation. Eng. *Utah State Univ. Logan, Utah States*. 285P.
- Mohamed, A. Z., Peters, R. T., Zhu, X., Sarwar, A. 2019. Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. *Agricultural Water Management*, 213, 1078-1083. doi: 10.1016/j.agwat.2018.07.017
- Montazar, A., Moridnejad, M. 2008. Influence of wind and bed slope on water and soil moisture distribution in solid-set sprinkler systems. *Irrigation and Drainage*, 57: 175-185.
- Mushtaq, Sh., Maraseni, T.N. 2011. Technological change in the Australian irrigation industry: implications for future resource management and policy development. *Australian government, national water commission, Waterlines Report Series No 53*.
- Ngasoh, F.G., Anyadike, C.C., Mbajiorgu, C.C., Usman, M.N. 2018. Performance evaluation of sprinkler irrigation system at Mambilla Beverage limited, Kakara-Gembu, Taraba state-Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 37(1): 268-274.
- Noori, R., A.R. Karbassi, Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaei-Ashtiani, M.H., Farokhnia, A., Ghafari, M. 2013. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. *Journal of Hydrology* 401(3): 177-189.
- Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., Farokhnia, A. 2010. Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistic. *Expert Systems with Applications*, 37: 5856-5862.
- Osei, F.K.B. 2009. Evaluation of sprinkler irrigation system for improved maize seed production for farmers in Ghana. *A Thesis for M.sc*.
- Rather, N.R., Baba, M.A. 2018. Performance Evaluation of Sprinkler Irrigation System in Ganderbal District J & K State, *British Journal of Applied Science & Technology*, 25(5): 1-7.
- Rostamlou, M., Ojaghrou, H., Karbasi, M. 2019. Comparison of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and gene expression programming (GEP) in estimating water distribution uniformity coefficient in solid-set sprinkle irrigation systems. *Iranian Water Research Journal*, 12(4 (31)), 85-94. (In Persian).
- Siqueira, M.M.K., Vilas Boas, M.A., Siqueira, J.A.C., Tokura, L.K. 2018. Techniques for quality control in football field located in agricultural area. *Journal of Agricultural Science*. 10(9), 430-442. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p430>.
- Tarjuelo, J.M., Montero, J., Honrubia, F.T., Ortiz, J.J., Ortega, J.F. 1999. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 40(2-3): 315-331.
- Wu, D., Cui, Y., Luo, Y. 2019. Irrigation efficiency and water-saving potential considering reuse of return flow. *Agricultural Water Management*, 221, 519-527. doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.021.