Original Article

Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)

Fall 2025, Vol.3, No.11, pp 63 - 80

10.22077/jdcr.2025.8966.1120

Investigating the Function of Gene Expression Planning Method in Daily Evapotranspiration Forecasting in Different Climates and Comparing it with Experimental Methods

Samira Rahnama[1*], Fahimeh Khadempour[2]

1- Graduated with a PhD in Water Resources Engineering, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Ph.D. Student of Water Resources Engineering, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

***Corresponding Author: samira.rahnama1369@gmail.com**

Keywords:
Evapotranspiration, Hargreaves, Irmak, Makkink, Penman-Monteith-FAO

Received:
16 Feb 2025

Revised:
09 Apr 2025

Accepted:
12 Apr 2025

Extended Abstract

Introduction

Given the importance of accurate and timely determination of reference evapotranspiration in water balance calculations, plant production simulations, and irrigation planning on the one hand, and the lack of suitable meteorological data on the other, it is essential to develop a simple, cost-effective, and accurate model for estimating this parameter. Therefore, the main objective of this research is to identify the best model for predicting daily average reference evapotranspiration in arid, Mediterranean, and very humid climates using meteorological parameters. To compare the performance of the Gene Expression Programming (GEP) algorithm in predicting reference evapotranspiration, six scenarios were defined based on influential parameters, including minimum temperature (T_{min}), maximum temperature (T_{max}), average temperature (T_{mean}), relative humidity (RH), wind speed at 2 meters height (u_2), and sunshine hours (n). In addition, empirical methods—such as Makkink, Priestley-Taylor, FAO Blaney-Criddle, FAO Penman-Monteith, Hargreaves, Hargreaves-Samani, Irmak-Rs, and Irmak-Rn—were used to estimate daily reference evapotranspiration. The results obtained from the GEP algorithm were then compared with those derived from empirical equations using appropriate statistical criteria. Finally, based on the GEP model's performance, the best scenario for predicting reference evapotranspiration was proposed.

How to cite this article:
Rahnama, S & Khadempour, F. (2025). Investigating the Function of Gene Expression Planning Method in Daily Evapotranspiration Forecasting in Different Climates and Comparing it with Experimental Methods. *Journal of Drought and Climate change Research* (JDCR), 3(11), 63-80. 10.22077/jdcr.2025.8966.1120

Copyright: Authors retain the copyright and full publishing rights. Licensee Journal of Drought and Climate change Research (JDCR). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Materials and Methods

In this research, meteorological stations were selected based on climate diversity using the De Martonne climate classification system. Accordingly, the study stations were categorized into three climate types: arid, Mediterranean, and very humid. The selected stations include three synoptic meteorological stations—Birjand, Gorgan, and Rasht—with a common observation period of 20 years (2001–2020). Daily data on minimum temperature, maximum temperature, average temperature, relative humidity, wind speed at a height of two meters, sunshine hours, and reference evapotranspiration were used. The characteristics of the study stations and their corresponding climates based on the De Martonne classification are presented in Table 1.

Table 1. Characteristics of study stations and their climates in the De Martonne system

Station	Longitude (Eastern)	Latitude (North)	Sea level (m)	Temperature (ºC)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms^{-1})	Sunshine hours (h)	Climate
Birjand	12º59'	52º32'	1491	16.8	35.1	1.6	9.2	Dry
Gorgan	24º54'	54º36'	0.0	18.1	74.1	1.4	6.4	Mediterranean
Rasht	37º49'	19º37'	-8.6	16.6	83.3	0.9	4.8	Very wet

Given that daily data is examined in this research, among the existing empirical relationships for calculating ETo, those suitable for daily-scale estimation and commonly used by other researchers were selected. Based on this criterion, six empirical relationships were chosen. Additionally, before applying the Gene Expression Programming (GEP) intelligent model, reference evapotranspiration was calculated using the FAO Penman-Monteith model over the study period at all stations on a daily scale. This method estimates reference evapotranspiration values across various regions and climates by incorporating standardized model assumptions.

To compare the performance of the GEP algorithm in predicting reference evapotranspiration, six scenarios were defined based on key influencing meteorological parameters, including minimum temperature (T_{min}), maximum temperature (T_{max}), average temperature (T_{mean}), relative humidity (RH), wind speed at a height of two meters (u_2), and sunshine hours (n). Finally, to evaluate and validate the GEP model, its performance was assessed using the following statistical criteria: Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Coefficient of Determination (R^2). RMSE is a useful indicator of prediction accuracy, reflecting the average error between observed and predicted values. An RMSE value of zero indicates perfect model performance, where observed and predicted values are identical. The MAE measures the average magnitude of the absolute differences between predicted and actual values; lower MAE values indicate higher model accuracy. The NSE ranges from $-\infty$ to 1, with values less than zero suggesting poor model performance, and a value of 1 representing a perfect simulation. R^2 indicates the degree of correlation between observed and predicted values, ranging from 0 to 1, with values closer to 1 signifying a stronger correlation.

Results and Discussion

Comparing the results of the model evaluation statistics across different scenarios shows that, at the Birjand and Gorgan stations, Scenario A provided better predictions because it included minimum temperature, maximum temperature, average air temperature, relative humidity, wind speed at two meters height, sunshine hours, and reference evapotranspiration. Scenario F, on the other hand, produced the weakest results due to the exclusion of sunshine hours and reference evapotranspiration parameters. Therefore, Scenario A, with its high coefficient of determination, strong model fit, and low error values, can be considered the optimal model for the Birjand and Gorgan stations.

At the Rasht station, which has a very humid climate, Scenario B provided better predictions than the other scenarios, as it included maximum temperature, average air temperature, relative humidity, wind speed at two meters height, sunshine hours, and reference evapotranspiration.

The results indicate that the Irmak-Rs method at the Gorgan and Rasht stations, and the Hargreaves method at the Birjand station, showed a higher correlation with the Penman-Monteith-FAO method compared to the other methods. Furthermore, the Irmak-Rs and Hargreaves methods estimated reference evapotranspiration more accurately at the study stations. Therefore, due to their high R^2 values, relatively good NSE, and lower RMSE and MAE values compared to other methods, the Irmak-Rs and Hargreaves methods can serve as suitable alternatives to the Penman-Monteith-FAO method on a daily scale in Mediterranean, very humid, and arid climates. The Hargreaves-Samani method, however, demonstrated the lowest accuracy in estimating reference evapotranspiration across all stations.

Conclusion

Accurate knowledge of water requirements in different geographical regions of the country primarily depends on the correct calculation of reference evapotranspiration. Therefore, this research aims to compare the performance of Gene Expression Programming (GEP) methods and empirical equations in predicting daily reference evapotranspiration across various climates, including arid, Mediterranean, and very humid regions. The results of Gene Expression Programming showed that, at the Birjand and Gorgan stations, scenario a provided a more accurate prediction due to the inclusion of parameters such as minimum temperature, maximum temperature, average air temperature, relative humidity, wind speed at a height of two meters, sunshine hours, and reference evapotranspiration. In contrast, scenario f produced the weakest results, primarily due to the omission of sunshine hours and reference evapotranspiration. Therefore, scenario a, with its high coefficient of determination, best fit, and low error values, can be considered the optimal model for the Birjand and Gorgan stations. At the Rasht station, characterized by a very humid climate, scenario b provided a more accurate prediction than the other scenarios. Additionally, in this research,

empirical methods (Makkink, Priestley–Taylor, FAO Blaney–Criddle, FAO Penman–Monteith, Hargreaves, Hargreaves–Samani, Irmak-Rs, and Irmak-Rn) were used to estimate daily reference evapotranspiration. The results showed that the Irmak-Rs method at the Gorgan and Rasht stations, and the Hargreaves method at the Birjand station, exhibited a higher correlation with the Penman–Monteith–FAO method compared to other empirical methods. Therefore, in cases where all the necessary parameters for calculating reference evapotranspiration are not available, the Irmak-Rs and Hargreaves methods can serve as suitable alternatives.

مقاله پژوهشی

مجلـه
پژوهش‌های خشکسالی و تغییراقلیم

دوره سوم، پیاپی ۱۱، پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۸۰ - ۶۳

10.22077/jdcr.2025.8966.1120

بررسـی عملکـرد روش برنامه‌ریـزی بیـان ژن در پیش‌بینـی تبخیـر تعـرق مرجـع روزانـه در اقلیم‌هـای مختلـف و مقایسـه آن بـا روش‌هـای تجربـی

سمیرا رهنما [۱*]، فهیمه خادم‌پور [۲]

۱- دانش‌آموخته دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

*نویسنده مسئول: samira.rahnama1369@gmail.com

واژه‌های کلیدی:

ایرمـاک، پنمن-مونتیث-فائـو، تبخیرتعـرق، مک‌کینـگ، هارگریـوز

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

تبخیرتعـرق یکـی از مهم‌تریـن پارامترهایـی اسـت دانسـتن آن جهـت بـرآورد آب مصرفـی گیـاه و طراحـی سیسـتم‌های آبیـاری ضـروری اسـت. هـدف از انجـام ایـن پژوهـش، مقایسـه عملکـرد روش‌هـای برنامه‌ریـزی بیـان ژن و روابـط تجربـی در تخمیـن تبخیرتعـرق مرجـع روزانـه در بـازه زمانـی ۲۰ سـاله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) در سـه اقلیـم خشـک (بیرجنـد)، مدیترانـه‌ای (گـرگان) و بسـیار مرطـوب (رشـت) می‌باشـد. به‌منظـور مقایسـه نتایـج حاصـل از الگوریتـم بیـان ژن در پیش‌بینـی تبخیرتعـرق مرجـع، ۶ سـناریو بـا توجـه بـه پارامترهـای هواشناسـی تأثیرگـذار تبخیرتعـرق مرجـع تعریـف شـد. همچنیـن در ایـن پژوهـش، بـرای بـرآورد تبخیرتعـرق مرجـع روزانـه از روش‌هـای تجربـی (مک‌کینـگ، پریسـتلی تیلـور، فائـو بلانـی کریـدل، پنمـن- مونتیـث- فائـو، هارگریـوز، هارگریـوز سـامانی، ایرمـاک- RS و ایرمـاک- Rn) اسـتفاده گردیـد. در نهایـت، بهتریـن مـدل براسـاس معیارهـای ارزیابـی RMSE، MAE، NSE و R^2 انتخـاب شـد. نتایـج نشـان داد کـه در ایسـتگاه‌های بیرجنـد و گـرگان، سـناریوی a به‌دلیـل در نظـر گرفتـن پارامترهـای حداقـل دمـا، حداکثـر دمـا، میانگیـن دمـای هـوا، رطوبـت نسـبی، سـرعت بـاد در ارتفـاع دو متـری، سـاعات آفتابـی و تبخیرتعـرق مرجـع پیش‌بینـی مطلوب‌تـری را ارائـه کـرده اسـت. در ایسـتگاه رشـت، سـناریوی b پیش‌بینـی مطلوب‌تـری را نسـبت بـه سـایر سـناریوها ارائـه کـرده اسـت. همچنیـن، روش ایرمـاک-Rs و روش هارگریـوز بـا مقـدار R^2 بـالا، NSE نسـبتاً خـوب و مقـدار RMSE و MAE کمتـر نسـبت بـه سـایر روش‌هـا، می‌توانـد جایگزیـن مناسـبی بـرای روش پنمـن- مونتیـث- فائـو در مقیـاس روزانـه در اقلیم‌هـای مدیترانـه‌ای (گـرگان)، بسـیار مرطـوب (رشـت) و خشـک (بیرجنـد) باشـد. همچنیـن، روش هارگریـوز سـامانی کمتریـن دقـت (R^2=0.5) را در بـرآورد تبخیرتعـرق مرجـع در همـه ایسـتگاه‌ها داشـته‌اند.

مقدمه

در طراحی و تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، برآورد تبخیرتعرق نقش مهمی دارد. در اغلب روش‌هایی که برای تعیین مقدار تبخیرتعرق ارائه شده‌اند، ابتدا مقدار تبخیرتعرق گیاه مرجع (ETo) تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از آن تبخیرتعرق گیاه مورد نظر (ETc) محاسبه می‌شود (Khadempour et al., 2019). روش‌هایی که برای تخمین تبخیرتعرق مرجع استفاده می‌شود در دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و محاسباتی قرار می‌گیرند. از آنجایی که روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تبخیرتعرق هزینه‌بر است لذا در بسیاری اوقات جهت برآورد تبخیرتعرق از روش‌های محاسباتی استفاده می‌شود. در روش‌های محاسباتی از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از روی ارتباط آن‌ها با تبخیرتعرق و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، تبخیرتعرق پوشش گیاهی مورد نظر تخمین زده می‌شود (Alizadeh, 2006). در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) و سازمان خوار و بار جهانی (FAO)، روش پنمن-مونتیث- فائو به‌عنوان روش استاندارد محاسبه ETo پیشنهاد شده‌است (Hargreaves, 1994). مدل پنمن-مونتیث، نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با درجه اعتماد نسبتاً قابل قبولی در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآوردی از تبخیرتعرق گیاه مرجع ارائه می‌کند (Doorenbos and Pruitt, 1975). نتایج پژوهش‌های پیشین حاکی از این است به‌دلیل تغییرپذیری زیاد مؤلفه تبخیرتعرق و وجود پارامترهای زیاد در برآورد آن، مدل‌های هوشمند می‌توانند در برآورد آن مفید واقع شود. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های شبکه عصبی فازی، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و ماشین بردار پشتیبان اشاره نمود. نتایج پژوهش کیسی و همکاران (Kisi et al., 2013) در ترکیه نشان داد که روش‌های فرا ابتکاری مانند شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک (GA)، برنامه‌ریزی بیان ژن و سیستم‌های استنتاج فازی قابلیت بالایی در برآورد میزان تبخیرتعرق دارند. زیرا این مدل‌ها نیازی به رابطه ریاضی برای پدیده‌های پیچیده مورد بررسی ندارند و چون با مدل‌های بهینه‌سازی تلفیق شده‌اند، ورودی‌های آن‌ها تحلیل حساسیت شده و ساختار بهینه آن‌ها به‌صورت خودکار استخراج می‌شود.

به همین دلیل، پژوهش‌های متعددی به ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی در برآورد تبخیرتعرق پرداخته‌اند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. پژوهشی به بررسی کاربرد سیستم‌های استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای برآورد تبخیرتعرق ماهانه در شمال غرب ایران پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی و دقت مدل ANFIS برای تخمین تبخیرتعرق مرجع بهتر از روش GEP بود (Ahmadi et al., 2015). محمدرضاپور (Mohammadreazapour, 2017) به پیش‌بینی تبخیرتعرق پتانسیل ماهانه در چهار ایستگاه سینوپتیک پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که در همه ایستگاه‌ها مدل ماشین بردار پشتیبان در مرتبه اول و سپس مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و در آخر مدل نرو فازی برای تخمین مقادیر تبخیرتعرق پتانسیل ماهانه قرار دارند. خادم‌پور و همکاران (Khadempour et al., 2019b) به بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی تابش خورشیدی روزانه در گستره ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده سازگاری خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل GEP دارد. مزمل و همکاران (Muzzammil et al., 2015) به کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در آنالیز فرکانس جریان و مقایسه آن با شبکه عصبی مصنوعی و توزیع گامبل پرداختند و دریافتند که برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و توزیع گامبل مدلی برتر می‌باشد. ترائوره و همکاران (Traore et al., 2017) به پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع روزانه با استفاده از اطلاعات آب و هوا و برنامه‌نویسی بیان ژن در چین پرداختند. نتایج نشان داد که، بیان ژن توانایی خوبی برای پیش‌بینی تبخیرتعرق روزانه با کمترین خطا را داشته است. مطار (Mattar, 2018) با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به مدل‌سازی تبخیرتعرق مرجع ماهانه مصر پرداخت. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این روش با ورودی‌های بیشینه و کمینه درجه حرارت،

رطوبت نسبی و سرعت باد دارای بیشترین دقت در برآورد ETo می‌باشد. ولی‌پور همکاران (Valipour et al., 2019) در پژوهشی نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی تبخیرتعرق در اقلیم نیمه خشک و مدیترانه‌ای می‌باشد و در اقلیم‌های بسیار مرطوب و برخی از مناطق خشک باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد. سبزواری و همکاران (Sabzevari et al., 2022) در پژوهشی به بررسی رگرسیون چند متغیره و برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌سازی تبخیرتعرق مرجع در ایستگاه خرم‌آباد پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن دارای توانایی قابل قبولی در تخمین تبخیرتعرق مرجع تحت شرایط آب و هوایی خرم‌آباد بوده و به‌عنوان مدل قابل استفاده در این زمینه معرفی می‌گردد. زهیری و مرادی سبزکوهی (Zahiri and Moradi Sabzkouhi, 2023) در پژوهشی تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در اهواز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنالیز واریانس آن‌ها با در نظر گرفتن اثرات متقابل نشان داد که کلیه اثرات متقابل دارای تأثیر معنادار بر میزان تبخیر بوده و تنها اثر متقابل سرعت باد و میزان تابش فاقد تفاوت معنادار می‌باشد. کرمی و صیاد بیرانوند (Karami and Sayad beyranvand, 2024) نیز نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب با دقت خوب جهت برآورد تبخیرتعرق مرجع قرار بگیرد.

با توجه به اهمیت تعیین دقیق و به‌موقع تبخیرتعرق مرجع در محاسبات بیلان آبی، شبیه‌سازی تولیدات گیاهی و برنامه‌ریزی‌های آبیاری از یک سوء و نبود داده‌های مناسب هواشناسی از سوی دیگر، ارائه یک مدل ساده، کم هزینه و دقیق را در ارائه این پارامتر ضروری می‌نماید. لذا هدف اصلی از انجام این پژوهش، انتخاب بهترین مدل برای پیش‌بینی میانگین روزانه تبخیرتعرق مرجع در اقلیم‌های خشک، مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب با استفاده از پارامترهای هواشناسی است. بدین‌منظور جهت مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم بیان ژن در پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع، ۶ سناریو با توجه به پارامترهای تأثیرگذار تبخیرتعرق مرجع مانند حداقل دما (T_{min})، حداکثر دما (T_{max})، میانگین دما (T_{mean})، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد در ارتفاع دو متری (u_2)، ساعات آفتابی (n) تعریف شد. همچنین در این پژوهش، برای برآورد تبخیرتعرق مرجع روزانه از روش‌های تجربی (مک‌کینگ، پریستلی تیلور، فائو بلانی کریدل، پنمن- مونتیث-فائو، هارگریوز، هارگریوز سامانی، ایرماک- RS و ایرماک- Rn) استفاده گردید. سپس نتایج حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن با نتایج حاصل از روابط تجربی با استفاده از معیارهای آماری مناسب مقایسه شد و در نهایت با استفاده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، بهترین سناریو برای پیش‌بینی تبخیرتعرق پیشنهاد گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران با متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی‌متر در عرض جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک کره زمین و بین دو نصف النهار ۴۴ و ۶۴ درجه شرقی و دو مدار ۲۵ و ۴۰ شمالی واقع شده است (Khadempour et al., 2019b). حدود ۹۴/۸ درصد از سطح آن، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک با ریزش‌های جوی کم و تبخیرتعرق زیاد قرار دارد. ایستگاه‌های هواشناسی در این پژوهش براساس تنوع اقلیمی و سیستم اقلیمی دومارتن انتخاب شدند. بدین ترتیب ایستگاه‌های مطالعاتی به سه اقلیم خشک، مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب تقسیم شد. ایستگاه‌های هواشناسی منتخب شامل ۳ ایستگاه سینوپتیک بیرجند، گرگان و رشت با دوره زمانی مشترک ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) می‌باشد و از داده‌های حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متری، ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع در مقیاس روزانه استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشور در شکل (۱) مشخص می‌باشد. همچنین مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی و اقلیم آن‌ها در سیستم دومارتن در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location of the stations under study

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی و اقلیم آن‌ها در سیستم دومارتن

Table 1. Characteristics of study stations and their climates in the De Martonne system

ایستگاه Station	طول جغرافیایی (شرقی) Longitude (Eastern)	عرض جغرافیایی (شمالی) Latitude (North)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Sea level (m)	دما Temperature (ºC)	رطوبت نسبی Relative humidity (%)	سرعت باد Wind speed (ms^{-1})	ساعت آفتابی Sunshine hours (h)	اقلیم Climate
بیرجند Birjand	12º59'	52º32'	1491	16.8	35.1	1.6	9.2	خشک Dry
گرگان Gorgan	24º54'	54º36'	0.0	18.1	74.1	1.4	6.4	مدیترانه‌ای Mediterranean
رشت Rasht	37º49'	19º37'	-8.6	16.6	83.3	0.9	4.8	بسیار مرطوب Very wet

روابط برآورد تبخیرتعرق مرجع

با توجه به اینکه در این پژوهش داده‌های روزانه مورد بررسی قرار گرفته است بنابراین از بین روابط تجربی موجود برای محاسبه ETo، روابطی انتخاب شد که برای مقیاس روزانه مناسب باشند و قبلاً توسط سایر پژوهشگران مورد استفاده واقع شده باشند و به‌عبارت دیگر رایج باشند. بر این اساس شش رابطه تجربی انتخاب شد که نام و روابط ریاضی آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

که در جدول (۳)، a و b ضرایب اقلیمی می‌باشند که به RH_{min}، n، N و u_2 بستگی دارند. P درصد ساعات روشنایی برای یک روز در ماه مورد نظر در مقایسه با ساعات روشنایی روز در طول یک سال، α ضریب تجربی بدون بعد و معادل ۱/۲۶، T_{max} و T_{min} حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا (C°)، R_a تابش فرازمینی ($MJm^{-2}day^{-1}$)، R_s تابش موج کوتاه ($MJm^{-2}day^{-1}$) و λ

جدول ۲. روابط ریاضی و علائم اختصاری معادلات منتخب برای برآورد ET_o

Table 2. Mathematical relationships and abbreviations of selected equations for ET_o estimation

روش Method	مرجع Reference	روابط ریاضی برای ET_o Mathematical relations for ET_o
مک‌کینگ (M) Makkink (M)	مک‌کینگ (۱۹۵۷) Makkink (1975)	$0.61\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)R_s/\lambda - 0.12$
پریستلی تیلور (PT) Pristly and Taylor (PT)	پریستلی و تیلور (۱۹۷۲) Pristly and Taylor (1975)	$\alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}0.408(R_n-G)$
فائو بلانی کریدل (FBC) FAO Blaney Criddle (FBC)	دورنیوس- پروت (۱۹۷۵) Doorenbos - Pruitt (1975)	$a+b[P(0.46T_{mean}+8.13)]$
پنمن- مونتیث- فائو (FPM56) FAO Penman-Monteith (FPM56)	آلن و همکاران (۱۹۹۸) Allen et al., (1998)	$\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}$
هارگریوز (H) Hargreaves (H)	آلن و همکاران (۱۹۹۸) Allen et al., (1998)	$0.0023R_a(T_{mean}+17.8)\sqrt{T_{max}-T_{min}}$
هارگریوز- سامانی (HS) Hargreaves- Samani (HS)	آلن و همکاران (۱۹۹۸) Allen et al., (1998)	$0.0135k_tR_a(T_{mean}+17.8)\sqrt{T_{max}-T_{min}}$ $k_t=0.00185(T_{max}-T_{min})^2-0.0433(T_{max}-T_{min})+0.1023$
ایرماک- R_s Irmak-R_s	آلکابید و همکاران (۲۰۰۶) Alkabeed et al., (2006)	$-0.611+0.149R_s+0.079T_{mean}$
ایرماک- R_n Irmak- R_n	آلکابید و همکاران (۲۰۰۶) Alkabeed et al., (2006)	$0.489+0.289R_n+0.023T_{mean}$

گرمای نهان تبخیر با مقدار ۲/۵۴ $MJ.Kg^{-1}$ می‌باشد (Alizadeh, 2006).

محاسبه تبخیرتعرق مرجع روزانه

قبل از استفاده از مدل هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن، میزان تبخیرتعرق مرجع با استفاده از مدل پنمن-مونتیث-فائو در طول دوره آماری مورد مطالعه در همه ایستگاه‌ها در مقیاس روزانه محاسبه گردید. این روش مقادیر تبخیرتعرق مرجع را در تمامی مناطق و اقلیم‌ها با اعمال فرضیات مدل محاسبه می‌کند. طی این دوره میانگین روزانه دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متری و ساعات آفتابی محاسبه شد. سپس میانگین روزانه ET_o براساس داده‌های هواشناسی مذکور به‌دست آمد. شکل کلی رابطه پنمن-مونتیث-فائو به‌صورت رابطه (۱) می‌باشد.

(۱)

$$ET_O=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}$$

که در آن ET_o تبخیرتعرق گیاه مرجع (mmd^{-1})، R_n تابش خالص ($MJm^{-2}d^{-1}$)، T دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (C°)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (ms^{-1})، e_s-e_a کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری از سطح زمین (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما در نقطه‌ای که دمای آن T باشد ($kPaC^{-1}$)، γ ضریب سایکرومتری ($kPaC^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) است. از آنجا که مقدار روزانه شار حرارتی خاک در زیر سطح مرجع چمن نسبتاً کوچک است، می‌توان آن را نادیده گرفت (Allen et al., 1998).

برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) یکی از روش‌های نوین هوش مصنوعی است. این روش تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک (GA) است که بر اساس تئوری داروین ارائه و در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع گردید (Roshangar and Mirhydrian, 2014). برنامه‌ریزی بیان ژن نیز همانند الگوریتم‌های ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک، یک الگوریتم ژنتیکی است به‌طوری که از جمعیتی از افراد استفاده می‌کند که آن‌ها را مطابق برازندگی انتخاب می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید. برنامه‌ریزی بیان ژن روشی است که از تکامل زیست‌شناسی جهت ایجاد یک برنامه کامپیوتری برای مدل‌سازی بعضی پدیده‌ها، تقلید می‌کند (Roshangar et al., 2016). همچنین یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند. در این روش در ابتدای فرآیند هیچ‌گونه رابطه تابع در نظر گرفته نشده و این روش

قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. اولین مرحله در تخمین به‌کمک نرم‌افزار GeneXproTools، تولید جمعیت اولیه از راه‌حل‌هاست که به‌کمک یک سری توابع و ترمینال‌ها صورت می‌گیرد. سپس کروموزم‌ها به‌صورت بیان درختی نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد باید کارایی یا سازگاری هر عضو جمعیت کروموزوم‌ها را به‌کمک تابع برازش ارزیابی کرد که حالت آرمانی این تابع، ۱۰۰۰ می‌باشد. بدین‌ترتیب، به‌کمک تابع برازش و حفظ جواب‌های برتر و حذف جواب‌های ضعیف به جواب مطلوب نزدیک می‌شود. از این رو رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل ثابت نیست و پیوسته تغییر می‌کند. به‌طور کلی، فرآیند گام به گام مدل برنامه‌ریزی بیان ژن به این صورت می‌باشد: ۱- فرآیند یا تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی جمعیت اولیه آغاز می‌شود. ۲- کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی اظهار می‌شوند. ۳- میزان مطلوبیت هر جواب بالقوه مسئله (کروموزوم) و درجه سازگاری آن ارزیابی می‌شود. ۴- اگر شرایط مطلوب حاصل شده باشد برنامه متوقف و جمعیت موجود جواب مطلوب را نشان می‌دهد. در غیر این صورت: ۵- بهترین افراد از جمعیت حاضر نگه‌داشته می‌شود. ۶- بقیه افراد جمعیت حاضر براساس عملکردشان انتخاب می‌شوند. ۷- اصلاحات و بهبودهایی (تکثیر و جهش) روی جمعیت انتخاب شده صورت می‌گیرد، در نتیجه فرزندانی با ویژگی‌های جدید تولید می‌شوند. ۸- فرزندان جدید، در یک چرخه، تحت همان فرآیند توسعه قرار می‌گیرند و این فرآیند برای تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌شود تا راه‌حل مناسبی پیدا شود. به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم بیان ژن در پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع، ۶ سناریو با توجه به پارامترهای تأثیرگذار تبخیرتعرق مرجع مانند حداقل دما (T_{min})، حداکثر دما (T_{max})، میانگین دما (T_{mean})، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد در ارتفاع دو متری (u_2)، ساعات آفتابی (n) تعریف شد. در جدول (۳)، پارامترهای ورودی در هر سناریو ارائه گردید. برای بهره‌گیری از الگوریتم بیان ژن از نرم‌افزار GeneXproTools 5.0 استفاده شده است. در میان داده‌های جمع‌آوری شده ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪ داده‌ها برای آزمایش در نظر گرفته شد.

جدول ۳. پارامترهای ورودی در سناریوهای مختلف

Table 3. Input parameters in different scenarios

سناریو Scenario	پارامترهای ورودی Input parameters
a	T_{min}, T_{max}, T_{mean}, RH, u_2, n, ET_o
b	T_{max}, T_{mean}, RH, u_2, n, ET_o
c	T_{mean}, RH, u_2, n, ET_o
d	RH, u_2, n, ET_o
e	u_2, n, ET_o
f	n, ET_o,

ارزیابی عملکرد مدل

در پایان جهت ارزیابی و آزمون اعتبار مدل GEP، به ارزیابی عملکرد آن پرداخته شد. برای ارزیابی عملکرد این مدل از آماره‌های ریشه متوسط خطای مربعات (RMSE)، متوسط قدر مطلق خطا (MAE)، معیار نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب تبیین (R^2) مطابق رابطه ۲ تا ۵ استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i - Y_i|}{N} \quad (۳)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2)} \quad (۵)$$

که در آن، N تعداد کل داده‌ها، X_i داده‌های شبیه‌سازی‌شده، Y_i داده‌های مشاهداتی، i گام‌های زمانی و و میانگین داده‌های X و Y می‌باشد. RMSE در واقع معیار خوبی برای دقت پیش‌بینی می‌باشد که نشان می‌دهد که چه مقدار خطا به‌طور متوسط در مورد داده‌های پیش‌بینی شده ایجاد شده است. حداقل مقدار RMSE صفر می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل مورد بررسی می‌باشد، که در این حالت مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده با هم برابر خواهد بود. معیار MAE مجموع تغییرات مطلق بین خروجی پیش‌بینی شده و خروجی واقعی را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار دقت روش و مقدار متوسط خطا را بیان می‌کند که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر NSE از $-\infty$ تا 1 متغیر است. مقادیر NSE کمتر از صفر، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها دقت چندانی ندارند و مدلی که به‌طور کامل شبیه‌سازی می‌شود، این مقدار برابر ۱ می‌شود. مقادیر R2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده می‌باشد. دامنه این پارامتر بین صفر و یک است، هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است (Sundararajan et al., 2021; Ershadfath et al., 2023).

نتایج و بحث

عملکرد مدل بیان ژن از طریق ارزیابی آماره‌های ارزیابی بهترین برازش (Best fitness)، RMSE، MAE، NSE و R^2 ارزیابی شد. در بهترین حالت (حالت آرمانی مدل) مقادیر BestFitness، RMSE، MAE، NSE و R^2 به‌ترتیب برابر ۱۰۰۰، صفر، صفر، ۱ و ۱ می‌باشند. جداول (۴)، (۵) و (۶) پارامترهای ارزیابی مدل بیان ژن را به‌ازای سناریوهای مختلف در در ایستگاه‌های مطالعاتی دو مرحله آموزش و آزمایش نشان می‌دهند.

جدول ۴. نتایج برنامه GEP برای سناریوهای مختلف در ایستگاه بیرجند

Table 4. GEP program results for different scenarios at the Birjand station

رتبه Rank	سناریو Scenario	آموزش Train				آزمایش Test			
		Best Fitness (mmd^{-1})	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})	Best Fitness	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})
۱	a	۷۸۶.۹۵	۰.۹۱	۰.۷۵	۰.۵۹	۷۸۷.۸۶	۰.۹۲	۰.۷۳	۰.۵۹
۳	b	۷۵۵.۹۲	۰.۹۰	۰.۸۵	۰.۷۱	۷۵۸.۳۴	۰.۹۱	۰.۸۵	۰.۷۰
۲	c	۷۸۵.۵۱	۰.۹۱	۰.۷۴	۰.۶۰	۷۹۳.۳۷	۰.۹۲	۰.۷۲	۰.۵۶
۴	d	۷۲۸.۴۶	۰.۸۲	۱.۰۸	۰.۸۱	۷۲۸.۹۱	۰.۸۲	۱.۰۷	۰.۸۲
۵	e	۶۸۱.۱۷	۰.۷۲	۱.۳۶	۱.۰۲	۶۸۱.۴۷	۰.۷۲	۱.۳۸	۱.۰۳
۶	f	۶۱۶.۳۵	۰.۵۱	۱.۷۷	۱.۳۷	۶۲۱.۰۷	۰.۵۴	۱.۶۸	۱.۳۳

جدول ۵. نتایج برنامه GEP برای سناریوهای مختلف در ایستگاه گرگان

Table 5. GEP program results for different scenarios at Gorgan station

Rank	Scenario	Train				Test			
		Best Fitness (mmd^{-1})	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})	Best Fitness	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})
۱	a	۶۹۶.۹۳	۰.۷۷	۰.۸۱	۰.۶۲	۶۸۹.۶۸	۰.۷۶	۰.۸۰	۰.۶۲
۲	b	۶۷۸.۶۰	۰.۷۶	۰.۸۷	۰.۶۸	۶۷۰.۸۴	۰.۷۲	۰.۸۸	۰.۶۷
۳	c	۶۲۰.۴۷	۰.۵۹	۱.۲۰	۰.۸۶	۶۱۷.۵۲	۰.۵۹	۱.۲۱	۰.۸۸
۴	d	۶۰۵.۴۳	۰.۵۶	۱.۰۹	۰.۹۱	۶۱۳.۴۷	۰.۵۸	۱.۰۹	۰.۹۲
۵	e	۶۰۴.۷۶	۰.۵۳	۱.۱۵	۰.۹۳	۵۹۶.۷۶	۰.۵۱	۱.۱۵	۰.۹۳
۶	f	۵۷۶.۹۲	۰.۳۹	۱.۳۱	۱.۰۵	۵۶۹.۱۰	۰.۳۶	۱.۳۰	۱.۰۴

جدول ۶. نتایج برنامه GEP برای سناریوهای مختلف در ایستگاه رشت

Table 6. GEP program results for different scenarios at Rasht station

رتبه Rank	سناریو Scenario	آموزش Train				آزمایش Test			
		Best Fitness (mmd^{-1})	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})	Best Fitness	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})
۳	a	۶۶۹.۰۲	۰.۷۲	۰.۷۱	۰.۵۷	۶۹۹.۴۳	۰.۷۲	۰.۷۲	۰.۵۶
۲	b	۶۷۹.۳۲	۰.۷۳	۰.۷۱	۰.۵۴	۶۷۴.۹۳	۰.۷۳	۰.۷۱	۰.۵۵
۱	c	۶۹۶.۱۰	۰.۷۷	۰.۶۶	۰.۵۰	۶۹۳.۶۴	۰.۷۸	۰.۶۵	۰.۵۰
۶	d	۵۹۶.۹۴	۰.۵۰	۱.۰۱	۰.۷۸	۶۰۵.۹۰	۰.۵۲	۰.۹۶	۰.۷۴
۴	e	۶۰۷.۷۱	۰.۵۳	۰.۹۳	۰.۷۴	۵۹۷.۵۷	۰.۴۹	۰.۹۶	۰.۷۶
۵	f	۶۰۶.۶۲	۰.۵۰	۰.۹۷	۰.۷۴	۶۰۸.۲۵	۰.۵۱	۰.۹۶	۰.۷۴

انتخاب بهترین مدل

از مقایسه نتایج آماره‌های ارزیابی مدل در سناریوهای مختلف در جداول (۴)، (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های بیرجند و گرگان، سناریوی a به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متری، ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع پیش‌بینی مطلوب‌تری را ارائه کرده است. همچنین سناریوی f دارای ضعیف‌ترین نتیجه می‌باشد (به‌دلیل در نظر نگرفتن پارامترهای ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع). از این‌رو می‌توان این چنین برداشت کرد که سناریوی a با توجه به بالا بودن ضریب تبیین، بهترین برازش و کم بودن مقادیر خطا، مدل مطلوب در ایستگاه‌های بیرجند و گرگان می‌باشد. در ایستگاه رشت با اقلیم بسیار مرطوب، سناریوی b به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای حداکثر دما، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متری، ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع پیش‌بینی مطلوب‌تری را نسبت به سایر سناریوها ارائه کرده است. در مقایسه با نتایج پژوهشگران دیگر، حقیقت‌جو و همکاران (Haghighatjou et al., 2017) به مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی- فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد تبخیر از تشتک در خراسان جنوبی پرداختند. مقایسه نتایج آزمون دو مدل نشان داد که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن کارایی بهتری نسبت به مدل عصبی- فازی در برآورد روزانه تبخیر از تشتک دارد. محمدرضاپور (Mohammadreazapour, 2017) به پیش‌بینی تبخیرتعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی- فازی پرداخته است. نتایج نشان داد که در همه ایستگاه‌ها مدل ماشین بردار پشتیبان در مرتبه اول و مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و در آخر مدل نرو فازی برای تخمین تبخیرتعرق پتانسیل ماهانه قرار دارند. ترائوره و همکاران (Traore et al., 2017) به پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع روزانه با استفاده از اطلاعات آب و هوا و برنامه‌نویسی بیان ژن در چین پرداختند. نتایج نشان داد که، بیان ژن توانایی خوبی برای پیش‌بینی تبخیرتعرق روزانه با کمترین خطا را داشته است. در نهایت، رابطه تبخیرتعرق مرجع روزانه به‌دست آمده از مدل GEP برای همه پارامترهای مورد استفاده برای ایستگاه بیرجند در سناریوی مطلوب (a) رابطه (۶)، برای ایستگاه گرگان در سناریوی (a) به‌صورت رابطه (۷) و همچنین برای ایستگاه رشت در سناریوی مطلوب (b) به‌صورت رابطه (۸) در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ می‌باشد.

$$ET_o = \mathrm{u}_2 + \frac{u_2^2}{\sqrt{G2C7}} + Arc\tan(\mathrm{G3C5} \times \mathrm{G3C8})^2 + T_{\max}{}^2 \quad (۶)$$

G2C7= 309.596270638142

G3C5= -7.95343791009247E-02

G3C8= 2.90134189886166E-02

$$ET_o = Arc\tan(\mathrm{u}_2) + Arc\tan((((\mathrm{T}_{\min}{}^2) + G2C1) - u_2)) +$$
$$Arc\tan(\mathrm{G3C4}) \times ((\mathrm{Arctan}(2\,\mathrm{T}_{\min})) / (\mathrm{Arctan}((\mathrm{RH} \times \mathrm{G3C6}) - \mathrm{n})) + \mathrm{Arctan}((\mathrm{G4C5} + (\mathrm{n} + \mathrm{T}_{\min})))$$

G2C1= 8413.94390697958

G3C4= -7.89875973082675E-03

G3C6= -0.791436506241035

G4C5= -21.3868774268162

$$ET_O = \sin(((A\ \mathrm{rctan}(\mathrm{T_{max}}) \times G1C2) + (G1C4)) + (\sin(G2C4) \times Arc\ \tan(T_{\max})) + (Arc\ \tan((u_2 + ((G3C3 + \mathrm{T_{min}}) \times (T_{\min} \times T_{mean})))) \times Arc\ \tan(T_{\min})) + (((\sqrt{(RH \times T_{mean})} \times \mathrm{Arctan}(\mathrm{T_{mean}})) \times (u_2)) / (\mathrm{RH} + \mathrm{T_{mean}})) \quad (۷)$$

G1C4= -8.49038666951506

G1C2= -29.8574901669362

G2C4= -8.40548280281991

G3C3= -2.94045838801233 (۸)

که در آن، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (ms^{-1})، RH رطوبت نسبی (درصد)، n ساعات آفتابی (hr)، T_{min} حداقل دما (°C)، T_{max} حداکثر دما (°C)، ET_o تبخیرتعرق مرجع روزانه (mmd^{-1}) و G2C7، G3C5، G3C8، G2C1، G3C4، G3C6، G4C5، G1C4، G1C2، G2C4 و G3C3 ثابت‌های عددی که به‌صورت تصادفی در هر یک از ژن‌های کروموزوم برازنده ایجاد شده، نشان داده شده است. این ثوابت به‌خاطر ایجاد عدد در معادله نهایی به وجود می‌آیند. به این صورت که اگر هر یک از ثوابت در معادله نهایی مسئله بیاید علاوه بر اعدادی که خود مسئله ایجاد می‌کند این اعداد نیز در ساده‌تر شدن معادله کمک می‌کنند. در پژوهش حاضر، از شاخص‌های آماری به‌منظور مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌های مختلف تبخیرتعرق مرجع استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که روش ایرماک-R_s در ایستگاه گرگان و رشت و روش هارگریوز در ایستگاه بیرجند در مقایسه با سایر روش‌ها هم‌بستگی بیشتری با روش پنمن- مونتیث- فائو دارد. همچنین، روش ایرماک-R_s و روش هارگریوز تبخیرتعرق مرجع را در ایستگاه‌های مطالعاتی با دقت بیشتری برآورد می‌کنند. بنابراین روش ایرماک-R_s و روش هارگریوز با مقدار R^2 بالا، NSE نسبتاً خوب و مقدار RMSE و MAE کمتر نسبت به سایر روش‌ها، می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش پنمن- مونتیث- فائو در مقیاس روزانه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای، بسیار مرطوب و خشک باشد. همچنین، روش‌های هارگریوز سامانی کمترین دقت را در برآورد تبخیرتعرق مرجع در همه ایستگاه‌ها داشته‌اند. پژوهشگرانی چون فیض‌اله‌پور و همکاران (Feizolahpour et al., 2017)، سبزواری و سعیدنیا (Sabzevari and Saeidinia, 2021) و سیاسر و هنر (Siasar and Honar, 2019) نیز به بررسی توانایی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد تبخیرتعرق دشت سیستان، اصفهان، کرج و بجنورد پرداختند. نتایج نشان که این مدل قابلیت خوبی برای مدل‌سازی میزان تبخیرتعرق دارد.

نتیجه‌گیری

شناخت صحیح نیاز آبی در مناطق مختلف جغرافیایی کشور در درجه اول به محاسبه درست تبخیرتعرق مرجع وابسته است. لذا هدف از این پژوهش مقایسه عملکرد روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و معادلات تجربی در پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع روزانه در اقلیم‌های مختلف از جمله اقلیم خشک، مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب می‌باشد. نتایج برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داد که، در ایستگاه‌های بیرجند و گرگان، سناریوی a به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متری، ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع پیش‌بینی مطلوب‌تری را ارائه کرده است. همچنین سناریوی f دارای ضعیف‌ترین نتیجه می‌باشد (به‌دلیل در نظر نگرفتن پارامترهای ساعات آفتابی و تبخیرتعرق مرجع). از این‌رو می‌توان این چنین برداشت کرد

جدول ۷. مقدار شاخص‌های آماری حاصله از مقادیر برآوردی تبخیرتعرق مرجع از مدل‌های مختلف

Table 7. Value of statistical indices derived from the estimated values of reference evapotranspiration from different models

ایستگاه Station	روش محاسبه* Calculation method	رتبه Rank	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MAE (mmd^{-1})	NSE
بیرجند Birjand	M	۲	۰.۹۱	۱.۲۸	۰.۹۱	۰.۸۶
	PT	۶	۰.۸۲	۲.۲۹	۲.۱۵	۰.۵۴
	FBC	۳	۰.۸۸	۱.۷۱	۲.۰۵	۰.۸۶
	H	۱	۰.۹۳	۰.۵۱	۱.۶۴	۰.۸۹
	HS	۷	۰.۵۲	۲.۹۵	۳.۶۲	۰.۳۰
	R_s	۴	۰.۸۷	۱.۸۲	۲.۹۱	۰.۷۵
	R_n	۵	۰.۸۵	۱.۹۲	۲.۰۲	۰.۶۴
گرگان Gorgan	M	۶	۰.۷۷	۲.۱۱	۲.۹۱	۰.۶۵
	PT	۴	۰.۸۷	۱.۴۴	۲.۲۱	۰.۷۳
	FBC	۵	۰.۸۳	۱.۹۷	۱.۹۰	۰.۴۹
	H	۳	۰.۸۸	۱.۱۳	۱.۲۳	۰.۸۱
	HS	۷	۰.۵۸	۲.۱۰	۶.۵۵	۰.۳۳
	R_s	۱	۰.۹۰	۰.۶۳	۰.۵۱	۰.۸۵
	R_n	۲	۰.۸۹	۰.۶۹	۰.۵۹	۰.۸۲
رشت Rasht	M	۴	۰.۷۷	۰.۹۱	۱.۲۴	۰.۵۹
	PT	۳	۰.۸۲	۰.۸۳	۱.۵۹	۰.۸۳
	FBC	۵	۰.۷۳	۱.۴۱	۱.۷۶	۰.۵۵
	H	۶	۰.۷۲	۵.۰۸	۴.۲۲	۰.۵۸
	HS	۷	۰.۶۷	۵.۶۲	۴.۸۲	۰.۴۲
	R_s	۱	۰.۸۶	۰.۹۲	۰.۵۹	۰.۸۱
	R_n	۲	۰.۸۳	۰.۷۲	۰.۸۴	۰.۷۱

*مک‌کینگ (M)، پریستلی تیلور (PT)، فائو بلانی کریدل (FBC)، پنمن-مونیث-فائو (FPM56)، هارگریوز (H)، هارگریوز سامانی (HS)، ایرماک (Rs) و ایرماک (Rn)

که سناریوی a با توجه به بالا بودن ضریب تبیین، بهترین برازش و کم بودن مقادیر خطا، مدل مطلوب در ایستگاه‌های بیرجند و گرگان می‌باشد. در ایستگاه رشت با اقلیم بسیار مرطوب، سناریوی b پیش‌بینی مطلوب‌تری را نسبت به سایر سناریوها ارائه کرده است. همچنین در این پژوهش، برای برآورد تبخیرتعرق مرجع روزانه از روش‌های تجربی (مک‌کینگ، پریستلی تیلور، فائو بلانی کریدل، پنمن- مونتیث-فائو، هارگریوز، هارگریوز سامانی، ایرماک- RS و ایرماک- Rn) استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش ایرماک-Rs در ایستگاه گرگان و رشت و روش هارگریوز در ایستگاه بیرجند در مقایسه با سایر روش‌ها همبستگی بیشتری با روش پنمن- مونتیث- فائو دارد. لذا، در مواقع فقدان تمامی پارامترهای لازم برای محاسبه تبخیرتعرق مرجع در ایستگاه‌های مطالعاتی می‌توان از روش‌های ایرماک-Rs و روش هارگریوز به‌عنوان روش‌های جایگزین مناسب استفاده شود.

منابع

Ahmadi, F., Ayshem, S., Khalili, K., & Behmanesh, J. (2015). Application of ANFIS and GP models to estimate monthly reference crop Evapotranspiration in Northwest of Iran,, *Journal of Water Research in Agriculture*, 29.2(2), 235-247. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.38287

Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., & Tsutsumi, A. (2006). Comparison of several reference

of gene expression programming (GEP) and neuro-fuzzy methods for estimation of pan evaporation (case study: South Khorasan Province), *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(4), 107-117. [In Persian].

Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6), 1132-1139. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733 9437(1994)120:6(1132

Karami, M., & Sayad Beyranvand, F. (2024). Ability of gene expression programming model to estimate reference evapotranspiration with minimal meteorological data, *Applied Research in Water Engineering*, *2*(1), 137-147. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2043340.1029

Khadempour, F., Akbarpour, A., Khashiei Siouki, A., & Rahnama, S. (2019). Comparison of gene expression planning method with experimental methods in predicting daily Reference evapotranspiration (Case study: Birjand city). First National Conference on New Modeling and Technologies in Water Management. [In Persian].

Khadempour, F., Khashaei Siouki, A., & Amir Abadizadeh, M. (2019b). Investigating the functioning of gene expression program planning for daily solar radiation across Iran,, *Journal of Climate Research,* 36, 43-56. [In Persian].

Kisi, O., Shiri, J., & Tombul, M. (2013). Modeling rainfall-runoff process using soft computing techniques, *Computers & Geosciences*, 51, 108–117. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.001

evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 66, 1, 1-14.

Alizadeh, A., Khamali, Gh., Khanjani, M. J., & Rahnavard, M. R. (2004). Evaluation of evapotranspiration evaluation methods in arid regions of Iran, *Journal of Geographical Research*, 73, 97-105. [In Persian].

Alizadeh, A. (2006). Design of irrigation systems, Vol 1, Astan Qods Razavi Publications. [In Persian].

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO).

Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1975). Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), *Rome.*.

Ershadfath, F., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M., & Eivind Olese, J. (2023). Combining bias correction methods for simulated temperature and precipitation by CMIP6 models in Hamedan-Bahar plain, *Journal of Watershed Management Res*earch, *14*(27), 75-85. [In Persian]. https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.75

Feizolahpour, F., Delavar, M., & Hesami Afshar, M. (2017). Evaluation and uncertainty analysis of reference crop evapotranspiration estimation using genetic programming, *Water and Soil Science*, *27*(4), 135-147. [In Persian].

Haghighatjou, P., Mohammadzadehshahroudi, Z., & Mohammadrezapour, O. (2017). Comparison

Engineering Civil.

Sabzevari. Y., & Saeidinia. M. (2021). Evaluation of experimental models and artificial intelligence in estimation of reference evapotranspiration (Case study: Boroujerd station). *Journal of Water and Soil Science*, 25(2), 237-253. [In Persian]. https://doi.org/20.1001.1.25386336.1401.11.36.2.4

Sabzevari, Y., Nasrollahi, A., Sharifipour, M., & Shahinejad, B. (2022). Application of multivariate regression and gene expression programming in modeling reference evapotranspiration (Case study: Khorramabad station), *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 35-48. [In Persian]. https://doi.org/10.22055/jise.2020.31583.1890

Siasar, H., & Honar, T. (2019). Application of Support vector machine, CHAID, and Random forest models, in estimating daily Reference evapotranspiration in northern Sistan and Baluchestan province, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 378-388. [In Persian]. https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.2.10.8

Sundararajan, K., Garg, L., Srinivasan, K., Bashir, A. K., Kaliappan, J., Ganapathy, G. P., Selvaraj, S. K., & Meena, T. (2021). A contemporary review on drought modeling using machine learning approaches, *Computer Modeling Engineering & Sciences,* 128(2), 447-487. https://doi.org/10.32604/cmes.2021.015528

Traore, S., Luo, Y., & Fipps, G. (2017). Gene-Expression programming for Short-Term forecasting of daily reference evapotranspiration using public weather forecast information, *Journal of Water Resources Management,* 31(15), 4891-4901. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1784-5

Makkink, G. F. (1975). Testing the Penman formula using lysimeters, *Journal of the Institution of Water Engineers,* 11, 277-288.

Mattar, M. A. (2018). Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: a case study in Egypt, *Agricultural Water Management*, 198, 28-38. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.017

Mohammadreazapour, O. (2017). Monthly forecast of potential evapotranspiration models using support vector vachine (SVM), Genetic programming, and Neural-Fuzzy inference system, *Journal of Irrigation and Water Engineering,* 7(27), 135-150.

Muzzammil, M., Alam, J., & Danish, M. (2015). Application of gene expression programming in flood frequency analysis, *Journal of Indian Water Resources Society,* 35(2), 1-6.

Priestley, C.H.B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100, 81-92. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

Roshangar, K., & Mirhydrian, S. (2014). Using Evolutionary Gene Expression Planning Method to Estimate Scalability of Bridge Stands in Non-Cohesive Beds Based on Laboratory and Field Data, Eighth National Congress of Civil Engineering.

Roshangar, K., Bonakdari, H., Akhgar, S., & Harsami, F (2016). Investigation of Gene Expression Programming (GEP) Performance in Predicting Energy Dissipation on Stairway Overflow in Skimming, 10th International Congress of

Valipour, M., Gholami Sefidkouhi, M. A., Raeini-Sarjaz, M., & Guzman, S. M. (2019). A hybrid Data-Driven machine learning technique for evapotranspiration modeling in various climates, Atmosphere,, *Atmosphere*, 10(6), 311. https://doi.org/10.3390/atmos10060311

Zahiri, J., & Moradi Sabzkouhi, A. (2023). Investigating the interaction effects of meteorological parameters on evaporation from the water surface using variance analysis, *Journal of Drought and Climate Change Research,* 1(3), 87- 104. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6498.1028