

Research Article

Estimating Pan Evaporation in Three Different Climates using Data-Driven Methods

M Izadyar¹, S Samadianfard^{2*}, A Majnooni Heris² and AA Sadraddini³

Received: November 20, 2022

Accepted: February 9, 2023

Revised: January 23, 2023

Published online: March 20, 2024

1- PhD candidate, Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

2- Assoc. Prof., Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

3- Prof., Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: s.samadian@tabrizu.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Evaporation is one of the most complex and important processes in studying hydrological and meteorological factors and plays a major role in determining the energy balance equations on the earth's surface. So, knowing the exact amount of evaporation volume is important for monitoring and correct management of water resources, irrigation planning, determining the irrigation needs, estimating evaporation from the reservoir of dams and modeling hydrological projects, especially in arid and semi-arid regions. On the other hand, modeling such a complex process in which many parameters interact with each other is so difficult that it is not possible to simplify this issue without multiple assumptions. Therefore, accurate estimation of evaporation has always been of great importance. Many experimental methods have been presented for estimating evaporation, but since these methods require a lot of input data or it is not possible to measure the variables in all areas, many of these methods have lost their effectiveness. Therefore, it is necessary to use methods which need fewer number of meteorological variables and estimate the evaporation with high accuracy. Therefore, the aim of the current research is to evaluate and present the most accurate model of evaporation estimation using three data-driven models in six synoptic stations in arid, semi-arid and humid climates of Iran, so that the proposed model, in addition to having sufficient accuracy, requires fewer input parameters to estimate evaporation even when there is no sufficient data.

Methodology

In this regard, the ability of three machine-learning methods of gradient boosted tree (GBT), generalized linear model (GLM) and artificial neural network-multi layer perceptron (MLP) in estimating the amount of pan evaporation in dry (Yazd and Bafq stations), semi-arid (Birjand and Siah-Bisheh stations) and humid climates (Sari and Ferdous stations) were investigated. Daily parameters of some meteorological variables on evaporation during the time period of 2001-2020 were collected. In order to investigate the possibility of using different combinations of meteorological parameters to estimate the evaporation as accurately as possible, six different combinations of the meteorological parameters (average temperature, relative humidity, and wind speed and sunshine hours) were considered. Also, to evaluate the accuracy of the mentioned models, four assessment criteria including root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), correlation coefficient (R) and scatter index (SI) were used. Furthermore, diagrams of time series of



the best models and the scatter plots diagram of observed and predicted pan evaporation by the models were presented and the most suitable combination of the meteorological parameters that had suitable accuracy for estimating pan evaporation was suggested.

Findings

The results showed that in Birjand, Yazd, Ferdos, and Siah-Bisheh stations, MLP-VI with RMSE of 1.97, 1.95, 1.97, 2.91, respectively, performed more accurate than other studied models. Moreover, in Sari station, MLP-IV and in Bafq station, MLP-V with RMSE of 1.41 and 1.92, respectively, provided the most precise estimates of evaporation values. Finally, it can be comprehended that in all six studied stations, MLP provided the most accurate estimations of the amount of pan evaporation and it is suggested as a method with high degree of accuracy. Furthermore, GBT presented the weakest performance in comparison with other studied models. The mentioned trend about the high accuracy of the mentioned models for all studied stations can also be concluded from presented figures. It can be inferred that the accurate models mentioned in each station had the least distribution around the bisector line and had the most accuracy and the least error. In other words, it is possible to estimate the evaporation values in all stations with the meteorological data of temperature, relative humidity, sunshine hours and wind speed with acceptable accuracy.

Conclusion

Evaporation is one of the main components of water balance in agriculture and is one of the effective and influential factors for suitable irrigation planning. Therefore, accurate estimation of this parameter has a significant role on reducing excessive water consumption. In this study, three data-driven models of MLP, GBT and GLM were implemented in six stations including Yazd, Birjand, Sari, Bafq, Siah-Bisheh and Ferdous. The obtained results indicated that the sixth scenario using all utilized meteorological parameters in Yazd, Birjand, Siah-Bisheh, and Ferdous stations, forth scenario in Sari and fifth scenario in Bafq station with the lowest error provided the most accurate estimates of the evaporation and may be recommended for proper estimation of pan evaporation values.

Keywords: Generalized linear model, Gradient boosting tree, Meteorological parameters, Multi-layer perceptron, Statistical analysis

مقاله پژوهشی

برآورد تبخیر از تشت در سه اقلیم متفاوت با استفاده از روش‌های داده محور

مجتبی ایزدیار^۱، سعید صمدیان فرد^{۲*}، ابوالفضل مجنونی هریس^۲ و علی اشرف صدرالدینی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.samadian@tabrizu.ac.ir

چکیده

تبخیر یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین فرآیندها در بررسی عوامل هیدرولوژیکی و هواشناسی بوده و نقش عمده‌ای در تعیین معادلات توازن انرژی در سطح زمین دارد. در این راستا و در پژوهش حاضر، توانایی سه روش داده محور درخت گرادیان تقویت شده، مدل خطی تعمیم یافته و پرسپترون چندلایه در برآورد مقدار تبخیر از تشت در سه اقلیم خشک (ایستگاه یزد و بافق)، نیمه خشک (ایستگاه بیرجند و سیاه‌بیشه) و مرطوب (ایستگاه ساری و فردوس) با استفاده از داده‌های هواشناسی به عنوان ورودی مدل مورد بررسی قرار گرفت. از بین متغیرهای موثر، چهار پارامتر دمای میانگین، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در دوره زمانی بیست ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) جمع‌آوری گردید. با توجه به متغیرهای ورودی و میزان همبستگی آن‌ها با پارامتر تبخیر، شش سناریو مختلف از متغیرهای هواشناسی انتخاب شده، تعریف گردید. همچنین برای ارزیابی دقت مدل‌های مذکور از چهار معیار ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب همبستگی و شاخص پراکندگی استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که در ایستگاه‌های بیرجند، یزد، مدل ششم روش پرسپترون چندلایه به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۷، ۱/۹۵، ۱/۹۷، در ایستگاه ساری مدل چهارم روش پرسپترون چندلایه با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۴۱، در ایستگاه سیاه‌بیشه مدل دوم روش پرسپترون چندلایه با مقدار خطای ۲/۹۱ و در ایستگاه بافق مدل پنجم روش پرسپترون چندلایه با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۲ بهترین عملکرد را در برآورد میزان تبخیر از تشت داشتند. در نهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، روش پرسپترون چندلایه دقیق‌ترین برآوردها را ارائه نمود و به عنوان روشی با دقت بالا پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: آنالیز آماری، پرسپترون چندلایه، درخت گرادیان تقویت شده، متغیرهای هواشناسی، مدل خطی تعمیم یافته.

مقدمه

جذر میانگین مربعات خطا) روش شبکه عصبی مصنوعی بهترین کارایی را دارا می‌باشد. قائمی و همکاران (۲۰۱۹) تبخیر از تشت را در دو شهر سیبیرت و دیاباکر ترکیه بصورت ماهانه با دو مدل درختی M5 و رگرسیون تطبیقی چند متغیره مورد بررسی قرار دادند. متغیرهای هواشناسی مورد استفاده در پژوهش ایشان شامل دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی بود. آنها برای ارزیابی مدل‌های مورد پژوهش از معیارهای آماری استاندارد همچون جذر میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی، ضریب نش ساتکلیف و میانگین خطای مطلق استفاده کرده و بیان داشتند که مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره در ایستگاه سیبیرت بهترین عملکرد را داشته و در ایستگاه دیاباکر نیز همین روش نسبت به مدل درخت M5 نتایج بهتری را حاصل نموده است. خورشید دوست و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی از دو روش هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی مصنوعی بر پایه دو الگوریتم آموزشی لوبنبرگ-مارکوت و الگوریتم ژنتیک و رگرسیون خطی چند متغیره) و معادله داده محور پنمن-فائو جهت برآورد قدرت تبخیر در سطح ایستگاه تبریز استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که جذر میانگین مربعات خطای شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی چندمتغیره و معادله پنمن-فائو به ترتیب به مقدار ۰/۷۹، ۰/۲۷ و ۱/۳۴ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین مدل شبکه عصبی در مقایسه با دو مدل مذکور دارای کارایی بهتر، ضریب دقت بیشتر و مقدار خطای کمتری جهت پیش‌بینی مقدار تبخیر ایستگاه تبریز است. میرمحمدصاقي و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی میزان تبخیر از مخزن و دریاچه سد زاینده‌رود با مساحت ۵۴ کیلومتر مربع را با استفاده از روش‌های تجربی مایر، مارسیانو، شاهتین، هنفر، ایوانف، تیچومیروف و روش سازمان عمران اراضی آمریکا مورد بررسی قرار دادند. به منظور ارزیابی دقت روش‌های مورد استفاده، نتایج به دست آمده در هر روش با مقادیر اندازه‌گیری شده تشت تبخیر در محوطه سد مقایسه کرده و بیان داشتند که هیچ یک از روش‌های تجربی، همبستگی مناسب و قابل قبولی با میزان تبخیر مشاهداتی ندارند. در مقابل، روش سبال علاوه بر

مدیریت منابع آب همواره بخشی از برنامه توسعه کشورها بوده و هر کشوری بر مبنای منابع در دسترس و میزان تبخیر، استراتژی خاصی را اجرا می‌کند. از طرفی تبخیر یکی از مهم‌ترین فرآیندها در بررسی عوامل هیدرولوژیکی، هواشناسی و حفاظت آب و خاک بوده و نقش عمده‌ای در تعیین معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب دارد. لذا آگاهی از مقدار دقیق حجم تبخیر برای آبیاری، مدیریت صحیح منابع آب، برنامه‌ریزی شیوه‌های آبیاری، تعیین نیاز آبیاری گیاهان، تخمین تبخیر از مخزن سدها و مدل‌سازی پروژه‌های هیدرولوژیکی در تمامی مناطق به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک حائز اهمیت می‌باشد. اندازه‌گیری این متغیر در ایستگاه‌های هواشناسی با استفاده از تشت تبخیر صورت می‌پذیرد. تشت تبخیر دارای انواع مختلفی می‌باشد، تشت تبخیر کلاس A یکی از ابزارهای استاندارد می‌باشد که در ایستگاه‌های هواشناسی ایران نیز از همین نوع تشت تبخیر استفاده می‌شود. اما امکان اندازه‌گیری میزان تبخیر از تشت در همه ایستگاه‌ها و تمامی نقاط کشور امکان‌پذیر نیست. از طرفی روابط تجربی نیز از دقت کافی برای برآورد این پدیده برخوردار نیستند، همچنین دسترسی به تمام پارامترهای ورودی این روابط مشکل و یا اندازه‌گیری آنها محتاج صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد. در دهه‌های اخیر روش‌های داده محور توانایی بالایی در تخمین و پیش‌بینی پدیده‌های غیرخطی از خود نشان دادند. براین اساس پژوهشگران در دهه‌های اخیر از انواع این روش‌ها در مدل‌سازی مسائل کشاورزی و زیست محیطی استفاده می‌کنند. افخمی و همکاران (۲۰۱۹) میزان تبخیر ماهانه را در ایستگاه سینوپتیک یزد با هشت متغیر هواشناسی ورودی برای سه مدل شبکه عصبی مصنوعی، شبکه‌های استنتاج فازی و درخت تصمیم رگرسیونی مورد بررسی قرار داده و نتیجه به دست آمده بیانگر این بود که هر سه روش مذکور دارای قابلیت کافی برای انجام مدل‌سازی هستند، اما با توجه به معیارهای ارزیابی استفاده شده در پژوهش (ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و

دارای بالاترین دقت بود. علاوه بر این، در بین روش‌های داده‌کاوی نیز روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان در ایستگاه‌های تبریز، سراب و هریس و روش رگرسیون فرآیند گاوسی، در ایستگاه‌های بستان‌آباد و مراغه در مقایسه با سایر روش‌ها دقت بالاتری داشتند. به‌طور کلی در تمام ایستگاه‌ها دقت بهترین سناریوی روش‌های داده‌کاوی بالاتر از بهترین روش تجربی بود. همچنین، علی‌رغم دقت پایین روش نزدیک‌ترین همسایگی نسبت به سایر روش‌های داده‌کاوی، این روش با متغیرهای ورودی کمتری به بالاترین دقت خود در مدل‌سازی تبخیر می‌رسد. شرفی و صمدیان‌فرد (۲۰۲۱) در پژوهشی توانایی مدل‌های هوش مصنوعی پرسپترون چندلایه، رگرسیون بردار پشتیبان و مدل ترکیبی رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم کرم شب-تاب در برآورد تبخیر روزانه را در ایستگاه تکاب، با استفاده از چهار معیار آماری مورد ارزیابی قراردادند. در هر سه مدل مورد مطالعه، سناریوی برتر مدلی بود که ورودی آن شامل پارامترهای میانگین دما، حداقل دما، حداکثر دما، رطوبت نسبی متوسط، حداقل رطوبت نسبی، حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بود. همچنین نتایج به-دست آمده نشان داد که سناریو ششم مدل رگرسیون بردار پشتیبان بهترین عملکرد را نسبت به تمامی مدل‌ها ارائه داد. همچنین سناریو ششم مدل پرسپترون چندلایه بهترین عملکرد را داشته و نیز الگوریتم هیبریدی کرم شب‌تاب باعث بهبود عملکرد رگرسیون بردار پشتیبان در برآورد تبخیر روزانه شد. در پژوهشی که در سه ایستگاه سینوپتیک استان گیلان (کلاله، گرگان و بندر ترکمن) در رابطه با تخمین میزان تبخیر از سطح آزاد آب انجام گرفت؛ فراستی و همکاران (۲۰۲۱) کارایی مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان را با متغیرهای هواشناسی ۱۷ ساله ارزیابی کردند. نتایج نشان داد بین الگوهای ورودی به مدل‌های داده‌کاوی مورد استفاده، سناریو ۱۶ با پارامترهای ورودی رطوبت نسبی کمینه و بیشینه، سرعت باد و ساعات

نمایش توزیع مکانی تبخیر در سطح مخزن، دارای دقت بالایی در تخمین تبخیر آب نسبت به روابط تجربی در برآورد حجم تبخیر سطحی آب از مخازن است. وو و همکاران (۲۰۲۰) مدل ماشین یادگیری شدید^۱ را با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ و گرده افشانی گل برای تخمین میزان تبخیر ماهانه در حوضه دریاچه پویانگ چین مورد پژوهش قرار دادند. آنها از پارامترهای اقلیمی حداکثر و حداقل دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، سرعت باد و تبخیر از تشت سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۱ استفاده کرده و نتایج حاصل از دو الگوریتم را با مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و درخت M5 مقایسه نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل ماشین یادگیری هیبریدی با الگوریتم گرده افشانی گل بالاترین دقت پیش‌بینی را در هر چهار ایستگاه مورد مطالعه دارد و پس از آن مدل ماشین یادگیری هیبریدی با الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ دارای کمترین خطا می‌باشد که هر دو مدل نسبت به سایر مدل‌های سنتی برتری داشتند. ماژی و نایدو (۲۰۲۰) در پژوهشی میزان تبخیر از تشت را بصورت روزانه در منطقه شرق هندوستان با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی پیوند عملکردی (FALNN^۲) مدل‌سازی کردند. ایشان نتایج حاصل را با شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه (MLANN^۳) و دو روش تجربی مقایسه نمودند و بیان داشتند که تخمین تبخیر از تشت با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی پیوند عملکردی بهترین نتیجه را حاصل کرده است. مونس خواه و همکاران (۲۰۲۰) کارایی روش‌های تجربی مبتنی بر دما-تشنشع و مدل‌های داده‌کاوی رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون فرآیند گاوسی و نزدیک‌ترین همسایگی را تحت ۱۰ سناریو ورودی مختلف از متغیرهای هواشناسی در پیش‌بینی و برآورد تبخیر از تشت در شرق حوضه دریاچه ارومیه بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بین متغیرهای هواشناسی مورد بررسی، دما بیشترین و سرعت باد و بارش کمترین تأثیر را در مدل‌سازی دارند. همچنین در بین روش‌های تجربی، روش جنسن-هیز

³ Multi-layer artificial neural networks

¹ Extreme learning machine

² Functional link artificial neural network

پژوهشگران انجام شده است که نیازمند متغیرهای هواشناسی زیادی می‌باشند تا تخمین قابل قبولی با خطای کمتر ارائه دهند. لذا هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی و ارائه مدل برتر برآورد تبخیر با بهره‌گیری از سه مدل داده محور درخت گرادیان تقویت شده (GBT)، مدل خطی تعمیم یافته (GLM) و روش پرسپترون چند لایه (MLP) در شش ایستگاه سینوپتیک در اقلیم‌های خشک، نیمه خشک و مرطوب ایران می‌باشد بطوری‌که مدل پیشنهادی علاوه بر دارا بودن دقت کافی نیازمند پارامترهای ورودی کمتری باشد تا در هنگام نبود داده کافی نیز، تخمین تبخیر امکان‌پذیر گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

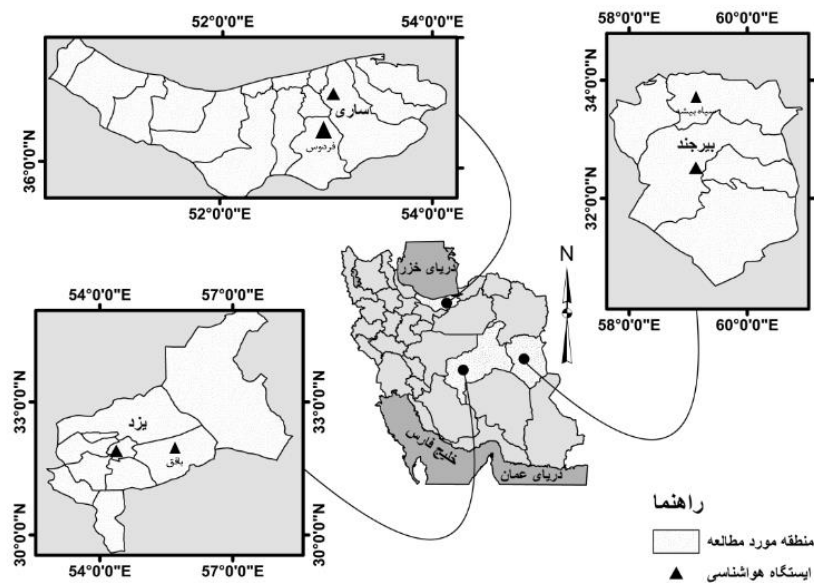
در پژوهش حاضر، منطقه مورد شامل ایستگاه‌های یزد، بافق، بیرجند، فردوس، ساری و سیاه‌بیشه می‌باشد. شهرستان یزد واقع در فلات مرکزی ایران و مرکزیت استان یزد با میانگین بارش ۵۰ میلیمتر در سال و وسعت ۱۴۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۵۴/۳۵ درجه شرقی، عرض ۳۱/۸۸ درجه شمالی و ارتفاع ۱۲۳۰ متر از سطح دریا قرار دارد. همچنین، ایستگاه بافق در استان یزد با ارتفاع ۹۹۵ متر از سطح دریا در موقعیت جغرافیایی طول جغرافیایی ۵۴/۴ درجه شرقی، عرض ۳۱/۵۸ درجه شمالی واقع شده است. بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی با وسعت ۳۵ کیلومتر مربع و میانگین بارش سالیانه ۱۷۱ میلیمتر سومین ایستگاه مورد پژوهش می‌باشد. ایستگاه بیرجند در ۵۱/۹۸ درجه طول جغرافیایی و ۳۲/۸۷ درجه عرض جغرافیایی و ارتفاع ۱۴۷۰ متر از سطح دریا در شمال شرق کشور واقع شده است. علاوه بر این، شهرستان فردوس واقع در استان خراسان جنوبی با مساحت ۵۱۰۰ کیلومترمربع در ۵۱/۱۸ درجه طول جغرافیایی و ۳۴/۰۳ درجه عرض جغرافیایی و ارتفاع ۱۲۹۳ متر از سطح دریا چهارمین ایستگاه مورد پژوهش می‌باشد. شهرستان ساری واقع در استان مازندران با بارش سالانه ۷۸۰ میلیمتر و مساحت ۳۵ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۵۳/۰۸ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶/۰۷ درجه شمالی

آفتابی دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین جذر میانگین مربعات خطا بود. مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان در ایستگاه بندر ترکمن دارای بهترین پیش‌بینی نسبت به دو ایستگاه دیگر بوده است. همچنین در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان دارای ضریب همبستگی بیشتر و جذر میانگین مربعات خطای کمتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان بوده است. قمرنیا و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده ترکیبی از الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی و با استفاده از پنج تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، میزان تبخیر روزانه از سطح دریاچه سلیمان شاه را محاسبه کردند. نتایج به‌دست‌آمده با میزان تبخیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که از میان روش‌های ترکیبی، روش پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶، از بین سایر روش‌ها، روش بلانی کریدل بیش‌ترین همخوانی و روش هنفر با کم‌ترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. سیف‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی میزان تبخیر روزانه از تشتت کلاس A در ایستگاه سینوپتیک تبریز را با استفاده از روش‌های داده‌کاوی رگرسیون بردار پشتیبان، رگرسیون فرآیند گاوسی، مدل درختی M5، جنگل تصادفی و رگرسیون خطی برآورد کردند. ایشان از ۱۰ سناریو ترکیبی متفاوت بر اساس همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و تبخیر برای واسنجی و صحت سنجی روش‌های مورد مطالعه استفاده کردند. نتایج بررسی‌های آماری نشان داد که در ایستگاه تبریز، مقادیر تخمینی تبخیر روش رگرسیون فرآیند گاوسی و روش رگرسیون بردار پشتیبان از عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی مقدار تبخیر روزانه از تشتت کلاس A برخوردار بوده‌اند. در نهایت برای ایستگاه هواشناسی تبریز، مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، رگرسیون فرآیند گاوسی برای سناریو شماره ۱۰ با همه متغیرها و دارا بودن بهترین عملکرد، به‌عنوان مدل‌هایی با دقت مناسب پیشنهاد گردید.

اغلب پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه برآورد تبخیر یا با استفاده از معادلات تجربی می‌باشد که دقت بالایی ارائه نمی‌دهند و یا با روابط غیرخطی پیشنهادی توسط

و مرتوب می‌باشند. شکل ۱ موقعیت شش ایستگاه مورد مطالعه را بر روی نقشه نشان می‌دهد. در این مطالعه، از متغیرهای هواشناسی دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی (درصد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و ساعات آفتابی شش ایستگاه یزد، بافق، بیرجند، فردوس، ساری و سیاه‌بیشه در بازه زمانی بیست ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) استفاده شد. جدول ۱ مشخصات متغیرهای هواشناسی ایستگاه‌های مورد پژوهش را نشان می‌دهد.

و ارتفاع ۲۳ متر از سطح دریا، پنجمین ایستگاه مورد مطالعه بوده و در نهایت ایستگاه سیاه‌بیشه واقع در استان مازندران با طول جغرافیایی ۵۱/۳ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶/۲۳ درجه شمالی و ارتفاع ۱۸۵۵ متر از سطح دریا آخرین ایستگاه انتخابی پژوهش حاضر می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده با استفاده از ضریب اقلیم نمای دومارتن ایستگاه‌های مورد پژوهش (یزد، بافق، بیرجند، فردوس، ساری و سیاه‌بیشه) به ترتیب دارای اقلیم خشک، نیمه خشک



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد پژوهش.

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
بیرجند	دما (°C)	۰/۶۰	۳۴/۵۰	۲۱/۶۲	۶/۴۲
	رطوبت نسبی (/)	۰/۰۰	۱۱/۳۸	۳/۱۳	۱/۵۰
	سرعت باد (m s ⁻¹)	۴/۸۷	۹۵/۵۰	۲۶/۱۴	۱۳/۴۰
	ساعات آفتابی	۰/۰۰	۱۳/۷۰	۱۰/۲۳	۲/۶۶
	بخیر از تشت (mm)	۰/۱۰	۴۵/۲۰	۱۰/۷۷	۴/۶۱
	یزد	دما (°C)	۰/۵۰	۳۸/۴۰	۲۳/۴۱
رطوبت نسبی (/)		۰/۲۵	۸/۲۵	۲/۶۶	۱/۰۰
سرعت باد (m s ⁻¹)		۳/۷۵	۹۵/۸۷	۲۳/۱۸	۱۶/۰۹
ساعات آفتابی		۰/۰۰	۱۳/۵۰	۹/۷۴	۲/۷۲
بخیر از تشت (mm)		۰/۱۰	۴۱/۵۰	۱۰/۴۰	۵/۰۲
ساری		دما (°C)	-۰/۳۰	۳۲/۰۰	۱۷/۴۹
	رطوبت نسبی (/)	۰/۰۰	۷/۳۵	۱/۵۱	۰/۸۹
	سرعت باد (m s ⁻¹)	۲۹/۰۰	۹۹/۳۷	۷۷/۸۶	۹/۴۰
	ساعات آفتابی	۰/۰۰	۱۳/۱۰	۵/۵۶	۴/۰۹
	بخیر از تشت (mm)	۰/۰۰	۱۱/۷۰	۳/۰۹	۲/۲۷
	دما (°C)	-۱۲/۸	۳۷/۰۰	۱۸/۵۴	۹/۸۲

۱/۰۸	۲/۶۷	۸/۸۰	۰/۰۰	رطوبت نسبی (/)	فردوس
۱۸/۲۵	۳۳/۵۰	۹۸/۲۵	۶/۳۷	سرعت باد ($m s^{-1}$)	
۳/۳۴	۹/۲۹	۱۴/۳۰	۰/۰۰	ساعات آفتابی	
۶/۱۰	۷/۷۷	۲۳/۷۰	۰/۰۰	بخیر از تشت (mm)	سیاه‌بیشه
۱/۷۱	۱۰/۵۵	۲۸/۹۰	-۱۳/۹۰	دما ($^{\circ}C$)	
۷/۸۴	۲/۵۰	۱۶/۰۰	۰/۰۰	رطوبت نسبی (/)	
۲۲/۹۱	۶۰/۹۸	۱۰۰/۰۰	۷/۶۲	سرعت باد ($m s^{-1}$)	بافق
۳/۴۸	۵/۳۱	۱۲/۴	۰/۰۰	ساعات آفتابی	
۲/۶۹	۲/۴۴	۳۹/۴۰	۰/۰۰	بخیر از تشت (mm)	
۹/۹۱	۲۲/۷۸	۴۱/۷۰	-۳/۵۰	دما ($^{\circ}C$)	بافق
۱/۷۲	۲/۸۸	۱۲/۲۵	۰/۰۰	رطوبت نسبی ($m s^{-1}$)	
۱۵/۴۳	۲۵/۰۵	۹۹/۳۸	۴/۱۲	سرعت باد	
۴/۵۸	۷/۶۲	۱۳/۵۰	۰/۰۰	ساعات آفتابی	
۶/۶۴	۹/۴۸	۴۷/۴۰	۰/۰۰	تبخیر از تشت	

مدل درخت گرادیان تقویت شده (GBT⁴)

روش درخت گرادیان تقویت شده یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری ماشینی است و در بسیاری از مجموعه داده‌ها کاربرد داشته و دقت قابل قبولی را ارائه کرده است. الگوریتم مذکور بر این اساس می‌باشد که هنگام پیش‌بینی موارد پیچیده، نتایج حاصل از ادغام تصمیم چندین درخت، برتر از نتیجه حاصله از یک درخت خاص خواهد بود. در این روش درخت‌های تصمیم می‌توانند با استفاده از ویژگی داده‌های ارائه شده مقادیر هدف را پیش‌بینی کنند، به طوری که در هر مرحله هر درخت زیرمجموعه برای بار اول با استفاده از داده‌هایی که به اشتباه توسط درخت پیشین پیش‌بینی شده‌اند، آموزش داده می‌شوند. همین امر موجب تمرکز بیشتر مدل بر روی موارد پیچیده شده و بنابراین دقت روش افزایش پیدا می‌کند. درختان گرادیان تصمیم گیرنده، بر خلاف مدل‌های خطی مانند رگرسیون لجستیک، تغییرات غیرخطی و متقاطع را در ویژگی‌های ورودی بیشتر می‌توانند اعمال کنند. به ویژه به دلیل پیکربندی سلسله مراتبی، آنها مقیاس پذیرتر و قوی‌تر در پیدا کردن نقاط پرت و دارای توانایی زیاد در شبیه‌سازی مرزهای تصمیم‌گیری غیر خطی به طور طبیعی هستند.

با فرض این‌که N تعداد نمونه‌ها باشد، $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$

x_i بیانگر یک نمونه و y_i بیانگر نشانه نمونه خواهد بود. اگر تابع $F(x)$ یک رابطه خطی منفرد بین درختان تصمیم باشد، برای هر نمونه x_i ، $F(x_i)$ تابع طبقه‌بندی شده (درخت تصمیم نام) برای x_i و $L(y_i, F(x_i))$ یک تابع ضرر مابین $F(x_i)$ و y_i می‌باشد. هدف در مدل درخت گرادیان تقویت شده آموزش یک تابع ایده‌آل $F(x)$ می‌باشد، بطوریکه از مقدار عبارت $L(y, F(x))$ به ازای تابع ضرر مشخص $L(y, F(x))$ کاسته شود. برای انجام این کار مدل درخت گرادیان تقویت شده ابتدا برای تابع $F_0(x)$ توسعه پیدا می‌کند، سپس بطور مکرر تعداد m درخت جدید ایجاد می‌کند. در هر تکرار، درخت‌های جدید $h(x)$ به هم متصل شده تا مقدار باقیمانده‌های حاصله از تابع ضرر $L(y, F(x))$ را کاهش دهند. بنابراین می‌توان رابطه تابع ایده‌آل $F^*(x)$ موجود در مدل درخت گرادیان تقویت شده را بصورت رابطه ۱ بیان نمود.

$$F^*(x) = F_0(x) + v * \sum_{t=1}^m P_t * h_t(x) \quad [1]$$

در رابطه فوق m بیانگر تعداد تکرار، $0 < v < 1$ نشان‌دهنده پارامتر کاهش است که نرخ یادگیری مدل را تنظیم می‌کند. $h(x)$ نشان‌دهنده تکرار در درخت t ام و P_t مقدار وزن تابع $h(x)$ می‌باشد (شادکانی و همکاران ۲۰۲۱).

مدل خطی تعمیم یافته (GLM⁵)

⁵ Generalized linear model

⁴ Gradient boosted tree

در مرحله دوم ایشان مقادیر توزیع الگوریتم گاما را با مقدار بارش در روزهای مرطوب مطابقت دادند. مقدار بارندگی در روز مرطوب λ_m و به طبع آن مقدار پیش‌بینی آن G_i از مجموعه داده‌های موجود برای توزیع گاما با میانگین M_i در نظر گرفته شد، بطوری‌که:

$$\ln_i = G_i Y \quad [4]$$

متغیر شکلی توزیع‌های گاما برای همه داده‌های موجود در مجموعه یکسان فرض و با ν نشان داده شد. این مورد بر این فرض استوار است که مقادیر بارندگی روزانه دارای یک ضریب تغییر ثابت باشند.

مدل شبکه عصبی مصنوعی-پرسپترون چند لایه (MLP⁶)

روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN⁷) یک مدل محاسباتی و مکانیزم شبیه‌سازی داده قوی می‌باشد که در پژوهش‌های هیدرولوژیکی کاربرد وسیعی دارد. شبکه عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از گره (نرون) های جمع‌آوری شده هستند که در چندین لایه سازماندهی شده و از طریق وزن‌ها به هم متصل می‌شوند. هر یک از آرایش‌های شبکه عصبی ساده شامل سه لایه است: لایه ورودی (داده‌های ورودی/اطلاعات)، لایه/لایه‌های پنهان و لایه خروجی (داده-های محاسباتی / بازده مدل). فرآیند مدل‌سازی در این روش بدین صورت انجام می‌پذیرد که اطلاعات ورودی به لایه ورودی ارائه می‌شود؛ این اطلاعات به لایه‌های پنهان هدایت شده و توسط نرون‌ها محاسبات بر روی داده‌ها اعمال می‌گردد. در نهایت داده‌های محاسبه شده در لایه خروجی نمایان می‌شود. سایر نرون‌های ساده، ورودی‌های زیادی را به نرون‌هایی که دارای شبکه وزنی هستند ارسال می‌کنند. هنگامی که تعداد داده‌های ورودی وزن‌دار به یک مقدار معین رسید؛ استدلالی برای یک تابع انتقال ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، یک تابع مماس خطی، لجستیک و یا

مدل‌های خطی تعمیم یافته به‌طور کلی ابزارهایی تحلیلی برای انواع داده‌های مختلف هستند. این مدل برای اولین بار توسط چندلر و ویاتر (۲۰۰۲) برای موضوعات هیدرولوژی بکار گرفته شد. ایشان بیان داشتند که بطور معمول در محاسبه مدل رگرسیون تعمیم یافته یک متغیر تصادفی از مجموعه $Y=(Y_1, \dots, Y_n)$ به متغیر P پیش‌بینی بستگی دارد (مقادیر آن را می‌توان در یک ماتریس X به تعداد متغیر $n \times p$ جمع کرد که عنصر (i,j) مقدار پیش‌بینی کننده Y_i برای Y_i است)، بطوریکه از یک توزیع احتمال برای Y ، با میانگین بردار $M=(M_1, \dots, M_n)$ تشکیل شده است به گونه‌ای که

$$g(M)=Xb \quad [2]$$

در معادله فوق $g(M)$ یک تابع یکنواخت و متغیر b یک بردار از ضرایب $1 \times p$ می‌باشد (منظور از $g(M)$ یک بردار $1 \times n$ می‌باشد که عنصر λ_m آن با $g(m_i)$ مشخص شده است). رابطه ۲ حالت توسعه یافته از مدل رگرسیون خطی ساده می‌باشد. عبارت ثابت مدل را می‌توان با جایگذاری در ستون اول ماتریس X مشخص کرد. هنگامی که Y_i به عنوان یک یا چند سری زمانی در مدل تعریف می‌شوند، مقادیر سری قبلی را به عنوان متغیرهای پیش‌بینی وارد مدل می‌شوند، هر مقدار Y در سری‌های قبلی را به طور توزیع ضمنی شرطی بررسی کرده و روش معمول GLM به طور مستقیم ادامه می‌یابد. کوو و استرن (۱۹۸۲) و کوو و استرن (۱۹۸۴) به عنوان توسعه دهندگان این مدل، رویکرد دو مرحله‌ای را اتخاذ کردند. ایشان در مرحله اول در منطقه الگوی کشت روزهای خشک و مرطوب را با استفاده از رگرسیون لجستیک مدل‌سازی کردند و بیان داشتند که اگر متغیر P_i را به عنوان احتمال بارش روز λ_m در مجموعه داده‌ها با متغیر پیش‌بینی X_i در نظر گرفته شود، مدل از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\ln \left(\frac{P_i}{1-P_i} \right) = X_i B \quad [3]$$

⁷ Artificial neural network

⁶ Multi-Layer Perceptron

نرون‌های لایه ورودی، B_j مقدار تمایل^{۱۱} نرون‌ها در لایه پنهان، B_k مقدار تمایل نرون‌ها در لایه خروجی، F تابع انتقال و در نهایت Y نشان دهنده تابع خروجی می‌باشد.

معیارهای ارزیابی

به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی روش‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، فاکتورهای ضریب همبستگی (R^{11})، شاخص پراکندگی (SI^{12})، میانگین خطای مطلق (MAE^{13}) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^{14}$) با روابط زیر استفاده گردید.

$$R = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i)}{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2)} \quad [6]$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}_i} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}_i} \quad [7]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad [8]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [9]$$

در روابط ۶ تا ۹، x_i مقادیر مشاهداتی تبخیر، y_i مقادیر محاسباتی تبخیر از طریق مدل‌های مورد پژوهش، n تعداد داده‌ها و \bar{x}_i میانگین مقادیر مشاهداتی تبخیر می‌باشد.

نتایج و بحث

به منظور بررسی امکان استفاده از ترکیب‌های متفاوتی از داده‌های هواشناسی، استفاده از متغیر کمتر و دستیابی به تخمین درستی از مقدار تبخیر، ضریب همبستگی برخی از متغیرهای موثر در پدیده تبخیر بررسی و نتایج در جدول ۲ ارائه گردید.

هذلولی که به‌طور متوالی آخرین خروجی نرون را می‌سازد (طالب زاده و همکاران ۲۰۰۹).

در سال‌های اخیر مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به‌طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده استفاده می‌شود، زیرا نیازی به آمار جامع درباره‌ی روند فیزیکی سیستم ندارد. روش معمول ANN در تحقیقات هیدرولوژیکی مدل پرسپترون چندلایه (MLP) است. روش پرسپترون چندلایه یک مدل تغییر یافته و چند منظوره از روش ANN است که از یک لایه ورودی، چند لایه پنهان و یک لایه خروجی منفرد تشکیل شده است (رای و همکاران ۲۰۰۵). در حالت کلی انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی بر اساس جهت انتقال و پردازش داده‌ها به دو دسته کلی تقسیم مدل‌های شبکه‌های پیش‌خور^۸ و پس‌رو^۹ تقسیم می‌شوند که پرسپترون‌های چندلایه بخشی از یک شبکه پیش‌خور هستند. مطالعات نشان داده است که شبکه‌های MLP با لایه‌های پنهان به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، همچنین شبکه‌های MLP توانایی و دقت بالایی در تخمین توابع غیرخطی دارند (هورنیک و همکاران ۱۹۸۹). مدل پرسپترون چندلایه را می‌توان به صورت ریاضی طبق رابطه ۵ بیان کرد.

$$Y = F\left(\sum_{j=1}^m W_{kj} \cdot F\left(\sum_{i=1}^n W_{ji} X_i + B_j\right)\right) + B_k \quad [5]$$

در رابطه فوق W_{ji} وزن بین لایه‌های پنهان و لایه‌های ورودی، W_{kj} وزن بین لایه‌های پنهان و لایه‌های خروجی، X_i متغیرهای ورودی، m تعداد نرون‌های لایه پنهان، n تعداد

¹¹ Correlation coefficient

¹² Scatter index

¹³ Mean absolute error

¹⁴ Root Mean Square Error

⁸ feed-forward

⁹ backward

¹⁰ bias amount

جدول ۲- مقادیر ضریب همبستگی ارتباط متغیرهای هواشناسی با تبخیر در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	دمای متوسط	رطوبت نسبی	ساعات آفتابی	سرعت باد
بیرجند	۰/۸۴	-۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۳
ساری	۰/۷۵	-۰/۵۰	۰/۴۲	۰/۱۰
یزد	۰/۸۷	-۰/۶۷	۰/۵۳	۰/۳۸
فردوس	۰/۹۰	۰/۳۲	-۰/۷۱	۰/۵۶
سیاه‌بیشه	۰/۷۳	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۴۷
بافق	۰/۸۸	۰/۱۳	-۰/۶۴	۰/۲۴

با استفاده از نتایج ارائه شده در جدول ۲، شش سناریو با لحاظ یک الی چهار متغیر مذکور بعنوان ورودی مدل‌های مورد مطالعه تعریف گردید (جدول ۳). معیار انتخاب این متغیرها برای هر سناریو بیشتر بودن ضریب همبستگی آن‌ها با میزان تبخیر می‌باشد. سپس

ترکیب‌های تعریف شده به عنوان ورودی در سه مدل درخت گرادیان تقویت شده، مدل خطی تعمیم یافته و مدل پرسپترون چندلایه در نظر گرفته شد و میزان تبخیر با هریک از این مدل‌ها محاسبه گردید.

جدول ۳- ترکیب‌های مختلف متغیرهای ورودی برای مدل‌های استفاده شده.

شماره ترکیب	متغیرهای ورودی	متغیر خروجی
۱	دما	تبخیر
۲	دما و رطوبت نسبی	تبخیر
۳	دما و ساعات آفتابی	تبخیر
۴	دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی	تبخیر
۵	دما، رطوبت نسبی و سرعت باد	تبخیر
۶	دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد	تبخیر

نتایج حاصله از هرسه مدل با کاربرد شاخص‌های آماری در هریک از ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴).

مربعات خطای ۲/۰۱، میانگین خطای مطلق ۱/۵۲، شاخص پراکندگی ۰/۱۸ و ضریب همبستگی ۰/۹۱ پس از سناریو ششم دارای کمترین مقدار خطا نسبت به سایر مدل‌ها در این روش بود.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۴ در ایستگاه بیرجند سناریو ششم مدل پرسپترون چندلایه با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۷، میانگین خطای مطلق ۱/۴۸، شاخص پراکندگی ۰/۱۸ و در نهایت ضریب همبستگی ۰/۹۱ و با بکارگیری تمامی متغیرها (دمای میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در ورودی مدل بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مختلف روش شبکه عصبی مصنوعی به خود اختصاص داد. از سوی دیگر در رتبه دوم، سناریو پنجم این مدل با دارا بودن جذر میانگین

همچنین نتایج بدست آمده از روش درخت گرادیان تقویت شده بیانگر این بود که سناریو ششم این مدل نیز با دارا بودن حداقل جذر میانگین مربعات خطا (۲/۵۶)، کمترین میانگین خطای مطلق (۲/۰۴)، کمترین شاخص پراکندگی داده (۰/۲۳)، و بیشترین میزان همبستگی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی (۰/۹۱) در ایستگاه بیرجند بهترین عملکرد را دارد؛ اما از آنجایی که در این سناریو از تمامی داده‌های منتخب موثر بر تبخیر استفاده شده است، می‌توان با قبول

یافته نشان داد که ترکیب داده ششم با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۲/۱۳، میانگین خطای مطلق ۱/۶۱، شاخص پراکندگی داده ۰/۱۹ و ضریب همبستگی ۰/۹۰ از بین سناریوهای موجود در روش مذکور بهترین عملکرد حاصل شد.

اندکی خطا برای محاسبه تبخیر از سناریو پنجم این روش که تنها سه متغیر دارد با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۶۳، میانگین خطای مطلق ۲/۱۲، شاخص پراکندگی داده ۰/۲۶ و میزان ضریب همبستگی ۰/۹۰ در ایستگاه بیرجند استفاده نمود. در نهایت نتایج حاصله از روش رگرسیون خطی تعمیم

ساری				یزد				بیرجند				مدل
RMSE	R	MAE	SI	RMSE	R	MAE	SI	RMSE	R	MAE	SI	
۱/۴۵	-۰/۸۱	۱/۰۹	-۰/۴۶	۲/۶۳	-۰/۹۰	۲/۱۸	-۰/۲۷	۲/۲۴	-۰/۸۹	۱/۶۹	-۰/۲۰	MLP1
۱/۴۱	-۰/۸۲	۱/۱۰	-۰/۴۵	۲/۹۷	-۰/۹۰	۲/۵۳	-۰/۳۰	۲/۸۴	-۰/۸۹	۲/۲۶	-۰/۲۵	MLP2
۱/۴۶	-۰/۸۱	۱/۱۶	-۰/۴۷	۲/۶۶	-۰/۹۰	۲/۲۱	-۰/۲۷	۲/۸۱	-۰/۸۹	۲/۲۵	-۰/۲۵	MLP3
۱/۴۱	-۰/۸۲	۱/۰۲	-۰/۴۵	۲/۲۳	-۰/۹۰	۱/۷۵	-۰/۲۳	۲/۲۲	-۰/۸۹	۱/۶۴	-۰/۲۰	MLP4
۱/۴۱	-۰/۸۲	۱/۰۴	-۰/۴۵	۲/۰۹	-۰/۹۱	۱/۶۲	-۰/۲۱	۲/۰۱	-۰/۹۱	۱/۵۲	-۰/۱۸	MLP5
۱/۴۱	-۰/۸۲	۱/۱۱	-۰/۴۵	۱/۹۵	-۰/۹۲	۱/۴۷	-۰/۲۰	۱/۹۷	-۰/۹۱	۱/۴۸	-۰/۱۸	MLP6
۱/۶۲	-۰/۸۰	۱/۳۰	-۰/۵۲	۲/۶۷	-۰/۸۹	۲/۱۸	-۰/۲۷	۲/۸۶	-۰/۸۸	۲/۲۴	-۰/۲۶	GBT1
۱/۵۷	-۰/۸۰	۱/۲۷	-۰/۵۰	۲/۶۹	-۰/۸۹	۲/۲۰	-۰/۲۸	۲/۸۳	-۰/۸۷	۲/۲۴	-۰/۲۶	GBT2
۱/۵۹	-۰/۸۱	۱/۲۸	-۰/۵۱	۲/۶۵	-۰/۸۹	۲/۱۵	-۰/۲۷	۲/۷۸	-۰/۸۸	۲/۱۶	-۰/۲۵	GBT3
۱/۵۶	-۰/۸۱	۱/۲۵	-۰/۵۰	۲/۶۵	-۰/۸۹	۲/۱۶	-۰/۲۷	۲/۷۵	-۰/۸۹	۲/۱۶	-۰/۲۵	GBT4
۱/۵۶	-۰/۸۱	۱/۲۵	-۰/۵۰	۲/۵۶	-۰/۹۱	۲/۰۹	-۰/۲۶	۲/۶۳	-۰/۹۰	۲/۱۲	-۰/۲۶	GBT5
۱/۵۴	-۰/۸۲	۱/۲۴	-۰/۴۹	۲/۵۲	-۰/۹۱	۲/۰۵	-۰/۲۶	۲/۵۶	-۰/۹۱	۲/۰۴	-۰/۲۳	GBT6
۱/۵۱	-۰/۷۹	۱/۱۷	-۰/۴۸	۲/۳۴	-۰/۹۰	۱/۸۴	-۰/۲۴	۲/۴۲	-۰/۸۸	۱/۸۳	-۰/۲۲	GLM1
۱/۴۸	-۰/۷۹	۱/۱۳	-۰/۴۷	۲/۳۴	-۰/۹۰	۱/۸۴	-۰/۲۴	۲/۳۷	-۰/۸۷	۱/۷۹	-۰/۲۸	GLM2
۱/۴۹	-۰/۷۹	۱/۱۴	-۰/۴۸	۲/۳۳	-۰/۸۹	۱/۸۴	-۰/۲۴	۲/۳۶	-۰/۸۸	۱/۷۷	-۰/۲۲	GLM3
۱/۴۸	-۰/۷۹	۱/۱۳	-۰/۴۷	۲/۳۳	-۰/۸۹	۱/۸۴	-۰/۲۴	۲/۳۵	-۰/۸۸	۱/۷۶	-۰/۲۲	GLM4
۱/۴۷	-۰/۸۰	۱/۱۲	-۰/۴۷	۲/۱۷	-۰/۹۰	۱/۶۸	-۰/۲۲	۲/۱۷	-۰/۸۹	۱/۶۶	-۰/۲۰	GLM5
۱/۴۶	-۰/۸۰	۱/۱۲	-۰/۴۷	۲/۱۴	-۰/۹۱	۱/۶۶	-۰/۲۲	۲/۱۳	-۰/۹۰	۱/۶۱	-۰/۱۹	GLM6
سیاه‌پیشه				بافق				فردوس				مدل
RMSE	R	MAE	SI	RMSE	R	MAE	SI	RMSE	R	MAE	SI	
۳/۲۸	-۰/۹۰	۲/۶۵	-۰/۳۴	۲/۰۳	-۰/۶۲	۱/۵۴	-۰/۵۰	۲/۲۴	-۰/۹۲	۱/۸۲	-۰/۳۱	MLP1
۲/۹۱	-۰/۹۰	۲/۲۸	-۰/۳۰	۱/۹۶	-۰/۶۵	۱/۵۷	-۰/۴۹	۲/۸۴	-۰/۹۲	۱/۷۵	-۰/۳۱	MLP2
۲/۹۹	-۰/۹۰	۲/۳۵	-۰/۳۱	۱/۹۵	-۰/۶۵	۱/۵۲	-۰/۴۸	۲/۸۱	-۰/۹۲	۱/۷۷	-۰/۳۱	MLP3
۳/۷۸	-۰/۹۰	۳/۱۴	-۰/۳۹	۱/۹۵	-۰/۶۵	۱/۴۸	-۰/۴۸	۲/۲۲	-۰/۹۲	۱/۷۴	-۰/۳۱	MLP4
۳/۵۰	-۰/۹۰	۲/۸۴	-۰/۳۶	۱/۹۲	-۰/۶۶	۱/۴۹	-۰/۴۸	۲/۰۱	-۰/۹۲	۱/۷۷	-۰/۳۲	MLP5
۴/۱۸	-۰/۹۰	۳/۵۰	-۰/۴۳	۱/۹۵	-۰/۶۵	۱/۵۶	-۰/۴۸	۱/۹۷	-۰/۹۳	۱/۷۴	-۰/۳۰	MLP6
۳/۱۴	-۰/۹۰	۲/۴۸	-۰/۳۳	۱/۸۸	-۰/۷۵	۱/۳۲	-۰/۷۸	۲/۸۶	-۰/۹۱	۲/۴۶	-۰/۴۰	GBT1
۳/۱۱	-۰/۹۰	۲/۴۹	-۰/۳۳	۱/۸۶	-۰/۷۶	۱/۲۹	-۰/۷۷	۲/۸۳	-۰/۹۱	۲/۴۷	-۰/۴۰	GBT2
۳/۰۷	-۰/۹۰	۲/۴۵	-۰/۳۳	۱/۸۵	-۰/۷۶	۱/۲۹	-۰/۷۷	۲/۷۸	-۰/۹۱	۲/۴۲	-۰/۴۰	GBT3
۳/۰۵	-۰/۹۱	۲/۴۳	-۰/۳۳	۱/۸۴	-۰/۷۶	۱/۲۷	-۰/۷۶	۲/۷۵	-۰/۹۱	۲/۴۱	-۰/۳۹	GBT4
۳/۱۱	-۰/۹۰	۲/۴۹	-۰/۳۳	۱/۸۱	-۰/۷۷	۱/۲۴	-۰/۷۵	۲/۶۳	-۰/۹۱	۲/۴۵	-۰/۳۹	GBT5
۳/۰۵	-۰/۹۱	۲/۴۳	-۰/۳۲	۱/۷۲	-۰/۷۸	۱/۰۷	-۰/۷۱	۲/۵۶	-۰/۹۲	۲/۴۱	-۰/۳۹	GBT6
۲/۹۸	-۰/۸۹	۲/۳۰	-۰/۳۱	۱/۹۲	-۰/۷۱	۱/۳۶	-۰/۸۰	۲/۴۲	-۰/۹۱	۱/۸۶	-۰/۳۲	GLM1
۲/۹۸	-۰/۸۹	۲/۳۰	-۰/۳۱	۱/۹۱	-۰/۷۲	۱/۳۴	-۰/۷۹	۲/۳۸	-۰/۹۱	۱/۸۷	-۰/۳۲	GLM2
۲/۹۸	-۰/۸۹	۲/۳۰	-۰/۳۱	۱/۹۱	-۰/۷۲	۱/۳۵	-۰/۷۹	۲/۳۶	-۰/۹۲	۱/۸۲	-۰/۳۲	GLM3
۲/۹۷	-۰/۸۹	۲/۲۹	-۰/۳۱	۱/۸۹	-۰/۷۲	۱/۳۲	-۰/۷۸	۲/۳۵	-۰/۹۲	۱/۸۱	-۰/۳۱	GLM4
۲/۹۶	-۰/۸۹	۲/۲۹	-۰/۳۱	۱/۹۱	-۰/۷۲	۱/۳۴	-۰/۷۹	۲/۱۷	-۰/۹۱	۱/۸۷	-۰/۳۲	GLM5

جدول ۴- نتایج حاصل از برآورد تبخیر با استفاده از مدل‌های پیشنهادی.

روش سناریوهای چهارم و پنجم به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۴۱ و ۱/۴۱، میانگین خطای مطلق ۱/۰۳ و ۱/۰۴، شاخص پراکندگی ۰/۴۵ و ۰/۴۵ و نهایتاً ضریب همبستگی ۰/۸۲ و ۰/۸۲ با بیشترین دقت در برآورد تبخیر از تشت رتبه‌های اول و دوم را دارا بودند. نتایج روش درخت گرادیان تقویت شده در ایستگاه ساری نشان داد که مدل ششم این روش با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۱/۵۴، میانگین خطای مطلق ۱/۲۴، شاخص پراکندگی ۰/۴۹ و ضریب همبستگی ۰/۸۲ مناسب‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های روش درخت گرادیان تقویت شده داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش خطی تعمیم یافته در ایستگاه ساری نیز مدل ششم با استفاده از متغیرهای دمای میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ورودی مدل، دارای جذر میانگین مربعات خطای ۱/۴۶، میانگین خطای مطلق ۱/۲۲، شاخص پراکندگی ۰/۴۷ و ضریب همبستگی ۰/۸۰ بهترین مدل در این روش می‌باشد.

از مقادیر تبخیر از تشت به‌دست آمده از روش پرسپترون چندلایه در ایستگاه فردوس (جدول ۴) نتیجه گرفته می‌شود که مدل ششم روش پرسپترون چندلایه با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۷، میانگین خطای مطلق ۱/۷۴، شاخص پراکندگی ۰/۳۰ و ضریب همبستگی ۰/۹۳ بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌های این روش داشته است. مدل چهارم همین روش نیز با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۲۲، میانگین خطای مطلق ۱/۷۴، شاخص پراکندگی ۰/۳۱ و ضریب همبستگی ۰/۹۲ پس از مدل ششم از لحاظ جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، شاخص پراکندگی و ضریب همبستگی، در رتبه دوم قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از روش درخت گرادیان تقویت شده در ایستگاه فردوس، سناریو ششم مدل با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۵۶، میانگین خطای مطلق ۲/۴۱، شاخص پراکندگی ۰/۳۹ و در نهایت ضریب همبستگی

در ایستگاه یزد و در روش پرسپترون چندلایه (جدول ۴) سناریو ششم مدل شبکه عصبی مصنوعی-پرسپترون چندلایه با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۵، میانگین خطای مطلق ۱/۴۷، شاخص پراکندگی ۰/۲۰ و در نهایت ضریب همبستگی ۰/۹۲ دقیق‌ترین مدل شناخته شد. در روش درخت گرادیان تقویت شده سناریو ششم با دارا بودن حداقل میزان جذر میانگین مربعات خطا (۲/۵۲) میانگین خطای مطلق (۲/۰۵)، کمترین شاخص پراکندگی داده (۰/۲۶) و بیشترین میزان همبستگی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی (۰/۹۱) برترین عملکرد را دارد. در این روش، می‌توان از سناریو سوم که از متغیر کمی نسبت به سناریو ششم استفاده می‌کند، با قبول اندکی خطا با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطا ۲/۶۵، میانگین خطای مطلق ۲/۱۵، شاخص پراکندگی داده ۰/۲۷ و میزان ضریب همبستگی ۰/۸۹ به عنوان روشی با کارایی مناسب استفاده نمود. از مقادیر تبخیر از تشت به‌دست آمده از روش مدل خطی تعمیم یافته در ایستگاه یزد (جدول ۴) نتیجه گرفته می‌شود که سناریو ششم این مدل نیز با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۱۴، میانگین خطای مطلق ۱/۶۶، شاخص پراکندگی ۰/۲۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۱ بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌های این روش داشته است. از طرفی چون این مدل از همه پارامترها در ورودی استفاده می‌کند در مواقع فقدان داده کافی، این مدل کارایی خود را از دست می‌دهد؛ لذا می‌توان با قبول اندکی خطا از سناریو پنجم مدل با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۱۷، میانگین خطای مطلق ۱/۶۸، شاخص پراکندگی ۰/۲۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۰ پس از سناریو ششم نیز برترین مدل این روش می‌باشد، استفاده نمود. داده‌های بکار رفته در این مدل شامل دمای میانگین، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌باشد.

با توجه به جدول ۴ و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی-پرسپترون چندلایه در ایستگاه ساری، در این

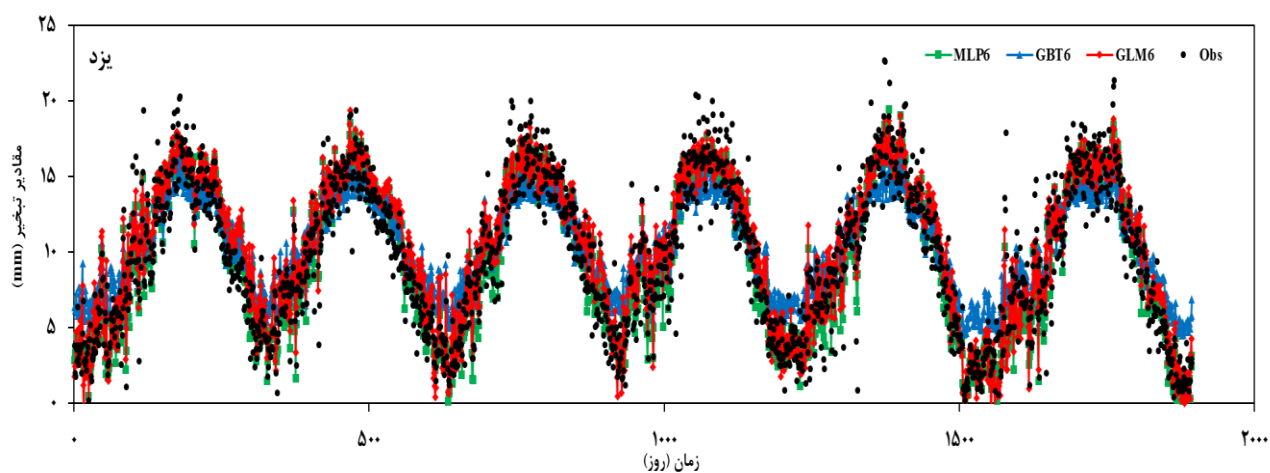
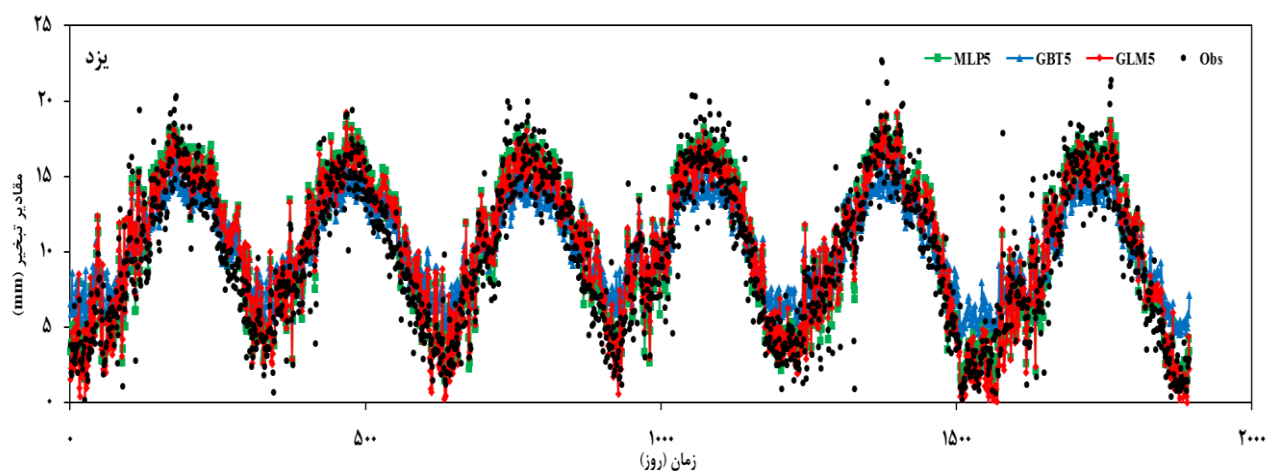
میانگین مربعات خطای ۱/۸۸، میانگین خطای مطلق ۱/۳۱، شاخص پراکندگی ۰/۷۸ و ضریب همبستگی ۰/۷۳ بهترین عملکرد را نسبت به سایر سناریوهای این روش داشته است. از طرفی سناریو چهارم مدل با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۸۹، میانگین خطای مطلق ۱/۳۴، شاخص پراکندگی ۰/۷۸ و ضریب همبستگی ۰/۷۲ که پس از سناریو ششم دارای خطای کمتر و ضریب همبستگی بیشتر با داده‌های تبخیر می‌باشد، برترین مدل این روش است. از سوی دیگر چون این روش فقط از سه متغیر دمای میانگین، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در ورودی مدل استفاده می‌کند در هنگام نبود داده سرعت باد و دیگر داده‌های موثر در تبخیر گزینه بسیار مناسبی برای پیش‌بینی مقدار تبخیر از تشت می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از روش پرسپترون چندلایه در ایستگاه سیاه‌بیشه نشان می‌دهد که، سناریو دوم و سوم به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۹۱ و ۲/۹۹، میانگین خطای مطلق ۲/۲۸ و ۲/۳۵، شاخص پراکندگی ۰/۳۰ و ۰/۳۱ و ضریب همبستگی ۰/۹۰ و ۰/۹۰ دو مدل برتر این روش شناخته شدند. با توجه به جدول ۴ (نتایج روش درخت گرادیان تقویت شده) در ایستگاه سیاه‌بیشه مدل ششم با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۳/۰۵، میانگین خطای مطلق ۲/۴۳، شاخص پراکندگی ۰/۳۲ و در نهایت ضریب همبستگی ۰/۹۱ و مدل چهارم با جذر میانگین مربعات خطای ۳/۰۵، میانگین خطای مطلق ۱/۰۷، شاخص پراکندگی ۰/۷۱ و ضریب همبستگی ۰/۹۱ مناسب‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های روش درخت گرادیان تقویت شده داشتند. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۴ در ایستگاه سیاه‌بیشه سناریو ششم مدل خطی تعمیم یافته با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۹۶، میانگین خطای مطلق ۲/۲۹، شاخص پراکندگی ۰/۳۱ و در نهایت ضریب همبستگی ۰/۹۰ و با داده‌های ورودی دمای میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مختلف روش خطی تعمیم یافته را به خود اختصاص داد. در رتبه دوم، سناریو پنجم همین مدل با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۹، جذر میانگین مربعات خطای ۲/۹۶، شاخص

۰/۹۲، و با داده‌های ورودی دمای میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مختلف روش درخت گرادیان تقویت شده را به خود اختصاص داد. در رتبه دوم، سناریو پنجم مدل با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۲/۶۳، میانگین خطای مطلق ۲/۴۵، شاخص پراکندگی ۰/۳۹ و ضریب همبستگی ۰/۹۱ پس از مدل ششم دارای تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی تبخیر، نسبت به سایر مدل‌ها در این روش بود. نتایج روش خطی تعمیم یافته در ایستگاه فردوس نشان داد که مدل ششم با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای ۲/۱۳، میانگین خطای مطلق ۱/۸۰، شاخص پراکندگی ۰/۳۱ و در نهایت ضریب همبستگی ۰/۹۲ و مدل پنجم با جذر میانگین مربعات خطای ۲/۱۷، میانگین خطای مطلق ۱/۸۷، شاخص پراکندگی ۰/۳۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۱ مناسب‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های روش خطی تعمیم یافته داشتند.

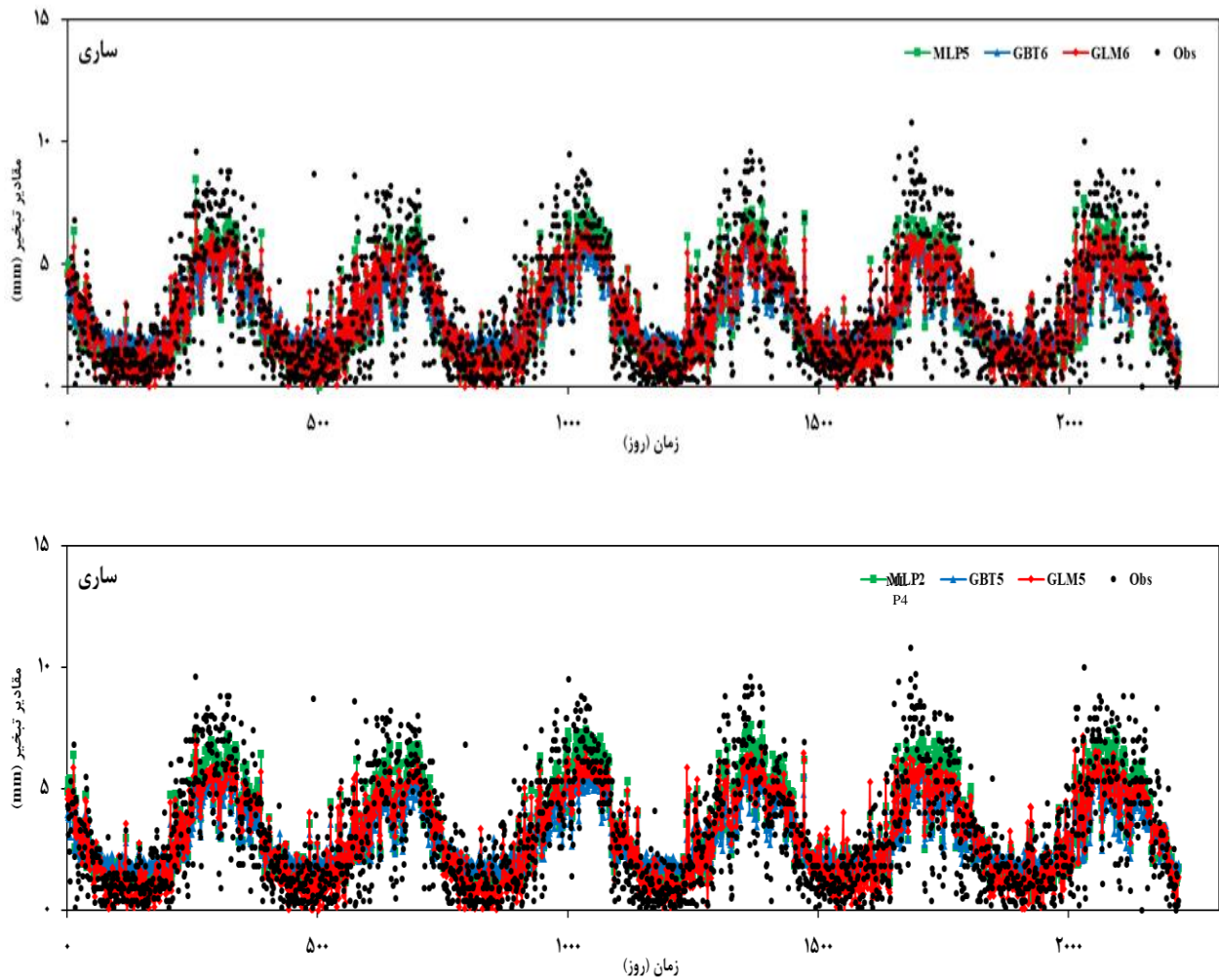
نتایج به‌دست آمده از روش پرسپترون چندلایه در ایستگاه بافق (جدول ۴) نشان می‌دهد که مدل‌های ترکیب داده پنجم و چهارم به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای ۱/۹۲ و ۱/۹۵، میانگین خطای مطلق ۱/۴۹ و ۱/۴۸، شاخص پراکندگی ۰/۴۸ و ۰/۴۸ و ضریب همبستگی ۰/۶۶ و ۰/۵۶ دو مدل برتر این روش شناخته شدند. همچنین با توجه به جدول ۴ مدل ششم روش درخت گرادیان تقویت شده در ایستگاه بافق با میزان جذر میانگین مربعات خطای ۱/۷۲، میانگین خطای مطلق ۱/۰۷، شاخص پراکندگی ۰/۷۱ و نهایتاً با ضریب همبستگی ۰/۷۸ دارای بهترین عملکرد می‌باشد. از سوی دیگر در هنگام فقدان داده می‌توان از مدل پنجم همین روش با داده‌های ورودی دمای میانگین، رطوبت نسبی و سرعت باد که با مقدار جذر میانگین مربعات خطای ۱/۸۱، میانگین خطای مطلق ۱/۲۴، شاخص پراکندگی ۰/۷۵ و ضریب همبستگی ۰/۷۷ عملکرد مناسبی پس از مدل ششم دارد، استفاده کرد. از مقادیر تبخیر از تشت به‌دست آمده از روش مدل خطی تعمیم‌یافته در ایستگاه بافق (جدول ۴) نتیجه گرفته می‌شود که سناریو ششم این مدل با جذر

مدل‌های هریک از روش‌های مورد پژوهش با ورودی متغیرهای هواشناسی در دو ایستگاه یزد و ساری، به عنوان نمونه‌ای از اقلیم‌های گرم و خشک و مرطوب را نشان می‌دهند.

پراکندگی ۰/۳۱ و میانگین خطای مطلق ۲/۲۹ پس از سناریو ششم دارای کمترین مقدار خطا نسبت به سایر مدل‌ها در این روش بود. شکل‌های ۲ و ۳ نمودار تغییرات زمانی تبخیر از تشت مشاهداتی و پیش‌بینی شده را با استفاده از برترین



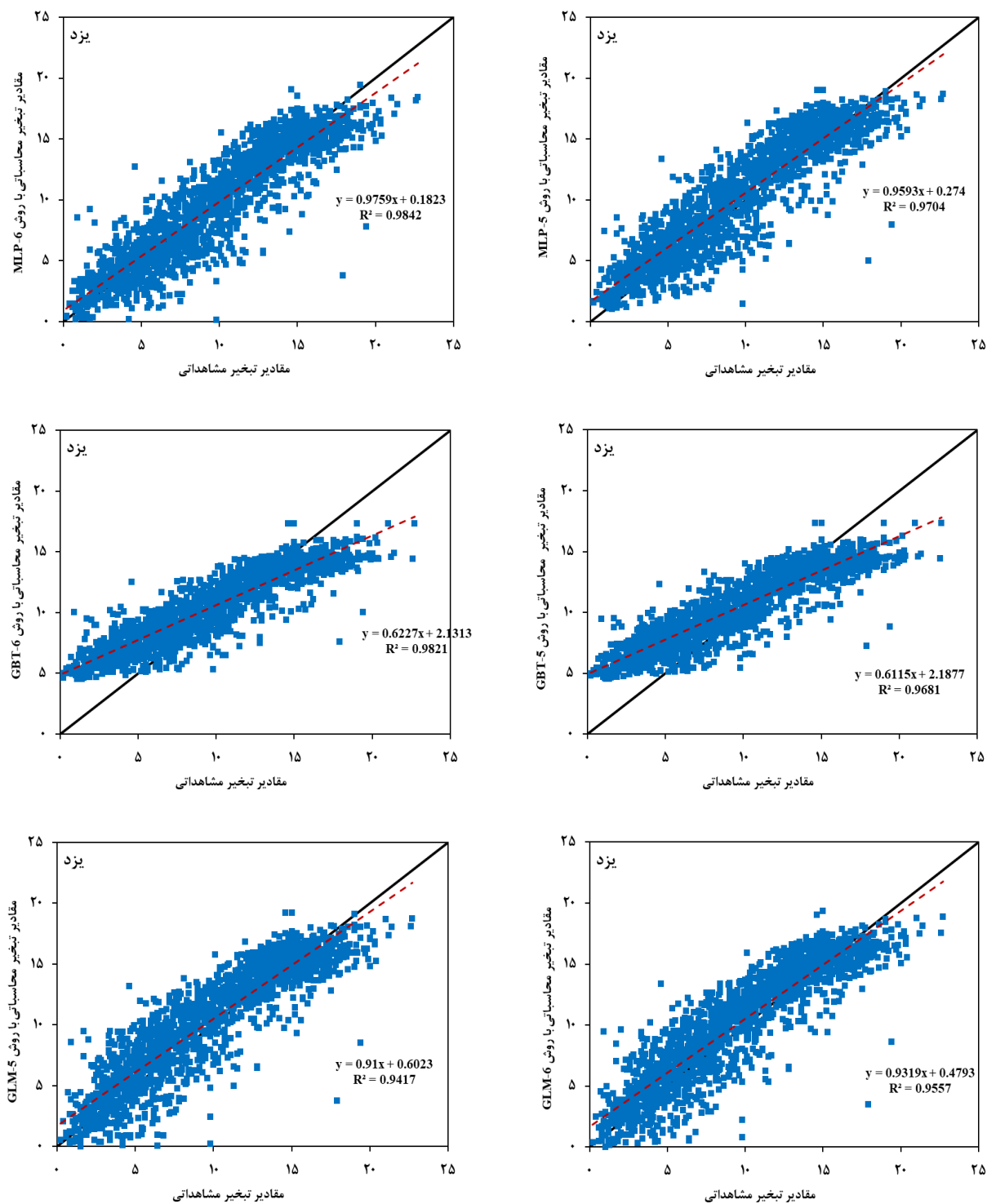
شکل ۲- نمودار سری زمانی برترین مدل‌های مورد مطالعه هر روش در ایستگاه یزد.



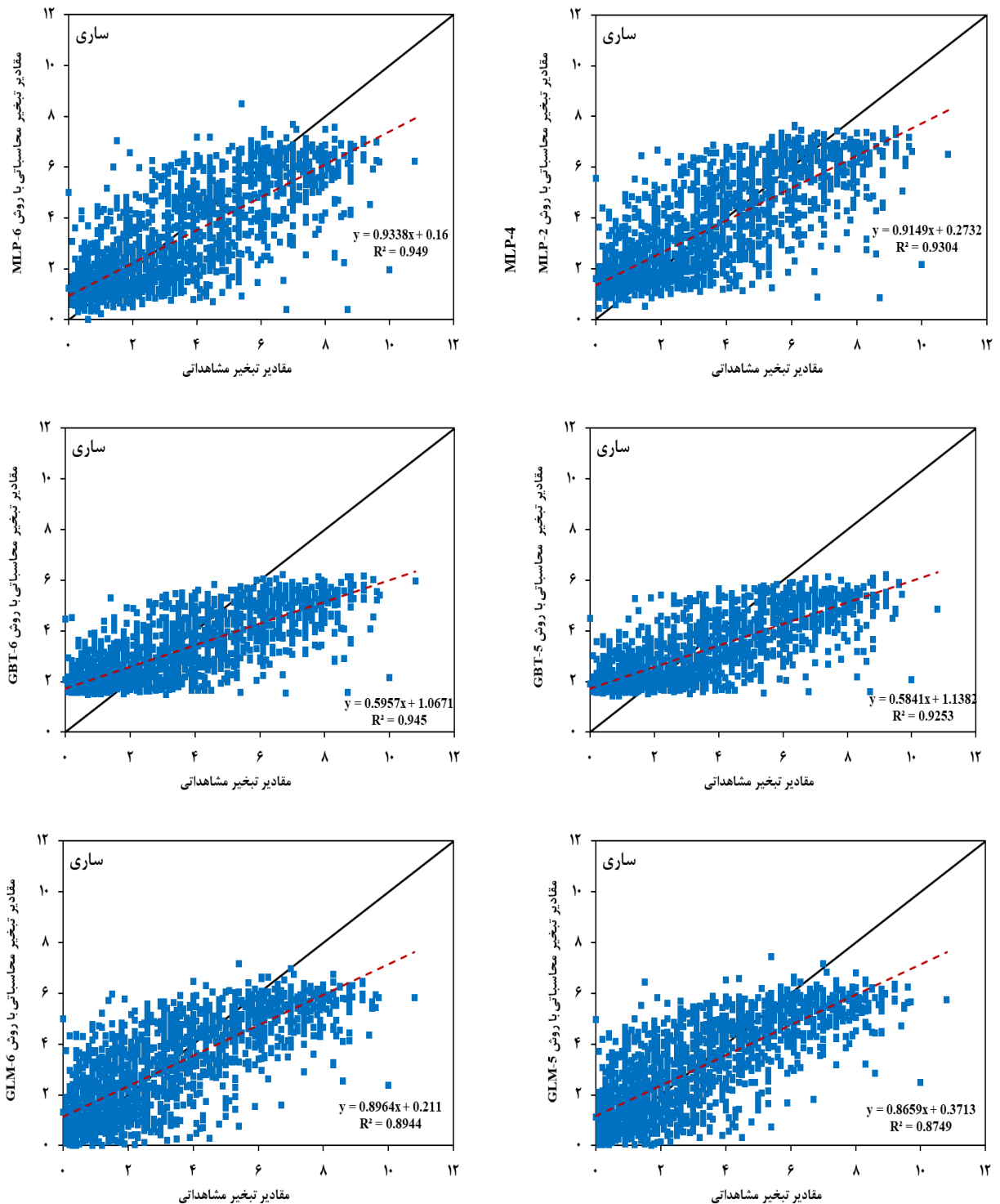
شکل ۳- نمودار سری زمانی برترین مدل‌های مورد مطالعه هر روش در ایستگاه ساری.

پارامترهای هواشناسی در دو ایستگاه یزد و ساری آورده شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

همچنین در ادامه برای نتیجه‌گیری بهتر نمودارهای پراکنش تبخیر از تشتت مشاهداتی و پیش‌بینی شده با بکارگیری همه مدل‌های برتر در روش‌های مورد مطالعه و با استفاده از



شکل ۴- نمودارهای پراکنش تبخیر از تشت مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های برتر ایستگاه یزد با ورودی داده‌های هواشناسی.



شکل ۵- نمودارهای پراکنش تبخیر از تحت مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های برتر ایستگاه ساری با ورودی داده‌های هواشناسی.

می‌شود که مدل‌های برتر مذکور در هر ایستگاه، کمترین پراکنش را حول نیمساز داشته و دارای بیشترین دقت و کمترین خطا بوده‌اند. به عبارت دیگر می‌توان مقادیر تبخیر را

روند اشاره شده در مورد بالا بودن دقت سناریوهای مذکور برای هر سه مدل مورد مطالعه از شکل‌های ۲ و ۳ نیز قابل نتیجه‌گیری است. از شکل‌های ۴ و ۵ نیز چنین استنباط

دارای ضعیف‌ترین نتایج نسبت به بقیه روش‌ها در ایستگاه-های مذکور می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

تبخیر یکی از مولفه‌های اصلی بیلان آب در زمینه کشاورزی و از جمله عوامل موثر و تاثیرگذار جهت تنظیم دقیق تقویم آبیاری است. برآورد دقیق و اندازه‌گیری این متغیر در تمامی نقاط به خصوص در اقلیم‌های خشک و نیمه-خشک حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین، در این مطالعه توانایی سه روش داده محور درخت‌گردان تقویت شده، مدل خطی تعمیم یافته و مدل پرسپترون چندلایه در برآورد مقدار تبخیر در شش ایستگاه بیرجند، یزد، ساری، فردوس، سیاه‌بیشه و بافق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که سناریو ششم در هر سه مدل با استفاده از هر چهار متغیر هواشناسی دمای هوا، ساعات آفتابی، سرعت باد و رطوبت نسبی در تمامی ایستگاه‌ها عملکرد مناسبی داشته است. اما سناریو ششم روش پرسپترون چندلایه با دارا بودن کمترین جذر میانگین مربعات خطای، پایین‌ترین میانگین خطای مطلق، بالاترین ضریب همبستگی و پایین‌ترین شاخص پراکندگی داده در ایستگاه بیرجند و متعاقباً در بقیه ایستگاه‌های مورد پژوهش با کمترین جذر میانگین مربعات خطا، کمترین میانگین خطای مطلق، بیشترین ضریب همبستگی و کمترین شاخص پراکندگی بهترین نتیجه را ارائه نمود و به عنوان مدل برتر در برآورد میزان تبخیر از تشت را انتخاب گردید. بنابراین سناریو ششم و پنجم و متعاقباً همین ترکیب داده‌ها در مدل خطی تعمیم یافته نیز می‌تواند توسط پژوهشگران هنگام نبود داده اندازه‌گیری شده تبخیر، مورد استفاده قرار گیرد.

از مقایسه کلیه مدل‌ها چنین نتیجه می‌شود که مدل-های مورد مطالعه (درخت‌گردان تقویت شده، مدل خطی تعمیم یافته و پرسپترون چندلایه) در ایستگاه‌های یزد، بافق، بیرجند و سیاه‌بیشه توانایی نسبتاً بالایی در برآورد تبخیر از

در تمامی ایستگاه‌ها با داده‌های هواشناسی دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد با دقت قابل قبولی برآورد کرد. لوو و همکاران (۲۰۱۶) میزان تبخیر تشت را با استفاده شش مدل محاسباتی پرسپترون چندلایه، شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته ($GRNN^{15}$)، ژنتیک فازی (FG^{16})، حداقل مجذور ماشین بردار پشتیبان ($LSSVM^{17}$)، اسپلاین رگرسیون تطبیقی چندمتغیره ($MARS^{18}$)، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی ($ANFIS-GP^{19}$) و دو روش رگرسیون خطی چندگانه در ایستگاه‌های مختلفی از طیف وسیع اقلیمی کشور چین محاسبه نمودند. ایشان برای برآورد تبخیر از داده‌های هواشناسی بلند مدت طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۰۰ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌ها در اقلیم‌های مختلف دقت‌های متفاوتی دارند اما مدل پرسپترون چندلایه دقت بیشتری در تمامی ایستگاه‌ها حاصل نمود. لوو و همکاران (۲۰۱۸) میزان تبخیر از تشت را با سه روش مبتنی بر درخت‌گردان تقویت شده، جنگل تصادفی و مدل درخت $M5$ و چهار روش تجربی محاسبه کردند. ایشان نتایج حاصله از مدل‌ها را با چهار معیار خطا مورد ارزیابی قرار داده و بیان داشتند که مدل درخت‌گردان تقویت شده با دارا بودن خطای کمتر نسبت به دو مدل دیگر نتایج بهتری را حاصل کرده است.

با توجه به نتایج بدست آمده به وسیله مدل‌های مذکور، می‌توان بیان داشت که هر سه روش درخت‌گردان تقویت شده، مدل خطی تعمیم‌یافته و پرسپترون چندلایه با متغیرهای هواشناسی دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد به عنوان ورودی قادر به تخمین تبخیر با دقت مناسبی هستند. از سوی دیگر نتایج نشان داد که مدل برتر پرسپترون چندلایه بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی تبخیر از تشت دارد؛ همچنین مدل برتر مدل خطی تعمیم یافته با دارا بودن خطای کمتر پس از روش پرسپترون چندلایه در رتبه دوم قرار گرفت و مدل برتر درخت‌گردان تقویت شده

¹⁸ Multivariate adaptive regression spline

¹⁹ Adaptive neuro-fuzzy inference systems

¹⁵ Generalized regression neural network

¹⁶ Fuzzy genetic

¹⁷ Least square support vector machine

تشت در مقایسه با ایستگاه‌های مرطوب دارند؛ بطوریکه میزان خطای حاصل در ایستگاه‌های ساری و فردوس که نماینده اقلیم مرطوب در پژوهش حاضر بودند نسبت به شهرهای دیگر بیشتر بوده و تطابق کمتری با داده‌های مشاهداتی تشت تبخیر داشتند. در نهایت پیشنهاد می‌گردد توانایی مدل‌های مورد مطالعه در شبیه‌سازی تبخیر ایستگاه‌های مختلف توسط دیگر پژوهشگران مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

- Afkhami H, Habibipur A and Ekhtesasy M, 1397. Performance assessment of data mining techniques for Forecast for one year evaporation - Case study of Yazd synoptic station. *Iranian Journal of Natural Resources* 3: 594-579. (In Persian with English abstract).
- Khorshiddoost AM, Mirhashemi H and Nazari M, 1398. Evaluation of the performance of artificial neural network and support vector machine models in estimation of daily evaporation amounts - Case study of Tabriz and Maragheh Synoptic Stations. *Journal of Geography and Planning* 68(23): 71-90 (In Persian with English abstract).
- Ghaemi A, Rezaie Balf M, Adamowski J, Kisi O and Quilty J, 2019. On the applicability of maximum overlap discrete wavelet transform integrated with MARS and M5 model tree for monthly pan evaporation prediction. *Agricultural and Forest Meteorology* 278: 397-428.
- Wu L, Haung G, Fan J, Ma X, Zhou H and Zeng W, 2020. Hybrid extreme learning machine with meta-heuristic algorithms for monthly pan evaporation prediction. *Computers and Electronics in Agriculture* 168: 105-115.
- Majhi B and Naidu D, 2021. Pan evaporation modeling in different agroclimatic zones using functional link artificial neural network. *Information Processing in Agriculture* 8: 134-147.
- Mir Mohammad Sadeghi SA, Ghobadniam M and Rahimian MH, 2018. Estimation of evaporation from Zayandeh-Rood Dam Lake using SEBAL. *Water and Soil* 33(4): 548-537 (In Persian with English abstract).
- Moneskhah V, SamadianFard S and Hadi M, 2019. Evaluation of data mining methods and experimental temperature-radiation-based models in estimating evaporation from the Pan - Case study of the East Lake Urmia. *Journal of Water and Soil Research* 51(9): 2348-2337 (In Persian with English abstract).
- Sharfi M and SamadianFard S, 1400. Prediction of daily evaporation using hybrid support vector regression-firefly optimization algorithm and multilayer perceptron. *Journal of Rainwater* 9(4): 53-66 (In Persian with English abstract).
- Shadkani S, Abbaspour A, Samadianfard S, Hashemi S, Mosavi A and Shamsirband S, 2021. Comparative study of multilayer perceptron-stochastic gradient descent and gradient boosted trees for predicting daily suspended sediment load - Case study of the Mississippi river. *US International Journal of Sediment Research* 36(4): 512-523.
- Qamarnia H, Naseri S, Amini A and Sargardi F, 1400. Comparison of SEBAL algorithm and meteorological data results in estimating daily evaporation from free water surface - Case study of Soleimanshah dam. *Environmental and Water Engineering Journal* 7(3): 494-506 (In Persian with English abstract).
- Farasaty M, Seydian M and Dab K, 1400. Evaporation modeling of free surface water using SVM and LSSVM models. *Water and Irrigation* 11(3): 288-272 (In Persian with English abstract).
- Seifzadeh Kh, 1402. Estimation of daily evaporation from class A pan using five data mining methods - Case study of Tabriz Meteorological Station. MSc Thesis, Tabriz University of Technology. (In Persian with English abstract).