

Evaluation of relationships between meteorological variables and actual evapotranspiration using regression and hierarchical clustering (Case Study: Castelvetro, Italy)

Vafa Mahmoudinezhad^{1*}, Afshin Honarbakhsh², Khodayar Abdollahi², Dario De Caro³

¹ Ph.D. Student, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Researcher, Department of Agriculture and Forestry, Faculty of Science, Palermo University, Palermo, Italy

Extended Abstract

Introduction

Actual evapotranspiration, one of the most important components of the hydrological cycle, causes 60% of precipitation to return to the atmosphere. This value increases up to 90% in dry and semi-arid areas. In recent years, with population growth, increasing water demand, and climate change, the importance of this phenomenon has doubled. Despite its importance, actual evapotranspiration remains largely unknown and its estimation by direct measurement methods is costly and time-consuming. In this regard, the Penman-Monteith method, the most accepted method for estimating reference evaporation and transpiration, also requires a lot of meteorological data. Despite the weakness of the conceptual model, using experimental methods to estimate evaporation and transpiration is still common due to its simplicity. In addition, examining the conceptual model and statistical methods without prejudice makes it possible to identify the influential variables and create experimental relationships compatible with the conceptual model.

Materials and Methods

The case study, with an area of 13 ha, is located in the southwest of Sicily (Italy), about five km from Castelvetro. The landscape is flat and the soil type is relatively homogeneous. The main crops are olives (70% coverage), vineyards (24%), fruit trees (2.6%), and other garden products (3.4%). The plants are about 3.5 m tall and are arranged in a regular grid of five m by eight m (density of 250 plants per ha). The climate of the region is Mediterranean and the soil texture class, according to the USDA classification, is silty clay loam. In this research, one-hour meteorological data from 23 meteorological variables from the Sicily meteorological-agricultural station and actual evapotranspiration data extracted from the Eddy covariance method for the statistical period of 2009-2016 were used. Linear regression methods were used to investigate the relationships between the 24 variables and actual evapotranspiration. Integrated hierarchical clustering was used also to classify the 24 variables.

Results and Discussion

Evaluating the relationships between the 24 variables (23 meteorological variables and actual evapotranspiration) using the linear regression method led to the extraction of relationships between parameters in the form of a 24x24 matrix. In other words, to predict each variable (as a dependent variable), 23 relationships with other parameters (as independent parameters) were extracted. Then, the priority of the independent variables to predict each dependent variable was determined based on the correlation coefficient (R). The average of the 23 numerical ranks of an independent variable to predict other dependent variables indicates the degree of competence of that variable to predict other variables. The result of integrated hierarchical clustering with a 70% correlation is seven clusters. The members of cluster number one are different temperature variables (instantaneous, minimum, maximum, and average), cluster number two, rainfall variable (the only single member cluster), cluster number three, humidity variables (instantaneous, minimum, maximum, and average), cluster number four, pressure variables (station pressure and sea level pressure), cluster number five, variables of total solar radiation and evaporation and transpiration (the only cluster with non-identical members), cluster number six, different wind speed variables (instantaneous, minimum, maximum and average at the height of two and 10 m) and cluster number seven showed the wind direction variables. The summary of the classification results generally shows that the meteorological variables are independent except for the variables of the same name (such as temperature variables) all Variables with the same name were placed in a cluster, and the only variables with different names that were located in a cluster were total solar radiation and evaporation and transpiration. The representative of each cluster is the best predictor (based on rank) among the members of that cluster to predict other variables. Based on this, average temperature variables, rainfall, average relative humidity, sea level pressure, total solar radiation, maximum wind speed at a height of two m, and wind direction at a height of 10 m were determined as representatives of seven clusters. Also, the best predictor of these representatives was determined from inside and outside the cluster members. Based on the regression analysis, the best predictor of actual evapotranspiration with a correlation coefficient of more than 70% in total solar radiation. Instantaneous and minimum relative humidity variables with a correlation coefficient of about 50% (inverse relationship) took second and third place respectively to estimate actual evapotranspiration. The fourth and fifth ranks

also belong to the average and maximum humidity with a correlation coefficient of about 49%. The independent variable of the duration of wetness of the leaves with a correlation coefficient of 40% has taken the sixth place. The characteristics of wind speed, temperature, wind direction, total annual rainfall, and pressure have the next ranks to estimate the actual evapotranspiration, respectively, with correlation coefficients of less than 30%.

Conclusion

In general, the high correlation between total solar radiation and actual evapotranspiration in a cluster indicates the key role of this meteorological variable in estimating evaporation and transpiration and is a justification for using methods based on energy balance to estimate this parameter. The high correlation between the estimation of actual evapotranspiration with the total solar radiation, considering the dependence of this variable on other climatic and hydrological variables, can be a useful point for use in watersheds lacking data and information. Also, the state of relative humidity ranks first and second respectively to predict other variables and actual evapotranspiration, indicating the key role of this variable in the case study. Contrary to some research about the key role of precipitation in the estimation of evaporation and transpiration in the Mediterranean climate, in this research no acceptable correlation was observed between the independent variable of precipitation and the dependent variable of actual evapotranspiration, although this issue may be related to the form of the equation. In this regard, instantaneous, minimum, average, and maximum relative humidity were ranked after total solar radiation. On the other hand, the total solar radiation in the estimation of the actual evapotranspiration with a correlation coefficient (71%) compared to the independent variable of relative humidity is in the first rank of the predictors, although it is ranked after the average and minimum relative humidity in the estimation of 23 meteorological variables. However, total solar radiation and relative humidity (average and minimum) were identified as two independent variables that are effective in estimating meteorological variables, especially actual evapotranspiration, and it is suggested that more research be done in watersheds with different climatic variations to discover the internal relationships of actual evapotranspiration and other climatic variables.

Keywords: Correlation, Hydrological modeling, Meteorological station, Predictor, Sicily, Total solar radiation

Article Type: Case Study

Acknowledgment

I would like to thank the professor of my study opportunity in Italy, the late Giuseppe Provenzano, who did not spare any help like a kind father, and without his help, this article could not have been compiled.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

Upon request to the corresponding author, the data will be provided.

Authors' contribution

Vafa Mahmoudinezhad: Conceptualization, software and statistics analysis, original draft preparation and writing; **Afshin Honarbakhsh:** Supervision, manuscript editing, formal analysis, and investigation; **Khodayar Abdollahi:** Supervision, manuscript editing, formal analysis, and investigation; **Dario De Caro:** Software and statistics analysis.

*Corresponding Author, E-mail: vafamahmodinejad@gmail.com

Citation: Mahmoudinezhad, V., Honarbakhsh, A., Abdollahi, K., & De Caro, D. (2024). Evaluation of relationships between meteorological parameters and actual evapotranspiration using regression and hierarchical clustering (Case Study: Castelvetro, Italy). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 159-172.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12941.1289

Received: 18 May 2023, Received in revised form: 12 June 2023, Accepted: 18 June 2023, Published online: 18 June 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 159-172

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی روابط بین متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از رگرسیون و خوشه‌بندی سلسله مراتبی (مطالعه موردی: کستلوترانو ایتالیا)

وفا محمودی‌نژاد^{۱*}، افشین هنربخش^۲، خدایار عبدالهی^۳، داریو دیکارو^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
^۳ محقق، گروه علوم کشاورزی و جنگلداری، دانشگاه پالمو، پالمو، ایتالیا

چکیده

تبخیر-تعرق به دلیل تأثیر بر میزان نیاز آبی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای چرخه هیدرولوژیکی، اهمیت به‌سزائی دارد. برای بررسی تأثیر متغیرهای هواشناسی بر این عامل در منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر کستلوترانو در جنوب ایتالیا، از داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی-کشاورزی کستلوترانو و تبخیر-تعرق واقعی استخراج شده و از روش ادی کوواریانس مربوط به سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ استفاده و با روش‌های رگرسیون ساده و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی تجمعی بررسی شد. تحلیل رگرسیون متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی، همبستگی بالایی با یک‌دیگر نشان داد که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان نماینده در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی استفاده نمود. نتایج روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی ادغامی با ۷۰ درصد تشابه نشان داد، ۲۴ متغیر در هفت خوشه مجزا قرار گرفته و اعضای خوشه‌ها به غیر از خوشه پنج دارای ماهیت یکسانی هستند و این موضوع مؤید همبستگی بالای متغیرهای دارای ماهیت یکسان و استقلال متغیرهای هواشناسی دارای ماهیت متفاوت است. همچنین، در این پژوهش روش رگرسیون دامنه وسیعی از ۲۷۶ رابطه برای پیش‌بینی همه متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی ارائه می‌دهد. جمع‌بندی تحلیل همبستگی روابط نشان می‌دهد رطوبت نسبی، کلیدی‌ترین متغیر (مناسب‌ترین پیش‌بینی‌کننده سایر متغیرها) با اولویت ۸/۳۷۵ و رتبه یک است. علاوه‌براین در پژوهش حاضر نمایندگان خوشه‌های هفت‌گانه برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی مشخص شد که از این میان تابش کلی خورشید با ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۱۳، بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده تبخیر-تعرق واقعی بر اساس روش پژوهش است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هواشناسی، پیش‌بینی‌کننده، تابش کلی خورشید، سیسپیل، مدل‌سازی هیدرولوژی، همبستگی

نوع مقاله: مطالعه موردی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vafamahmodinejad@gmail.com

استناد: محمودی‌نژاد، وفا، هنربخش، افشین، عبدالهی، خدایار، و دیکارو، داریو (۱۴۰۳). ارزیابی روابط بین پارامترهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از رگرسیون و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: کستلوترانو ایتالیا). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۱۵۹-۱۷۲.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12941.1289

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۵۹ تا ۱۷۲

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از عوامل مؤثر بر منابع آب است که ثبات آن برای زندگی انسان و تولید کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک حیاتی است. تبخیر-تعرق با اثر بر تغییرات سطوح و مقادیر منابع آب به‌طور مستقیم بر کیفیت زندگی انسان تأثیرگذار است (Fu et al., 2021; Aydın, 2021). گزارش‌های علمی نشان می‌دهد به‌عنوان یک میانگین جهانی، تبخیر-تعرق (ET)، تقریباً عامل ۶۰ درصد بازگشت بارش به جو است، رقمی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک تا ۹۰ درصد افزایش می‌یابد (Brutsaert, 2005; Jato-Espino et al., 2017). بنابراین، اندازه‌گیری و برآورد آن از منظرهای مختلف از جمله کشاورزی جهت برآورد تقاضای آب زراعی و مدیریت سامانه‌های آبیاری ضروری است (Jato-Espino et al., 2017). تبخیر-تعرق را می‌توان از طریق روش‌های اندازه‌گیری مستقیم مانند آزمایش‌های میدانی، روش‌های مبتنی بر استفاده از لایسیمتر (Steduto et al., 1996; Aydın, 2021)، تست‌های تبخیر نظیر کلاس A (Maina et al., 2012; Ganji and Kajisa, 2019; Aydın, 2021) و به‌دلیل مشکلات موجود در اجرای روش‌های اندازه‌گیری مستقیم سایر روش‌هایی بر پایه روابط تجربی دیگر مانند آن‌هایی که از دما، تابش، انتقال جرم استفاده می‌کنند و یا روش‌های ترکیبی که می‌تواند در شرایط مختلف آب و هوا و منطقه‌ای به‌دست آورد. یکی از پرکاربردترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع (ETO)، روش پنمن-مونتیت است که در بسیاری از نقاط جهان به‌عنوان یک روش استاندارد استفاده می‌شود. درحالی‌که نیاز به داده‌های آب و هوایی بیش‌تری دارد. لذا، مدل‌های ساده‌شده‌ای که نتایج عملکرد مشابه نسبت به این روش استاندارد دارند اما نیازمند متغیرهای آب و هوایی کم‌تری هستند، در عمل به‌دلیل سهولت استفاده و کاربرد، ترجیح داده می‌شوند (Aydın, 2021). در سال‌های اخیر اهمیت شناخت تبخیر-تعرق دوچندان شده است زیرا تغییرات آب و هوایی سبب افزایش اثرات منفی بر اکوسیستم‌های زمین ناشی از آب و هوا شده است. این تأثیرات سبب جابه‌جایی، مهاجرت و پیامدهای مهمی بر سلامت انسان، توسعه اجتماعی و اقتصادی و اثر مستقیم بر امنیت غذایی شده است (UNESCO and UN-Water, 2020; Aguirre-García et al., 2021). از طرفی بررسی مؤلفه به مؤلفه چرخه آب، ملاحظه می‌شود هنوز ET یکی از ناشناخته‌ترین متغیرها در

چرخه هیدرولوژیکی است و شناسایی مشخصات آن، به پژوهش‌های اندکی محدود شده است (Brutsaert, 1982; Naoum and Tsanis, 2003; Jato-Espino et al., 2017). همچنین، برآورد دقیق ETO در زمینه حفاظت و توسعه منابع آب و طرح‌های آبیاری از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است (Trajković and Stojnić, 2008; Çobaner et al., 2016; Aydın, 2021).

بر اساس مطالعات انتظار می‌رود، کسری بارش و خشکسالی شدیدتر و رویدادهای بارش در منطقه مدیترانه به‌دلیل گرم شدن کره زمین افزایش یابد. بخش بزرگی از این منطقه پوشیده از باغ‌های زیتون است که ۹۷/۵ درصد از منطقه کشاورزی زیتون جهان را شامل می‌شود. کشت زیتون نیازمند مدیریت هوشمند آب و هوا برای تسهیل سازگاری محصول با سناریوهای آب و هوایی آینده و توسعه قابل پیش‌بینی است (Aguirre-García et al., 2021). در این پژوهش، از تحلیل خوشه‌ای برای شناخت عوامل آب و هواشناسی در دسترس استفاده شده است. تحلیل خوشه‌ای، اصطلاحی است که برای اولین بار توسط Tryon (1939) معرفی شد. این تکنیک از داده‌کاوای چندمتغیره از الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف برای گروه‌بندی اشیاء بر اساس شباهت آن‌ها استفاده می‌کند. در نتیجه اعمال خوشه‌بندی، اعضاء درون یک گروه به‌یک‌دیگر مرتبط و با سایر اشیاء یعنی اعضای گروه‌های دیگر نامرتب تلقی می‌شوند. به‌طوری‌که تمایز خوشه‌ها با افزایش شباهت درون یک گروه و افزایش تفاوت بین گروه‌ها تشخیص داده می‌شود (Tan et al., 2005; Jato-Espino et al., 2017). تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی از لحاظ مفهومی، به دو نوع ادغامی و تجزیه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی ادغامی در مرحله اول هر عضو را به یک خوشه منفرد منتسب می‌کند، به‌طوری‌که تعداد اولیه خوشه‌ها برابر تعداد کل موارد است (Norusis, 2010; Yim and Ramdeen, 2015). خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، اعضاء را با ادغام آن‌ها با هم در یک زمان در یک‌سری مراحل دنباله‌دار به خوشه‌های همگن ترکیب می‌کند (Blei and Lafferty, 2009; Yim and Ramdeen, 2015). از هر خوشه، نماینده‌ای انتخاب و همبستگی آن با تبخیر-تعرق بررسی می‌شود. برای سادگی کار این تحلیل‌ها بیش‌تر با شکل خطی بررسی شده است. با وجود ماهیت غیرخطی ETO، برخی ترکیب‌های خطی متغیرهای آب و هوایی وجود دارند تا جایگزین

¹ Reference evapotranspiration

2006; Aschonitis et al., 2012; Antonopoulos and Antonopoulos, 2018).

در ایران پژوهش‌های زیادی در خصوص برآورد تبخیر-تعرق در مناطق مختلف انجام شده است. در پژوهشی، Mohammadi et al. (2023)، کارایی استفاده از رویکرد ترکیبی مدل‌ها در بهبود نتایج نسبت به مدل‌های انفرادی را در پیش‌بینی ماهانه تبخیر از تحت در استان سیستان و بلوچستان بررسی و نقش استفاده از رویکرد ترکیبی مدل‌ها در بهبود نتایج نسبت به مدل‌های انفرادی اثبات کرد. در پژوهش دیگری، Alempour Rajabi et al. (2023)، اقدام به مدل‌سازی فرآیند تبخیر با استفاده از الگوریتم هیبریدی پرنده کوت و شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های هواشناسی سه ایستگاه سینوپتیک گرگان، شیراز و کیش و چهار سناریو برای انتخاب ترکیب داده‌های ورودی به هر مدل کرد. نتایج نشان‌داد عملکرد سناریوی چهارم الگوریتم هیبریدی که شامل هر پنج داده هواشناسی بوده، در همه ایستگاه‌های سینوپتیک مذکور، دقیق‌تر است. همچنین، Talebi et al. (2023)، برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی و تبریز از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مادیس استفاده کردند. نتایج نشان داد تصاویر مادیس در مقایسه با تصاویر لندست در تخمین این متغیر کارایی بهتری دارند. در نهایت، Khari et al. (2023) به مقایسه روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی مصنوعی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک و مدل‌های تجربی (بلانی کریدل، هارگریوز سامانی و ایرماک) در برآورد تبخیر-تعرق مرجع نسبت به نتایج به‌دست آمده از مدل استاندارد پنمن-مانتیت-فائو با استفاده از داده‌های هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک رامهرمز اقدام نمودند. نتایج نشان داد، مدل شبکه عصبی تلفیقی با الگوریتم ژنتیک با داده‌های ورودی دمای کمینه، دمای بیشینه، سرعت باد در ارتفاع دو متری، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه و ساعات آفتابی بهترین عملکرد را در تخمین تبخیر-تعرق مرجع دارد.

باتوجه به اهمیت تبخیر-تعرق، برای محاسبه آن روابط زیادی پیشنهاد شده است که حداقل در برخی موارد به‌نظر می‌رسد، مدل مفهومی، بر اساس پیش‌دآوری پایه‌گذاری شده است. به‌علاوه اکثر پژوهش‌ها، تنها به بررسی تبخیر-تعرق پتانسیل یا مرجع پرداخته و مدل‌سازی تبخیر-تعرق واقعی، به‌ندرت مورد توجه واقع شده است. از طرفی داده‌های تبخیر-تعرق واقعی، غالباً در دسترس نیستند. لذا، در این پژوهش تلاش شده تا روابط بین متغیرهای

ساده‌تر و قابل اعتمادتری برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق باشند (Jato-Espino et al., 2017).

با توجه به دامنه گسترده متغیرهای اثرگذار تنوع زیادی از روش‌ها و مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق در ارتباط با عوامل آب و هواشناسی وجود دارد. در این راستا، Reddy (2014) با ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع در منطقه نیلور، تبخیر-تعرق روزانه مرجع (ET_o) را با نه روش تجربی (بلانی-کریدل^۱، جنسن-هایس^۲ و غیره) در منطقه نیلور از آندرا پرادش هند محاسبه کرد. ارزیابی برآوردهای نه روش، با مقایسه برآوردهای حاصل از روش‌های مذکور با نتایج حاصل از روش فائو-۵۶ پنمن-مانتیت^۳ و عملکرد سه معیار صورت گرفته و در مرحله بعد روش‌های تجربی اصلاح شدند. نتایج نشان داد، روش‌های اصلاح شده پنمن و بلانی-کریدل، عملکرد رضایت بخشی را در برآورد ET_o روزانه دارند. در ادامه، Antonopoulos and Antonopoulos (2018) روش‌های مختلف برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه در یک منطقه مدیترانه‌ای را ارزیابی کردند. در مطالعه آن‌ها نتایج برآورد نه روش تجربی تبخیر-تعرق با روش پنمن-مانتیت در ایستگاهی در شمال یونان نشان‌دهنده همبستگی بالای یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره از مجموعه داده‌های هواشناسی بود. به‌طور خاص تلاش‌های قابل‌توجهی توسط پژوهش‌گران از جمله Tsakiris Sakellariou-Makrantonaki and Vangelis (2005) and Paraskevas, Aschonitis et al. (2012), Vagenas (2006) et al. (2013), Eftimiou et al. (2013) و Antonopoulos and Antonopoulos (2015) در برآورد دقیق ET_o در یونان انجام شده است، که بر مقایسه‌ها و تحلیل حساسیت بین روش‌های مختلف، متغیرهای آن‌ها و زمان محاسبه آن‌ها متمرکز شده است. مطالعات دیگری برای ارائه روش‌های جدید تخمین ET_o با استفاده از روابط تجربی انجام شده است، که "مدل کوپایس" از نمونه‌های آن است (Alexandris et al., 2006; Antonopoulos and Antonopoulos, 2018). در این مدل روابط بر اساس فرمول پنمن با متغیرهای کاهش یافته و یا با برآورد غیرمستقیم جایگزین شده‌اند تا با استفاده از اندازه‌گیری تبخیر تحت تبخیر و ضریب آن (kp) سازگار با شرایط محیطی اطراف بتوان برآوردها را انجام داد (Valiantzas,

³ FAO-56 penman-monteith

¹ Blaney-Criddle

² Jensen-Haise

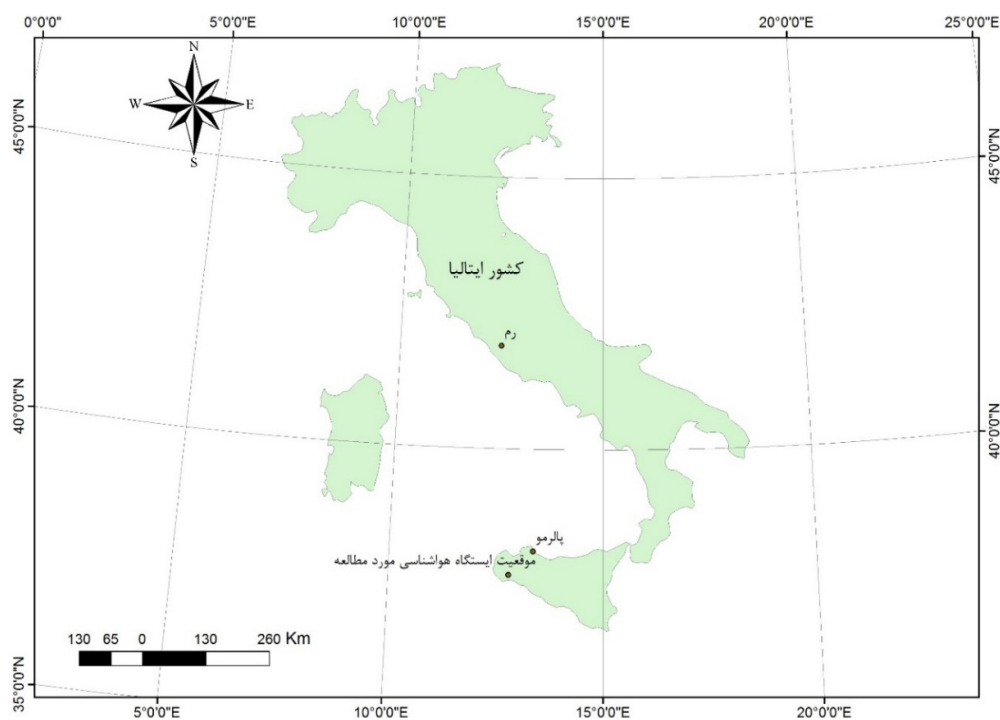
هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش‌های رگرسیون ساده و خوشه‌بندی سلسله مراتبی ادغامی در منطقه مورد مطالعه (کستلوترانو^۱ در جنوب کشور ایتالیا) استخراج شود. این روابط و تحلیل‌ها می‌توانند راه‌گشایی برای شناخت تبخیر-تعرق واقعی در مناطق با داده کم باشد. به علاوه استخراج این روابط، می‌تواند سبب شناخت بیشتر عوامل اصلی تأثیرگذار بر تبخیر-تعرق شود. در اکثر پژوهش‌ها، مدل‌سازی محدود به متغیرهای مشخص شده و استخراج پیش‌بینی‌کننده‌های در دسترس این متغیرها، می‌تواند کاربرد مدل‌ها را توسعه دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب سیسیل کشور ایتالیا در فاصله حدود پنج کیلومتر از شهر کستلوترانو، با چشم‌انداز مسطح و نوع خاک

نسبتاً همگن قرار دارد (شکل ۱). محصولات اصلی منطقه شامل زیتون رقم (*Nocellara del Belice*) (۷۰ درصد پوشش)، تاکستان‌ها (۲۴ درصد) و مرکبات (۲/۶ درصد) و دیگر محصولات باغی (۳/۴ درصد) است. آب و هوای منطقه مدیترانه‌ای است که با بارش متوسط در طول پاییز و زمستان و دمای بالای هوا و بارش‌های پایین در تابستان مشخص می‌شود. این منطقه با مساحت ۱۳ هکتار (به مختصات "۳۵' ۳۸' ۳۷° شمالی و "۵۰' ۵۰' ۱۲° شرقی) با درختان ارتفاع حدود ۳/۵ متر، به صورت شبکه منظم پنج در ۸ متر (تراکم ۲۵۰ گیاه در هکتار) است. طبقه بافت خاک بر اساس طبقه‌بندی USDA، Silty clay loam است (Cammalleri et al., 2013). آب مورد نیاز هر درخت، توسط یک قطره چکان نصب شده در کنار درخت تأمین می‌شود.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه در ایتالیا

Figure 1- The location of the studied weather station in Italy

است. علاوه بر داده‌های تبخیر-تعرق واقعی، ۲۳ متغیر هواشناسی نیز با گام‌های زمانی یک‌ساعته در ایستگاه مذکور استفاده شد. این ۲۳ متغیر عبارتند از دمای لحظه‌ای (t_{ins})، حداقل دما (t_{min})، میانگین دما (t_{avg})، حداکثر دما (t_{max}) بر حسب

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

ایستگاه هواشناسی-کشاورزی از سرویس اطلاعات هواشناسی کشاورزی سیسیل (SIAS) در مختصات "۴۵' ۳۸' ۳۷° شمالی و "۵۰' ۵۰' ۱۲° شرقی در نزدیکی منطقه مورد مطالعه، نصب شده

¹ Castelvetro

اندازه‌گیری شده است. این سامانه در ۲۰۰۹ نصب شده و اجازه هم‌دیدهبانی بر تابش خالص در فراوانی پایین (۳۰ دقیقه)، سرعت و جهت باد و بخار آب و شارهای آشفته CO₂ را در فراوانی بالا (۲۰ هرتز) فراهم می‌آورد. برج EC با یک رادیومتر خالص چهار جزئی (Logan.Campbell Scientific Inch.CNR4، UT، USA) نصب شده در ارتفاع ۸/۵ متر، برای اندازه‌گیری تابش خالص بر حسب وات بر متر مربع، یک آنومتر صوتی سه بعدی (Logan،Campbell Scientific Inch،CSAT3-D، UT، USA) برای هم‌دیدهبانی اجزای سه بعدی سرعت باد (متر بر ثانیه) و جهت (درجه) و تحلیل گر گاز واصله باز مادون قرمز (Li-cor inch،Li-7500،IRGA،USA،NE.Lincoln) برای اندازه‌گیری غلظت بخار آب و دی‌اکسیدکربن (بر حسب mmol m⁻³)، هر دو در ارتفاع هفت متر قرار دارند. این سامانه مجهز به دو صفحه شار خود واسنجی شده (HFP01SC، Hukseflux) است که به ترتیب در خاک لخت در معرض و سایه‌دار، در عمق حدود ۰/۱ متر قرار داده شده است. داده‌هایی با فراوانی پایین و بالا در یک دیتالاگر (Campbell CR5000) (Utah، Logan.Scientific Inch) مجهز به کارت حافظه PCMCIA جمع‌آوری می‌کند. شارهای گرمایی محسوس (H) و تأخیری (وات بر متر مربع) با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود (Cammalleri et al., 2013):

$$H = \rho c p \sigma W T \quad (۱)$$

$$LE = \lambda \sigma W Q \quad (۲)$$

در آن، ρ چگالی هوا (گرم بر متر مکعب)، $c p$ ظرفیت گرمایی خاص هوا در فشار ثابت (ژول بر گرم کلوین)، $\sigma W T$ (بر حسب متر کلوین بر ثانیه) و $\lambda \sigma W Q$ (گرم بر مترمربع ثانیه) به ترتیب برابر با کواریانس بین سرعت باد عمودی و دمای هوا یا چگالی بخار آب هستند. تمام شارها با یک گام زمانی ۳۰ دقیقه‌ای با استفاده از نرم‌افزار توسعه یافته توسط Manca (2023) ارزیابی شدند.

۲-۳- روش‌ها

۲-۳-۱- خوشه‌بندی

در این مطالعه برای طبقه‌بندی داده‌ها از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی ادغامی با ۷۰ درصد همبستگی به عنوان سطح شباهت با گزینه کامل به عنوان پیوند و با نرم‌افزار Minitab18 برای خوشه‌بندی و بررسی شباهت‌های متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی ایستگاه کستلوترانو استفاده شده است.

سانتی‌گراد، بارندگی به میلی‌متر (rrr)، رطوبت نسبی لحظه‌ای (u_ins)، حداقل رطوبت نسبی (u_min)، میانگین رطوبت نسبی (u_avg)، حداکثر رطوبت نسبی (u_max) بر حسب درصد، فشار ایستگاه (p0) فشار سطح دریا (p) بر حسب هکتوپاسکال، تابش کلی خورشید به مگاژول بر متر مربع (radglo)، زمان خیس بودن برگ‌ها (lw_min) به دقیقه، سرعت لحظه‌ای باد (ff2_ins)، میانگین سرعت باد (ff2_avg)، حداکثر سرعت باد (ff2_max) در ارتفاع دو متر به متر بر ثانیه، جهت لحظه‌ای باد (dd2_ins) و متوسط جهت لحظه‌ای باد (dd2_avg)، در ارتفاع دو متر به درجه، سرعت لحظه‌ای باد (ff10_ins)، میانگین سرعت باد (ff10_avg)، حداکثر سرعت باد (ff10_max)، جهت لحظه‌ای باد (dd10_ins)، میانگین جهت لحظه‌ای باد (dd10_avg) در ارتفاع ۱۰ متر به درجه و تبخیر-تعرق واقعی به میلی‌متر بر ساعت (Eta). در جدول ۱ خصوصیات توصیفی آماری متغیرهای هواشناسی استفاده شده و تبخیر-تعرق واقعی در سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۶ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری متغیرهای هواشناسی و Eta در

ایستگاه کستلوترانو

Table 1- Statistical parameters of available meteorological variables and Eta at Castelvetro station

شاخص آماری	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار
p	1039.4	989.2	1016.6	6.2
p0	1024.4	974.7	1002.1	6.0
u_max	100.0	12.0	70.8	18.5
u_avg	100.0	10.0	67.3	19.4
u_min	100.0	8.0	63.8	20.4
u_ins	100.0	11.0	67.4	19.5
rrr	23.4	0.0	0.1	0.5
t_max	39.4	-2.9	17.8	7.2
t_avg	39.0	-3.8	17.2	7.1
t_min	38.6	-4.4	16.6	7.1
t_ins	39.1	-3.8	17.2	7.1
radglo	3.7	0.0	0.7	1.01
dd10_avg	360.0	0.0	188.3	118.7
dd10_ins	359.0	0.0	185.1	117.8
ff10_max	23.6	0.7	6.0	3.1
ff10_avg	12.9	0.0	3.2	1.7
ff10_ins	19.5	0.0	3.2	1.9
dd2_avg	360.0	0.0	195.4	120.9
dd2_ins	359.0	0.0	188.3	119.4
ff2_max	20.0	0.0	4.4	2.6
ff2_avg	9.6	0.0	1.9	1.2
ff2_ins	14.0	0.0	1.9	1.5
lw_mi	60.0	0.0	24.7	28.2
Eta	1.7	0.0	0.1	0.1

تبخیر-تعرق واقعی (میلی‌متر) منطقه مورد مطالعه، توسط یک برج شار ادی کواریانس (Eddy Covariance flux tower)

۲-۳-۲- رگرسیون خطی ساده

رگرسیون خطی ساده برای پیش‌بینی متغیرها استفاده شده است، به طوری که یک متغیر (Y) وابسته به متغیر دوم (x) باشد (Bangdiwala, 2018).

$$y = ax + b \quad (۳)$$

$$R = \frac{\sum X_i Y_i}{S_x S_y} - \bar{x} \bar{y} \quad (۴)$$

$$a = R \frac{S_y}{S_x} \quad (۵)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (۶)$$

در روابط بالا، y متغیر وابسته، x متغیر مستقل، \bar{x} و \bar{y} به عنوان میانگین X_i و Y_i ، a و b ضرایب رابطه، R ضریب همبستگی نمونه، Π تعداد نمونه و S_x و S_y انحراف معیارهای X_i و Y_i هستند. با توجه به نتایج حاصل از رگرسیون و ضریب همبستگی R، اولویت‌بندی هر متغیر برای پیش‌بینی سایر متغیرها انجام و بالاترین اولویت تا پایین‌ترین اولویت برای هر متغیر رتبه‌بندی شد. سپس، میانگین رتبه اولویت‌های آن متغیر برای پیش‌بینی متغیرهای دیگر محاسبه شد. این روش برای ۲۴ متغیر با استفاده از ماکرونویسی بر مبنای محاسبات ماتریسی در اکسل استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج خوشه‌بندی

نتایج حاصل از خوشه‌بندی سلسله مراتبی ادغامی ۲۴ داده هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی در جدول ۲ است.

جدول ۲- نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی با ۷۰ درصد

همبستگی به عنوان سطح شباهت با روش کامل به عنوان پیوند متغیرهای هواشناسی موجود و تبخیر-تعرق واقعی در ایستگاه کستلوترانو

Table 2- Hierarchical clustering results with 70% correlation as similarity level with complete linkage method of available meteorological variables and ETa at Castelvetrano station

خوشه	اعضاء
1	t_ins, t_min, t_avg, t_max
2	rrr
3	u_ins, u_min, u_avg, u_max, lw_min
4	p0, p
5	Radglo, Eta
6	ff2_ins, ff2_avg, ff2_max, ff10_ins, ff10_avg, ff10_max
7	dd2_ins, dd2_avg, dd10_ins, dd10_avg

جدول ۲ نشان می‌دهد تعداد هفت خوشه با روش سلسله مراتبی و ۷۰ درصد همبستگی تشکیل شده که نشان دهنده آن

است که متغیرهای درون هر خوشه بالاترین همبستگی را نسبت به هم‌دیگر دارند در صورتی که متغیرهای هر خوشه نسبت به سایر خوشه‌ها کم‌ترین همبستگی و شباهت را دارند. بر این اساس در خوشه شماره یک متغیرهای مختلف دما (لحظه‌ای، حداقل، حداکثر و متوسط) بالاترین شباهت و همبستگی را نسبت به هم‌دیگر دارند. از طرفی در خوشه شماره دو، متغیر بارندگی تنها متغیر در این خوشه است که با هیچ کدام از ۲۳ متغیر دیگر همبستگی بالاتر از ۷۰ درصد نداشته و این خوشه، تنها خوشه‌ای است که فقط یک متغیر را به خود اختصاص داده است. در خوشه شماره سه نیز متغیرهای هم‌نام و هم‌ماهیت رطوبت (لحظه‌ای، حداقل، حداکثر و متوسط) بالاترین شباهت و همبستگی را نسبت به هم‌دیگر نشان می‌دهند. از طرفی در خوشه شماره چهار نیز متغیرهای فشار (فشار ایستگاه و فشار سطح دریا) قرار گرفتند. در خوشه شماره پنج، متغیرهای تابش کلی خورشید و تبخیر-تعرق قرار گرفتند و این خوشه تنها خوشه‌ای است که متغیرهای غیر هم‌نام هم‌ماهیت را به خود اختصاص داده بودند. در خوشه شماره شش نیز متغیرهای مختلف باد (لحظه‌ای، حداقل، حداکثر و متوسط در ارتفاع دو و ۱۰ متری) قرار داشتند. به همین ترتیب خوشه هفت نیز متغیرهای جهت باد را نشان می‌داد. بنابراین، جمع‌بندی نتایج طبقه‌بندی نشان داد متغیرهای هواشناسی به غیر از متغیرهای هم‌نام (مانند متغیرهای دما) تقریباً مستقل هستند و تمام متغیرهای هم‌نام در یک خوشه قرار گرفتند و تنها متغیرهای غیر هم‌نام که در یک خوشه واقع شدند، تابش کلی خورشید و تبخیر-تعرق باشد.

۳-۲- رتبه‌بندی پیش‌بینی‌کننده‌ها مبتنی بر متغیرها

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی ۲۴ متغیر هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی در قالب ماتریسی با ابعاد ۲۴×۲۴ به دست آمد. بر این اساس، میانگین رتبه اولویت‌های آن متغیر برای پیش‌بینی متغیرهای دیگر محاسبه شد. جدول ۳ نتایج رتبه‌بندی پیش‌بینی‌کننده‌های متغیرهای هواشناسی موجود و تبخیر-تعرق در ایستگاه کستلوترانو به ترتیب اولویت را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج رتبه‌بندی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌های متغیرهای هواشناسی موجود و Eta در ایستگاه کستلوترانو
Table 3- The results of the ranking of the predictor variables of the existing meteorological variables and Eta at Castelotrano station

رتبه متغیر به عنوان پیش‌بینی‌کننده	نام متغیر	میانگین اولویت	بهترین پیش‌بینی‌کننده متغیر
1	U_avg	8.375	U_min
2	U_min	8.542	U_avg
3	Radglo	8.625	Eta
4	Ff2_max	8.833	Ff10_max
5	U_ins	8.917	U_avg
6	U_max	8.958	U_avg
7	ff10_max	9.167	Ff10_avg
8	ff10_avg	9.625	ff10_max
9	ff2_avg	10.958	ff2_max
10	Lw_min	11.208	U_min
11	Eta	11.583	Radglo
12	Ff10_ins	11.875	ff10_avg
13	T_avg	11.958	T_max
14	T_max	12.167	T_avg
15	T_min	12.250	T_avg
16	T_ins	12.292	T_avg
17	Ff2_ins	13.167	Ff2_avg
18	P	15.792	P0
19	P0	15.875	P
20	Dd10_ins	16.208	dd10_avg
21	Dd10_avg	16.833	Dd2_avg
22	Dd2_ins	18.458	ff2_avg
23	dd2_avg	18.542	ff2_max
24	Rr	19.792	Lw_min

پیش‌بینی‌کننده تابش کلی خورشید است. در رتبه بعدی حداکثر سرعت باد در ارتفاع دو متری، به‌عنوان بهترین پیش‌بینی‌کننده ۲۳ متغیر هواشناسی تعیین شد و متغیر حداکثر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری بهترین جایگزین حداکثر سرعت باد در ارتفاع دو متری است. در رتبه‌های بعدی هم متغیرهای لحظه‌ای و حداکثر رطوبت نسبی بهترین پیش‌بینی‌کننده متغیرهای هواشناسی و از طرفی میانگین رطوبت نسبی، بهترین جایگزین برای پیش‌بینی متغیرهای لحظه‌ای و حداکثر رطوبت نسبی است. در ادامه، متغیرهای مختلف سرعت باد، تبخیر-تعرق، دما، فشار، جهت باد در ارتفاعات مختلف و نهایتاً بارندگی به‌ترتیب در اولویت پیش‌بینی‌کننده‌های متغیرهای هواشناسی قرار دارند. از ۲۴ متغیر پیش‌بینی‌کننده، پنج متغیر مربوط به متغیرهای مختلف رطوبت نسبی، ۱۰ متغیر مربوط به متغیرهای مختلف سرعت و جهت باد، دو متغیر مربوط به فشار و چهار متغیر مربوط به متغیرهای مختلف دما است. متغیر زمان خیس بودن برگ‌ها نیز در رتبه دهم بهترین پیش‌بینی‌کننده متغیرهای هواشناسی قرار دارد و حداقل رطوبت نسبی نیز نقش بهترین جایگزین متغیر مذکور را بازی می‌کند. مجموع کل بارندگی یک‌ساعته نیز آخرین رتبه پیش‌بینی‌کننده متغیرهای هواشناسی تعیین شد.

۳-۳- رتبه‌بندی پیش‌بینی‌کننده‌ها مبتنی بر خوشه‌ها

با توجه به نتایج رگرسیون خطی و خوشه بندی سلسله مراتبی، نماینده هر خوشه بر اساس بالاترین رتبه برای پیش‌بینی متغیرها انتخاب شده است. هم‌چنین، بهترین پیش‌بینی‌کننده اعضای خوشه از میان اعضای خود خوشه و یا بهترین پیش‌بینی‌کننده جایگزین نماینده درون خوشه مذکور از میان خوشه‌های دیگر تعیین شد که نتایج آن بر اساس جدول ۴ نشان داده شده است.

مطابق جدول ۳ بالاترین رتبه برای متغیر پیش‌بینی‌کننده سایر متغیرها، متعلق به میانگین رطوبت نسبی و از طرفی بهترین پیش‌بینی‌کننده متغیر میانگین رطوبت نسبی، حداقل رطوبت نسبی است که در رتبه بعدی نقش این دو متغیر به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده سایر متغیرها و پیش‌بینی‌شونده جابه‌جا می‌شود. در رتبه سوم تابش کلی خورشید پیش‌بینی‌کننده مناسبی برای سایر متغیرهای هواشناسی و در این رتبه، تبخیر-تعرق بهترین

جدول ۴- نتایج نماینده خوشه‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌های درون خوشه‌ای و برون خوشه‌ای

Table 4- Results of clusters and predictors within and outside the cluster

شماره خوشه	نماینده خوشه	بهترین پیش‌بینی‌کننده درون خوشه‌ای	بهترین پیش‌بینی‌کننده جایگزین نماینده خوشه
1	T_avg [°C]	T_avg [°C]	U_max
2	Rrr	Rrr	Lw_min
3	U_avg	U_avg	Radglo
4	P	P	ff10_max
5	Radglo	Radglo	U_min
6	ff2_max	ff2_avg	Radglo
7	dd10_ins	dd2_avg	Radglo

همان خوشه و متغیر حداکثر رطوبت نسبی خارج از خوشه شماره ۴، بهترین جایگزین متغیر دمای متوسط متغیرهای خوشه

مطابق نتایج جمع‌بندی شده جدول ۴، بهترین پیش‌بینی‌کننده درون خوشه‌ای برای اعضای خوشه شماره ۴ یک دمای متوسط

و حداقل رطوبت نسبی به‌دست آمده است. برای خوشه شماره ۳ شش به‌ترتیب بهترین پیش‌بینی‌کننده درون و جایگزین برون خوشه به‌ترتیب متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری و تابش کلی خورشید شناخته شد. برای خوشه شماره ۴ هفت نیز بهترین پیش‌بینی‌کننده درون و جایگزین برون خوشه به‌ترتیب متوسط جهت باد لحظه‌ای در ارتفاع دو متری و تابش کلی خورشید شناخته شد.

۳-۴- رتبه‌بندی متغیرهای پیش‌بینی کننده تبخیر-تعرق

با توجه به اهمیت تبخیر-تعرق واقعی، رتبه‌بندی پیش‌بینی این متغیر مبتنی بر ضریب همبستگی R انجام شد (جدول ۵).

شماره ۱ یک به‌دست آمده است. در جدول مذکور بهترین پیش‌بینی‌کننده درون خوشه‌ای برای اعضای خوشه شماره ۲ مجموع بارندگی یک‌ساعته است. بهترین پیش‌بینی‌کننده برون خوشه‌ای جایگزین مجموع بارندگی یک‌ساعته، زمان خیس بودن برگ‌ها و پیش‌بینی‌کننده ارجح درون خوشه‌ای و جایگزین برون خوشه‌ای برای خوشه شماره ۳ نیز به‌ترتیب میانگین رطوبت نسبی و تابش کلی خورشید شناخته شد. برای خوشه شماره ۴، چهار، پیش‌بینی‌کننده منتخب درون و جایگزین برون خوشه‌ای به‌ترتیب فشار سطح دریا و حداکثر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری است. از طرفی بهترین پیش‌بینی‌کننده درون خوشه‌ای و جایگزین برون خوشه‌ای برای خوشه شماره ۵ پنج نیز به‌ترتیب تابش کلی خورشید

جدول ۵- نتایج رتبه‌بندی متغیرهای پیش‌بینی کننده تبخیر-تعرق

Table 5- The results of ranking variables predicting ETa

رتبه	نام متغیر	R	رابطه	نام خوشه
1	Radglo	0.713	$\text{Eta}=0.076237789 \text{ Radglo}+0.001925$	5
2	U_ins	-0.497	$\text{Eta}=-0.002610484 \text{ U_ins}+0.2339$	3
3	U_min	-0.493	$\text{Eta}=-0.002493835 \text{ U_min}+0.217124$	3
4	U_avg	-0.487	$\text{Eta}=-0.002575381 \text{ U_avg}+0.23133$	3
5	U_max	-0.471	$\text{Eta}=-0.002601272 \text{ U_max}+0.242217$	3
6	Lw_min	-0.409	$\text{Eta}=-0.001581038 \text{ Lw_min}+0.096154$	3
7	ff2_max	0.354	$\text{Eta}=0.01527294 \text{ ff2_max}-0.00685$	6
8	T_ins	0.346	$\text{Eta}=0.00529909 \text{ T_ins}-0.03538$	1
9	ff2_avg	0.345	$\text{Eta}=0.030432664 \text{ ff2_avg}+0.004625$	6
10	T_avg	0.338	$\text{Eta}=0.005198481 \text{ T_avg}-0.03356$	1
11	T_max	0.337	$\text{Eta}=0.005144361 \text{ T_max}-0.03575$	1
12	T_min	0.336	$\text{Eta}=0.005198859 \text{ T_min}-0.03051$	1
13	ff10_avg	0.335	$\text{Eta}=0.022061491 \text{ ff10_avg}-0.00889$	6
14	ff10_max	0.327	$\text{Eta}=0.011581504 \text{ ff10_max}-0.00893$	6
15	ff10_ins	0.307	$\text{Eta}=0.01752295 \text{ ff10_ins}+0.004667$	6
16	ff2_ins	0.304	$\text{Eta}=0.022891438 \text{ ff2_ins}+0.017534$	6
17	dd10_ins	0.139	$\text{Eta}=0.000128765 \text{ dd10_ins}+0.03445$	7
18	dd10_avg	0.128	$\text{Eta}=0.000117329 \text{ dd10_avg}+0.036235$	7
19	dd2_ins	0.108	$\text{Eta}=9.88385\text{E}-05 \text{ dd2_ins}+0.039507$	7
20	dd2_avg	0.092	$\text{Eta}=8.25797\text{E}-05 \text{ dd2_avg}+0.042183$	7
21	Rrr	-0.040	$\text{Eta}=-0.007337676 \text{ Rrr}+0.05846$	2
22	P0	0.019	$\text{Eta}=0.000359827 \text{ P0}-0.30258$	4
23	P	-0.001	$\text{Eta}=-2.11385\text{E}-05 \text{ P}+0.079438$	4

مشاهده نشد و این موضوع، لزوم تکرار بررسی روابط بین متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق را تأیید می‌کند. همچنین، این موضوع تأکید روش‌های مبتنی بر رابطه بقای انرژی و استفاده از ابزار سنجش از دور را تأیید می‌کند. متغیرهای مستقل رطوبت نسبی لحظه‌ای و حداقل با ضریب همبستگی حدود ۵۰ درصد (رابطه معکوس) به‌ترتیب دومین و سومین رتبه تخمین تبخیر-تعرق واقعی را به خود اختصاص دادند که به‌دلیل نقش این متغیرها در تعیین میزان عرضه آب در فرآیند تبخیر-تعرق و کاهش تبخیر-تعرق با افزایش این متغیرها، نتیجه معقول است.

ارزیابی همبستگی‌های تحلیل رگرسیونی در جدول ۵ نشان می‌دهد که بهترین پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی با ضریب همبستگی بیش از ۷۰ درصد متعلق به متغیر مستقل تابش کلی خورشید و نشان‌دهنده تأثیر این متغیر به‌عنوان منبع تأمین‌کننده انرژی پدیده تبخیر-تعرق است. اگرچه در همین راستا پژوهش Baradaran et al. (2018) نشان داد که در آب و هوای مدیترانه‌ای، بالاترین همبستگی در تخمین تبخیر-تعرق مربوط به دمای حداکثر و بارش است، اما همبستگی قابل‌قبولی بین متغیر مستقل بارندگی و متغیر وابسته تبخیر-تعرق واقعی

برآورد این متغیر با روش‌های سنجش از دور، گزینه‌های مناسبی برای استفاده در مناطق فاقد آمار است. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی آب و هوا و اجرای مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق واقعی با مقادیر آینده متغیرهای آب و هوایی، با توجه به اهمیت این متغیر در نیاز آبی و تأثیر تغییر اقلیم بر آن، در برنامه‌ریزی مصارف آب آینده کارساز خواهد بود.

سپاسگزاری

از مرحوم جوزبه پروونزانو که در دوره فرصت مطالعاتی با ایشان همکاری داشته‌ام و مانند پدری مهربان از هیچ کمکی دریغ نکردند، تشکر می‌کنم. بی‌شک بدون کمک ایشان، این مقاله قابل تدوین نبود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

در صورت درخواست از نویسنده مسئول، داده‌ها در اختیار قرار خواهند گرفت.

مشارکت نویسندگان

وفا محمودی‌نژاد: مفهوم‌سازی، تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ افشین هنربخش: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ خدایار عبدالهی: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ ماریو دیکارو: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري.

منابع

برادران، فاطمه، سلطانی محمدی، امیر، و ایزدپناه، زهرا (۱۳۹۷). ارزیابی مدل SIMETAW در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی و تبخیر و تعرق پتانسیل در چهار اقلیم مختلف. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۲)، ۲۳۷-۲۴۹. doi:10.22055/JISE.2017.13182

خاری، دانیال، اگدرنژاد، اصلان، و ابراهیمی پاک، نیازعلی (۱۴۰۲). مقایسه مدل‌های هوش مصنوعی و مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک رامهرمز). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۲)، ۱۱۲-۱۲۴. doi:10.22098/mmws.2022.11293.1117

رتبه‌های چهار و پنج نیز متعلق به میانگین و حداکثر رطوبت با ضریب همبستگی حدود ۴۹ درصد است. متغیر مستقل مدت زمان خیس بودن برگ‌ها با ضریب همبستگی ۴۰ درصد رتبه ششم را به خود اختصاص داده است. مشخصات سرعت باد، دما، جهت باد، مجموع بارندگی سالانه و فشار به ترتیب با ضرایب همبستگی کم‌تر از ۳۰ درصد مطابق جدول ۵ متغیرهای مستقل تخمین تبخیر-تعرق واقعی به شمار می‌آیند. استفاده از روش‌های رگرسیونی همان‌گونه که (Mehdizadeh et al. (2017) دقت آن‌ها را تأیید نمودند، به عنوان روشی ساده برای تخمین تبخیر-تعرق تأیید و گسترش آن به خصوص در استخراج مدل مفهومی توصیه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی روابط بین متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی در منطقه کستلوترانو انجام شده و نتایج نشان داد، استفاده از روش‌های آماری می‌تواند سبب، جلوگیری از پیش‌دوری در خصوص متغیرهای تأثیرگذار بر تبخیر-تعرق واقعی شود. قرار گرفتن متغیرهای غیرهمنام در خوشه‌های مختلف نشان دهنده استقلال این متغیرها بوده و در مدل‌سازی تبخیر-تعرق واقعی باید از استفاده هم‌زمان از متغیرهای هم‌نام اجتناب کرد. از طرفی تابش کلی خورشید به عنوان بهترین پیش‌بینی‌کننده تبخیر-تعرق، مؤثر استفاده از مدل‌های مبتنی بر قانون بقای انرژی و ابزار سنجش از دور است.

از طرفی به دلیل تبعیت طبیعت از قوانین فیزیکی، روابط استخراج شده بین متغیرهای هواشناسی و تبخیر-تعرق واقعی با صحت‌سنجی، قابل بررسی و استفاده در مناطق فاقد آمار تبخیر-تعرق واقعی است. هفت خوشه استخراج شده در این پژوهش نشان داد، به‌طور کلی، هفت عامل تأثیرگذار بر اقلیم وجود دارد. استخراج روابط بین متغیرهای هواشناسی سبب می‌شود تا در صورت نبود یک متغیر، از متغیر پیش‌بینی‌کننده برای مدل‌سازی استفاده شود. تکرار روش این پژوهش برای مناطق مختلف، می‌تواند سبب استخراج روابط جهانی برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق شده و سبب شناخت بیش‌تر این مؤلفه هیدرولوژیک شود. با توجه به این‌که تبخیر-تعرق واقعی تابعی از وضعیت آب و هوا، خاک و پوشش گیاهی است، لذا وارد نمودن متغیرهای مربوط به خاک و پوشش گیاهی در بهبود روابط مدل‌سازی تبخیر-تعرق مؤثر خواهد بود. هم‌چنین، داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی و

- طالبی، حامد، صمدیان فرد، سعید، و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۲). روش جدید مبتنی بر تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنجنده مادیس برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع ماهانه در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۸۰-۱۹۵. doi:10.22098/mmws.2023.12048.1198.195-180
- عالم‌پور رجبی، فرناز، قربانی، محمدعلی، و اسدی، اسماعیل (۱۴۰۲). مدل‌سازی فرآیند تبخیر با استفاده از الگوریتم هیبریدی پرده کوت
- و شبکه عصبی مصنوعی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۲۷۹-۲۹۴. doi:10.22098/mmws.2023.12692.1266
- محمدی، مجتبی، جهان‌تبخ، حسین، و ذوالفقاری، فرهاد (۱۴۰۲). پیش‌بینی ماهانه تبخیر از تشت با استفاده از رویکرد انفرادی و ترکیبی مدل‌های داده-کاوی در مناطق خشک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۲۲۷-۲۴۰. doi:10.22098/mmws.2023.12728.1270

References

- Aguirre-García, S.D., Aranda-Barranco, S., Nieto, H., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.P., & Guerrero-Rascado, J.L. (2021). Modelling actual evapotranspiration using a two source energy balance model with Sentinel imagery in herbaceous-free and herbaceous-cover Mediterranean olive orchards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108692. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108692
- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. *Agricultural Water Management*, 82(3), 371-386. doi:10.1016/j.agwat.2005.08.001
- Alempour Rajabi, F., Ghorbani, M., & Asadi, A. (2023). Modeling of the evaporation process using the hybrid algorithm of the COOT bird and artificial neural network, *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 279-294. doi:10.22098/mmws.2023.12692.1266. [In Persian]
- Antonopoulos, V.Z., & Antonopoulos, A.V. (2018). Evaluation of different methods to estimate monthly reference evapotranspiration in a Mediterranean area. *Water Utility Journal*, 18, 61-77. https://www.ewra.net/wuj/pdf/WUJ_2018_18_06.pdf
- Aschonitis, V.G., Antonopoulos, V.Z., & Papamichail, D.M. (2012). Evaluation of pan coefficient equations in a semi-arid Mediterranean environment using the ASCE standardized Penman-Monteith method. *Agricultural Sciences*, 3(1), 58-65. doi:10.4236/as.2012.31008
- Aydın, Y. (2021). Assessing of evapotranspiration models using limited climatic data in Southeast Anatolian Project Region of Turkey. *Peer Journal*, 9, e11571. doi:10.7717/peerj.11571
- Bangdiwala, S.I. (2018). Regression: simple linear. *Injury Control and Safety Promotion*, 25(1), 113-115. doi:10.1080/17457300.2018.1426702
- Baradaran, F., Mohammadi, E., & Izadpanah, Z. (2018). Evaluation of SIMETAW model for simulation of meteorological parameters and potential evapotranspiration in four different climates. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 40(2), 237-249. doi:10.22055/JISE.2017.13182. [In Persian]
- Blei, D.M., & Lafferty, J.D. (2009). *Text mining: Classification, clustering, and applications*. chapter Topic Models, Chapman & Hall/CRC. doi.org/10.1201/9781420059458
- Brutsaert, W. (2005). *Evapotranspiration hydrology: An Introduction*; Brutsaert, W., Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 117-158. doi:10.1017/CBO9780511808470
- Brutsaert, W.H. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Springer, Dordrecht, 299. doi:10.1007/978-94-017-1497-6
- Cammalleri, C., Rallo, G., Agnese, C., Ciralo, G., Minacapilli, M., & Provenzano, G. (2013). Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agricultural Water Management*, 120, 89-97. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.003
- Çobaner, M., Çitakoğlu, H., Haktanır, T., & Yelkara, F. (2016). Determining the most appropriate Hargreaves-Samani equation for the Mediterranean region. *Engineering Journal*, 7(2), 181-190.
- Fu, C., Wu, H., Zhu, Z., Song, C., Xue, B., Wu, H., Ji, Z., & Dong, L. (2021). Exploring the potential factors on the striking water level variation of the two largest semi-arid-region lakes in northeastern Asia. *Catena*, 198, 105037. doi:10.1016/j.catena.2020.105037
- Efthimiou, N., Alexandris, S., Karavitis, C., & Mamassis, N. (2013). Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman-Monteith procedure. *European Water*, 42, 19-34.

- Ganji, H., & Kajisa, T. (2019). Assessing reference evapotranspiration using Penman-Monteith and Pan methods in the West region of Afghanistan. *International Journal of GEOMATE*, 16(56), 209-216. doi:10.21660/2019.56.5305
- Jato-Espino, D., Charlesworth, S.M., Perales-Momparler, S., & Andrés-Doménech, I. (2017). Prediction of evapotranspiration in a Mediterranean region using basic meteorological variables. *Hydrologic Engineering*, 22(4), 04016064. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001485
- Khari, D., Agdarnejad, A., & Ebrahimi Pak, N. (2023). Comparison of artificial intelligence models and experimental models in estimating reference evapotranspiration (Case study: Ramhormoz synoptic station). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 112-124. doi:10.22098/mmws.2022.11293.1117. [In Persian]
- Kitsara, G., Papaioannou, G., Zygoura, E., & Kerkides, P. (2015). Trends of reference evapotranspiration over Greece in a future climate. In E-proceedings of 9th World Congress of EWRA "Water resources management in a changing world: challenges and opportunities", Istanbul, Turkey. I-1. session (Vol. 4).
- Maina, M.M., Amin, M.S.M., Aimrun, W., & Asha, T.S. (2012). Evaluation of different ETO calculation methods: a case study in Kano State, Nigeria. *Philipp Agric Scientist*, 95(4), 378-382.
- Manca G., (2003). Analisi dei flussi di carbonio di una cronosequenza di cerro (*Quercus cerris* L.) dell'Italia centrale attraverso la tecnica della correlazione turbolenta. Ph.D. Thesis, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italian.
- Mehdizadeh, S., Behmanesh, J., & Khalili, K. (2017). Using MARS, SVM, GEP and empirical equations for estimation of monthly mean reference evapotranspiration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 103-114. doi:10.1016/j.compag.2017.05.002
- Mohammadi, M., Jahantigh, H., & Zulfqari, F. (2023). Monthly prediction of pan evaporation using individual and combined approach of data mining models in arid regions, *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 227-240. doi:10.22098/mmws.2023.12728.1270. [In Persian]
- Naoum, S., & Tsanis, I.K. (2003). Hydroinformatics in evapotranspiration estimation. *Environmental Modelling & Software*, 18(3), 261-271. doi:10.1016/S1364-8152(02)00076-2
- Norusis, M.J. (2010). *Cluster Analysis in PASW Statistics 18 Statistical Procedures Companion Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.*
- Paraskevas, C., Georgiou, P., Ilias, A., Panoras, A., & Babajimopoulos, C. (2013). Evapotranspiration and simulation of soil water movement in small area vegetation. *International Agrophysics*, 27(4), 445-453. doi:10.2478/intag-2013-0015
- REDDY, K.C. (2014). Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods in Nellore region, Civil, Structural, *Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development*, 4(2), 111, 118. https://www.academia.edu/download/33647009/13_Civil_Evaluation_-_K_Chandrasekhar_Reddy.Pdf
- Sakellariou-Makrantonaki, M., & Vagenas, I. (2006). Mapping crop evapotranspiration and total crop water requirements estimation in Central Greece. *European Water*, 13(14), 3-13. http://ewra.net/ew/pdf/EW_2006_13-14_01.pdf
- Steduto, P., Calciandro, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Martinez Cob, A, Faci, M.j. & Snyder, R.L. (1996). Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the mediterranean region. in: evapotranspiration and irrigation scheduling. in evapotranspiration and irrigation scheduling. *Proceedings of the International Conference*. 364-367. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19971911218>
- Talebi, H., Samdian Fard, S., & Valizadeh Kamran, Kh. (2023). A novel method based on Landsat 8 and MODIS satellite images to estimate monthly reference evapotranspiration in arid and semi-arid climates, *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 180-195. doi:10.22098/mmws.2023.12048.1198. [In Persian]
- Tan, P., Steinbach, M., & Kumar, V. (2005). *Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms. Introduction to Data Mining*. Addison-Wesley, Boston, USA, 487-568. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.034
- Tryon, R. (1939). *Cluster Analysis: Correlation Profile and Orthometric (factor) Analysis for the Isolation of Unities in Mind and Personality*. Edwards Brothers Malloy, Ann Arbor, Michigan, USA. <https://www.scirp>

- org/reference/referencespapers?referenceid=1866589
- Tsakiris, G., & Vangelis, H.J.E.W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11. <http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Refs/Drought/Establishing%20a%20Drought%20Index%20Incorporating%20Evapotranspiration.pdf>
- UNESCO, & UN-Water. (2020). United Nations World Water Development Report 2020. Paris, France. <https://aquadocs.org/handle/1834/42227>
- Trajković, S., & Stojnić, V. (2008). Simple daily ET0 estimation techniques. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 6(2), 187-192. doi:10.2298/FUACE0802187T
- Valiantzas, J.D. (2006). Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Hydrology*, 331(3-4), 690-702. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.012
- Yim, O., & Ramdeen, K.T. (2015). Hierarchical cluster analysis: comparison of three linkage measures and application to psychological data. *The Quantitative Methods for Psychology*, 11(1), 8-21. doi:10.20982/tqmp.11.1.p008