

Study of Relative Effectiveness of Climatic Factors on Potential Evapotranspiration Using the Factor Analysis (Case Study: Zanjan and Mahneshan Stations)

N. Heidari^{1*}, Y. Dinpashoh², and A. Fakhri-Fard³

Abstract

In this research relative importance of different meteorological variables that affect potential evapotranspiration were analyzed. Two stations of Zanjan and Mahneshan with at least twenty years of data up to 2021 were selected for the research. The Penman-Monteith method was used to estimate ET_0 . In order to study the relative importance of climatic variables the factor analysis method was used. The correlation between precipitation, means of air temperature (maximum and minimum), wind velocity, relative humidity and actual sunshine hours were analyzed. Results showed that except one item with no significant correlation (wind and precipitation) all the other correlation coefficients were significant in 5 percent level. In both stations the eigenvalues of the two first factors were greater than one, however, they were negligible (close to zero) in the cases of other factors. In Zanjan the first two factors accounted for about 80.673 percent of total variance. This value was more than 82.5 percent in the case of Mahneshan station. In both stations the actual sunshine hour was the main parameter affected ET_0 followed by the T_{max} , T_{min} and RH positioned in second to fourth ranks. Results indicated that for the selected stations the precipitation had no effect on ET_0 . Plotting the position of parameters on Cartesian plain showed that the position of parameters in the two stations are similar. The findings of this study are helpful in water resources management in the region.

Keywords: Zanjan Province, Evapotranspiration, Factor Analysis, Principal Component Analysis.

Received: July 18, 2023

Accepted: October 26, 2023

1- M.Sc. Student of Water Resources Management, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: n.hedari1998@gmail.com

2- Professor, Water Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Professor, Water Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.181864](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.181864)

بررسی اثر نسبی عوامل اقلیمی بر تبخیر-تعرق پتانسیل با روش تجزیه به عامل‌ها (مطالعه موردی: ایستگاه‌های زنجان و ماهنشان)

نازنین حیدری^{۱*}، یعقوب دین‌پژوه^۲ و احمد فاختری‌فرد^۳

چکیده

در این تحقیق، اهمیت نسبی متغیرهای مختلف هواشناسی مؤثر بر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) در دو ایستگاه (زنجان و ماهنشان) با حداقل ۲۰ سال آمار منتهی به ۲۰۲۱ تحلیل شده است. روش پنمن-مانتیث برای تخمین ET_0 استفاده شد. برای مطالعه اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی بر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه، از روش تجزیه به عامل‌ها استفاده شد. داده‌ها شامل بارش، میانگین دمای هوا (بیشینه و کمینه)، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بوده و همبستگی بین آنها تحلیل شد. نتایج نشان داد که بجز یک مورد (باد با بارش) که همبستگی معنی‌دار نداشته‌اند، در سایر موارد ضرایب همبستگی بین متغیرها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بودند. در هر دو ایستگاه، دو مؤلفه اول دارای مقدار ویژه بیش از یک بود و مؤلفه‌های بعدی مقدار ویژه بسیار ناچیزی (نزدیک صفر) داشتند. در زنجان، دو مؤلفه اول در کل ۸۰/۶۷۳ درصد واریانس را توجیه می‌کرد. این رقم در ماهنشان بیش از ۸۲/۵ درصد بود. در هر دو ایستگاه پارامتر ساعات آفتابی مهمترین عامل مؤثر بر ET_0 بود، پس از آن پارامترهای حداکثر دمای هوا، حداقل دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در هر دو ایستگاه، متغیر بارش بر روی ET_0 اثر چندانی نداشته است. رسم نمودار عمود برهم مؤلفه‌های اول و دوم در ایستگاه‌ها نشان داد که الگوی موقعیت مکانی پارامترهای اقلیمی در هر دو ایستگاه مشابه هم بود. یافته‌های این مطالعه در مدیریت منابع آب منطقه می‌تواند مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: استان زنجان، تبخیر-تعرق، تجزیه به عامل‌ها، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۸/۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران.

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

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

آگاهی در زمینه اثر پارامترهای اقلیمی روی تبخیر-تعرق در زمینه مدیریت منابع آب از هر نظر مانند عملیات کشاورزی مفید است. تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) بنا به تعریف عبارت است از میزان شدت تبخیر-تعرق از گیاه چمن سبز به ارتفاع ۱۲-۸ سانتی متر، خوب آبیاری شده و فاقد بیماری در یک مدت زمان معین (مانند یک روز) است. این پدیده به پارامترهای مختلف اقلیمی از جمله میانگین دمای روزانه هوا (بیشینه و کمینه)، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، ساعات آفتابی و سرعت باد بستگی دارد. با این حال، در ایستگاه‌های هواشناسی مختلف ممکن است اهمیت نسبی این متغیرها به یک اندازه نباشد (Mohan & Arumugam, 1996). در زمینه مذکور کارهای متعددی در جهان و ایران انجام شده است. مثلاً Mohan & Arumugam (1996) از روش تجزیه به عامل‌ها برای مطالعه اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در ۸ ایستگاه هواشناسی واقع در هند بهره بردند. آنها نتیجه گرفتند با این روش، سه عامل اول که هیچگونه همبستگی باهمدیگر ندارند ولی هرکدام به نوبه خود به پارامترهای اقلیمی وابسته هستند، حدود ۸۵ درصد کل واریانس داده‌ها را توجیه می‌کند. این عامل‌ها به پدیده‌های فیزیکی که روی ET_0 تأثیر می‌گذارند مربوط بوده و متغیرهای رطوبت نسبی، دمای هوا و سرعت باد به عنوان سه متغیر مهم روی ET_0 منطقه گزارش شده است. از طرفی متغیرهای بارش و ساعات آفتابی کم‌ترین تأثیر را روی ET_0 داشته است. Popova et al. (2006) مقادیر ET_0 را با استفاده از داده‌های محدود هواشناسی در دشت تریس واقع در جنوب بلغارستان برآورد کردند. آنان از داده‌های پنج ایستگاه هواشناسی در این دشت استفاده و نتیجه گرفتند که روش پیشنهادی فائو برای تخمین ET_0 خطای کمتری داشته و تنها از داده‌های حداکثر و حداقل دمای هوا از آن برای برآورد ET_0 استفاده می‌شود. Haghigat & Fooladmand (2007) با استفاده از داده‌های اقلیمی هفت ایستگاه سینوپتیک در استان فارس و هفت ایستگاه دیگر واقع در خارج از استان، برای تخمین ET_0 بهره بردند. ایشان برای این کار معادله هارگریوز را براساس خروجی روش پنمن-مانتیه واسنجی کردند. نتایج نشان داد که در این منطقه به جای ضریب اصلی ۰/۰۲۳ در معادله هارگریوز از ضرایب جدید معرفی شده در مقاله ایشان استفاده شود. Jalali et al. (2021) برای تخمین ET_0 از مدل هارگریوز-سامانی تعدیل یافته بر اساس ارتفاع ایستگاه استفاده کردند. ایشان گزارش دادند که مدل جدید نتایج را با دقت بهتری نسبت به مدل هارگریوز-سامانی ارائه می‌دهد. Niazi (2018) پهنه‌بندی ET_0 را در ایران با روش‌های انتقال جرم انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که ۷۵ درصد سطح کشور دارای

اقلیم خشک و ۲۱ درصد آن دارای اقلیم نیمه‌خشک است. Zhai et al. (2010) از ۱۱ معادله تجربی برای ET_0 را با داده‌های تبخیر از تست اندازه‌گیری شده در ۱۰ ایستگاه هواشناسی واقع در استان گانسو در شمال غربی چین مقایسه کردند. این مقایسه ابتدا با استفاده از مقادیر پیش فرض مدل‌ها انجام شد و سپس مقادیر ضریب واسنجی شده جدید معرفی شد. بر اساس نتایج مقایسه قبل و بعد از واسنجی، معلوم شد که روش دورنبوس و پروت برای مناطق خشک، نیمه‌خشک و مرطوب چین مناسب‌تر بود. بنابراین، نتیجه گرفتند که واسنجی می‌تواند برای اصلاح معادلات تخمین ET_0 با داده‌های چند ایستگاه در بهبود دقت برآورد مؤثر است. Valipour (2015) مدل‌های ET_0 مختلف مبتنی بر دمای هوا را با مقایسه خروجی هر کدام با مدل پنمن-مانتیه اصلاح شده توسط FAO مطالعه کردند. برای این منظور از داده‌های هواشناسی ۱۸۱ ایستگاه سینوپتیک در ۳۱ استان ایران استفاده کردند. ایشان از ۱۱ مدل تجربی مبتنی بر دما استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل اصلاح شده هارگریوز-سامانی مقدار ET_0 را بهتر از مدل‌های دیگر برآورد می‌کند. Zeraati Neyshabouri et al. (2022) برای برآورد ET_0 ماهانه دشت نیشابور از روش‌های مختلف شامل رگرسیون خطی فازی، حداقل مربعات فازی، سه سناریو مختلف برای مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات فازی یا خطی فازی استفاده کردند. در این پژوهش از میانگین خطای مطلق (MAE)^۱، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)^۲ و ضریب تعیین (R^2)^۳ برای ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیون فازی و مقایسه آن با FAO-56 پنمن-مانتیه استفاده کردند. نتایج نشان دادند که مدل رگرسیون خطی فازی در ماه ژانویه و مدل رگرسیون حداقل مربعات فازی در مهر ماه به ترتیب با R^2 برابر ۰/۹۰۳ و ۰/۵۰۲ کمترین دقت را داشته‌اند. Varga-Haszonits et al. (2022) ET_0 را با روش پنمن-مانتیه در شرایط اقلیمی نیمه مرطوب مجارستان محاسبه کردند. نتایج این روش با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در ایستگاه آزمایشی سزارواس مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که عوامل تابش و کمبود فشار بخار نقش مهمی در تعیین ET_0 دارند. با در نظر گرفتن این موضوع دو امکان برای محاسبه ET_0 وجود داشته که یکی استفاده از فرمول پنمن-مانتیه با استفاده از سرعت باد ثابت (که توسط آن توصیه شده) و دومی همان روش ولی با نادیده گرفتن اطلاعات سرعت باد است. در نهایت روش استفاده از سرعت باد در شرایط آب و هوایی منطقه توصیه شد.

در ایران نیز کارهای مشابهی کم و بیش انجام شده است. مثلاً Asadi (2019) تبخیر-تعرق پتانسیل را با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیه

روش پنمن-مانتیت فائو در مطالعات ایرانی مرتبط با تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) استفاده شده است ولیکن کاربرد روش تجزیه به عاملها (FA) در زمینه مطالعات مرتبط با ET_0 در ایران انجام نشده است. تفاوت این مطالعه با مطالعات پیشین در ایران استفاده از روش تجزیه به عاملها (در مطالعه فعلی) برای بررسی اثر نسبی عاملهای اقلیمی مؤثر بر ET_0 است، هدف اصلی این مطالعه استفاده از روش نوین تجزیه به عاملها، برای بررسی اثر نسبی عاملهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع است. در این مطالعه، مقادیر ET_0 با روش استاندارد فائو پنمن-مانتیت برآورد شده است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق استان زنجان است. استان زنجان در شمال غرب کشور و ما بین هفت استان واقع شده است و از شمال با استان اردبیل و استان گیلان، از شمال شرقی و مشرق با استان قزوین، از جنوب با استان همدان، از جنوب غربی با استان کردستان و از مغرب با استان آذربایجان غربی و همچنین از شمال غرب با استان آذربایجان شرقی همسایه است. موقعیت جغرافیایی استان مطابق بر عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه شمال و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی از نصف النهار گرینویچ است.

شهرستان زنجان دارای میانگین بارش سالانه ۳۰۰ میلی متر است. ضمناً میانگین دمای سالانه زنجان ۱۱ درجه سلسیوس بوده ولی در روزهای سرد زمستان حداقل دمای روزانه بطور مطلق معادل ۲۹/۶- درجه سلسیوس درج شده است. افزون بر این بیشینه دمای ثبت شده تاریخی ۴۰ درجه سلسیوس ثبت شده است. در زنجان تعداد روزهای برفی در حدود ۱۵۰ روز و تعداد روزهای یخبندان ۱۱۵ روز در سال است. همچنین، متوسط سرعت باد ۳/۷ متر بر ثانیه است. در این استان از داده‌های دو ایستگاه زنجان و ماهنشان استفاده شد. شهرستان ماهنشان دارای اقلیم سرد و خشک بوده و میانگین بارش سالانه ۲۴۸ میلیمتر است. میانگین دمای سالانه ماهنشان ۱۴/۷ درجه سلسیوس بوده ولی بالاترین بیشینه در ماهنشان ۴۳/۲ و پایین‌ترین کمینه ۲۷/۴- درجه سلسیوس است. تعداد روزهای یخبندان در این شهرستان ۹۱ روز در سال برآورد شده است.

برای ایستگاه سینوپتیک یزد در دوره (۲۰۱۰-۱۹۶۶) محاسبه کرد. او مدل NARX^۵ را برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده کرد. NARX یک مدل غیرخطی است که علاوه بر مقادیر پارامتر هدف، داده‌های تأثیرگذار بر روی پارامتر هدف نیز به عنوان ورودی به مدل وارد می‌شود. ایشان، پیش‌بینی ET_0 را نیز با مدل NAR انجام داد؛ سپس نتایج آن را با خروجی مدل NARX مقایسه کرد. نتایج نشان داد که استفاده از پارامترهای کمکی به نحو قابل توجهی دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد. (Haghizadeh et al. 2019) یک مدل ساده و کاربردی جهت محاسبه ET_0 انجام دادند. ایشان از مدل GEP استفاده کردند و از آمار تست تبخیر به عنوان متغیر تابع و از عوامل دما، کمبود بخار اشباع، سرعت باد و رطوبت نسبی به عنوان متغیرهای مستقل در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، روانسر، سرپل ذهاب، کرمانشاه و کنگاور استفاده کردند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی ET_0 در سطح استان کرمانشاه نشان داد که از شرق به غرب و از شمال به جنوب، بر میزان آن افزوده می‌شود. (Mirhosseiny et al. 2021) ET_0 را در حوضه آبخیز گلپایگان با استفاده از شش الگوریتم هارگریوز-سامانی، تورنت-وایت، رومانکو، اودین، خاروفا و بلانی کریدل استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم هارگریوز-سامانی با توجه به خروجی پنمن-مانتیت-فائو در مقایسه با سایر روش‌ها، عملکرد مناسب‌تری داشته است. آنان همچنین میزان ET_0 را با استفاده از مدل‌های گردش-عمومی جو CRM تحت سناریوهای مختلف توسط مدل LARS-WG6 برآورد کردند. نتایج نشان داد که ET_0 با سناریوهای مختلف RCP در آینده افزایش خواهد داشت. (Mikaeili & Samadianfard 2023) توانایی مدل رگرسیون بردار (SVR)، مدل جنگل تصادفی (RF)^۶ و مدل درختی P5M را در پیش‌بینی مقادیر روزانه تبخیر-تعرق گیاه مرجع بررسی کردند. ایشان دو ایستگاه آستارا و سیرجان را که به ترتیب در مناطق مرطوب و خشک ایران قرار دارند برای مطالعه انتخاب نمودند. نامبردگان با استفاده از داده‌های هواشناسی حداقل، متوسط و حداکثر دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۰ مطالعه خود را انجام دادند. نتایج نشان داد که از بین همه مدل‌های کاندیدا مدل‌های هارگریوز-سامانی، مک کینک، تورک و دالتون نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به بقیه ارائه کردند. (Shirzad et al. 2022) از روش شبکه عصبی مصنوعی ANN و سه روش تجربی دیگر شامل پنمن مانتیت فائو (PMF56)^۸، بلانی کریدل (BC)^۹ و کمبرلی پنمن (K-P)^{۱۰} برای مدل‌سازی تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) در مقیاس روزانه استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که روش ANN دارای دقت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های کلاسیک دارا است. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که هر چند

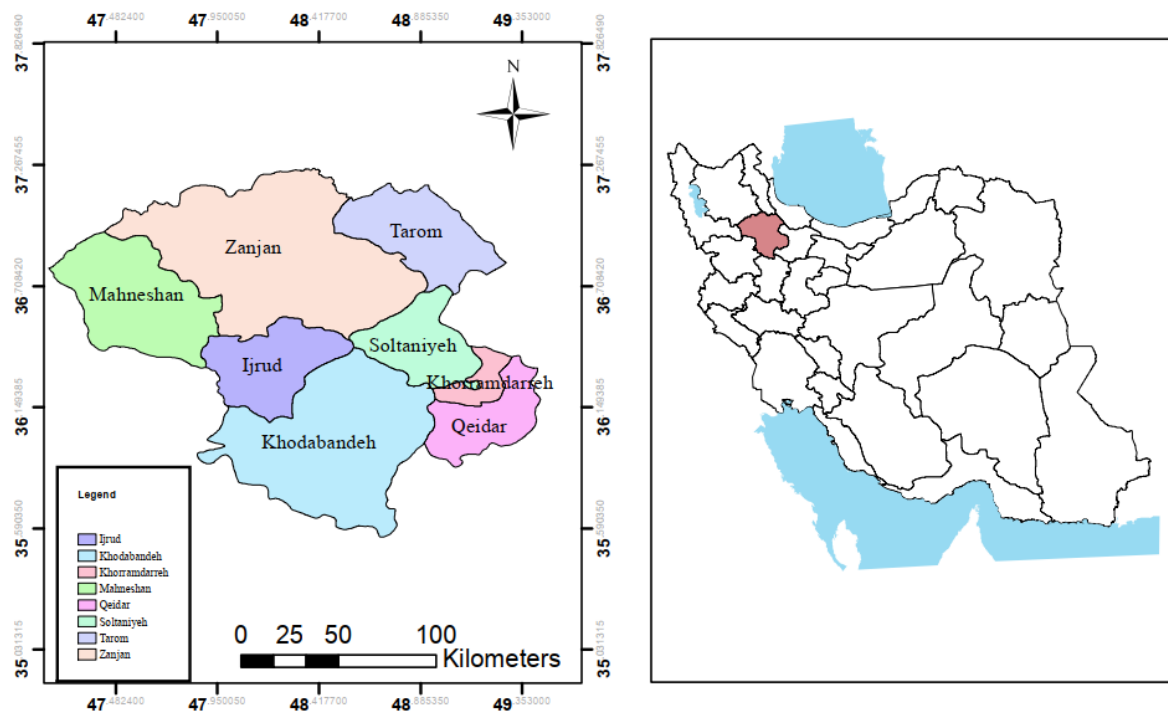


Fig. 1- Geographical location of the Zanjan province as the study area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان زنجان به عنوان منطقه مورد مطالعه

این دو پارامتر در یک دیاگرام رسم شد، اگر این دو نمودار یکدیگر را قطع نمی‌کردند و دیاگرام چشم ناگهانی نشان نمی‌داد آنگاه صحت داده‌ها درست فرض می‌شد. برای بررسی سرعت باد و ساعات آفتابی، نیز بطور مشابه نمودار سری زمانی هر یک از این پارامترها رسم می‌شد و اگر مقادیر منفی در نمودار دیده نمی‌شد و از سویی داده پرت در آن مشهود نبود، آنگاه داده‌ها صحیح تلقی می‌شد. سری‌ها دارای تعداد کمی داده‌های گمشده بودند. برای بازسازی داده‌های گمشده از میانگین سالانه هر ماه استفاده شد و داده‌ها بازسازی شدند. جدول ۱ ویژگی‌های آماری داده‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر ET_0 در هر ایستگاه با روش پنمن-ماتیس محاسبه شد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مقاله از داده‌های هواشناسی شش متغیر اقلیمی شامل میانگین حداکثر دمای هوا (T_{max})، میانگین حداقل دمای هوا (T_{min})، میانگین حداکثر رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (U_{10})، مجموع ساعات آفتابی واقعی (n) و بارش (P) در مقیاس روزانه استفاده شد. داده‌ها از سازمان هواشناسی استان زنجان اخذ شد. نحوه کنترل داده‌های دریافت شده از سازمان هواشناسی رسم نمودار سری زمانی و مشاهده آن است. مثلاً، برای بررسی میانگین حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا و میانگین حداکثر و حداقل دمای هوا، سری زمانی

Table 1- Statistical features of the data used in selected stations

جدول ۱- ویژگی‌های آماری داده‌های مورد استفاده در ایستگاه‌های منتخب

Starions	T	SD-T	n	SD- n	ea	SD- ea	U2	SD- U2	ET0	SD- ET0	P	SD- P
	($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)	(hr)	(hr)	(kPa)	(kPa)	(m/s)	(m/s)	(mm/yr)	(mm/yr)	(mm)	(mm)
Zanjan	11.95	1.1	2893	101	0.56	0.05	0.89	0.15	1195	54	293	69
Mahmешan	15.32	0.8	2772	587	0.60	0.04	1.13	0.22	1379	98	261	66

* در این جدول T: میانگین دمای سالانه، SD-T: انحراف معیار سری دمای سالانه، n: میانگین سالانه ساعات آفتابی، ea: میانگین سالانه فشار بخار واقعی، U_2 : میانگین سالانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، ET_0 : میانگین سالانه تبخیر-تعرق پتانسیل و P: بارش سالانه است.

* In this table, T: annual average air temperature, SD-T: standard deviation of the annual air temperature series, n: annual average of actual vapor pressure, U_2 : annual average of wind velocity at a height of 2 meters, ET_0 : annual average of potential evapotranspiration and P: annual precipitation.

۳-۲- روش تجزیه به عامل‌ها (FA)

در روش تجزیه به عامل‌ها بر خلاف تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)^{۱۱} که در آن مؤلفه‌ها تابعی از متغیرهای مشاهداتی هستند، در روش FA سعی می‌شود که متغیرها چنان بصورت ترکیب خطی از عامل‌ها ارائه شود که تعداد عامل‌ها کمتر از تعداد متغیرها باشد (Rencher, 1995). برای انجام عمل (FA) در مورد P متغیر ابتدا عمل PCA را روی آنها انجام شد. در این مطالعه متغیرها شامل میانگین T_{max} ، T_{min} ، RH، U_{10} ، n و P در مقیاس ماهانه بودند. متغیرها استاندارد شدند و ماتریس همبستگی تشکیل شد. مقادیر مؤلفه‌های اصلی یعنی Z_i تعیین شدند (Manly, 1994)، آنگاه ضرایب متغیرها که معادل با بردارهای ویژه ماتریس همبستگی داده‌ها هستند. با ترانهاده کردن ماتریس ضرایب، روابط عکس متغیرها و مؤلفه‌های اصلی بدست آمد. سپس برای عمل FA فقط m مؤلفه اصلی که دارای مقدار ویژه بیش از یک بود، در نظر گرفته شد. بعد از آن برای تغییر مقیاس مؤلفه‌های اصلی Z_m ، مقادیر Z_i به انحراف استاندارد سری نظیر خود تقسیم شد تا مؤلفه‌ها دارای واریانس یک باشند. آنگاه پس از تغییر مقیاس، مؤلفه‌های اصلی معادله در نظر گرفته شده و در نتیجه مدل عامل غیر چرخشی بدست آمد.

برای انتخاب تعداد عامل‌های غالب یا m چندین معیار وجود دارد (Rencher, 1995) ولی در این مطالعه آن تعداد از عامل‌ها که مقادیر ویژه آنها بیش از یک (حداقل ۲ عامل) بود در تحلیل در نظر گرفته شد. هدف از چرخش محورها، حول مبدا ثابت، تغییر مکان آنهاست، طوری که پس از آن محورها تا حد امکان از نزدیکی تعداد زیادی از نقاط بگذرند (Rencher, 1995). در این مطالعه از روش وریماکس برای چرخش محورها استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ و شکل ۳ نمودارهای سری‌های زمانی و الگوی تغییرات ماهانه هر کدام از متغیرهای میانگین دمای هوا، ساعات آفتابی، فشار بخار

واقعی (e_a)، سرعت باد به ترتیب در دو ایستگاه زنجان و ماهنشان را نشان می‌دهد.

نتایج ET_0 در ایستگاه‌های زنجان و ماهنشان در شکل ۴ (۱۴۰۰-۱۳۷۹) نشان داده شده است. در این نمودار می‌توان مشاهده کرد که کمترین ET_0 سالانه متعلق به سال ۱۳۹۸ (معادل با ۱۳۰۷ mm/year) و بیشترین آن متعلق به سال ۱۳۸۲ (معادل با ۱۳۰۷ mm/year) در ایستگاه زنجان می‌باشد. ضمن اینکه میانگین ET_0 سالانه در کل دوره آماری که با نقطه چین در شکل نشان داده شده برابر ۱۱۹۵ mm/year در ایستگاه زنجان است. از این شکل ۴ در ایستگاه زنجان می‌توان نتیجه گرفت که در اوایل دوره آماری ET_0 سالانه بیشتر از میانگین طولانی مدت بوده و در اواخر دوره آماری کمتر از میانگین دراز مدت است. از شکل مذکور می‌توان دید که ET_0 سالانه ایستگاه زنجان در دوره آماری مورد بررسی روند کاهشی قابل ملاحظه داشته است.

شکل ۴ نیز الگوی تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع را در ماه‌های مختلف سال با روش پنمن-مانتیت در دو ایستگاه زنجان و ماهنشان نشان می‌دهد. بطوریکه از این شکل می‌توان دید بیشترین ET_0 متعلق به ماه مرداد (برابر با ۵/۸۵ mm/day) و کمترین آن متعلق به ماه بهمن (برابر با ۱/۵۴ mm/day) در ایستگاه زنجان است. از شکل مذکور می‌توان فهمید که ET_0 در هر دو ایستگاه از اسفند تا مرداد روند صعودی دارد در حالی که به تدریج از مرداد تا بهمن از روند نزولی برخوردار است. شاید علت آن بیشتر به افزایش دمای هوا از اسفند تا مرداد و متعاقب آن کاهش دما از مرداد تا بهمن باشد. به طور کلی مقدار ET_0 در ایستگاه ماهنشان در مقیاس ماهانه و سالانه نسبت به ایستگاه زنجان بیشتر است.

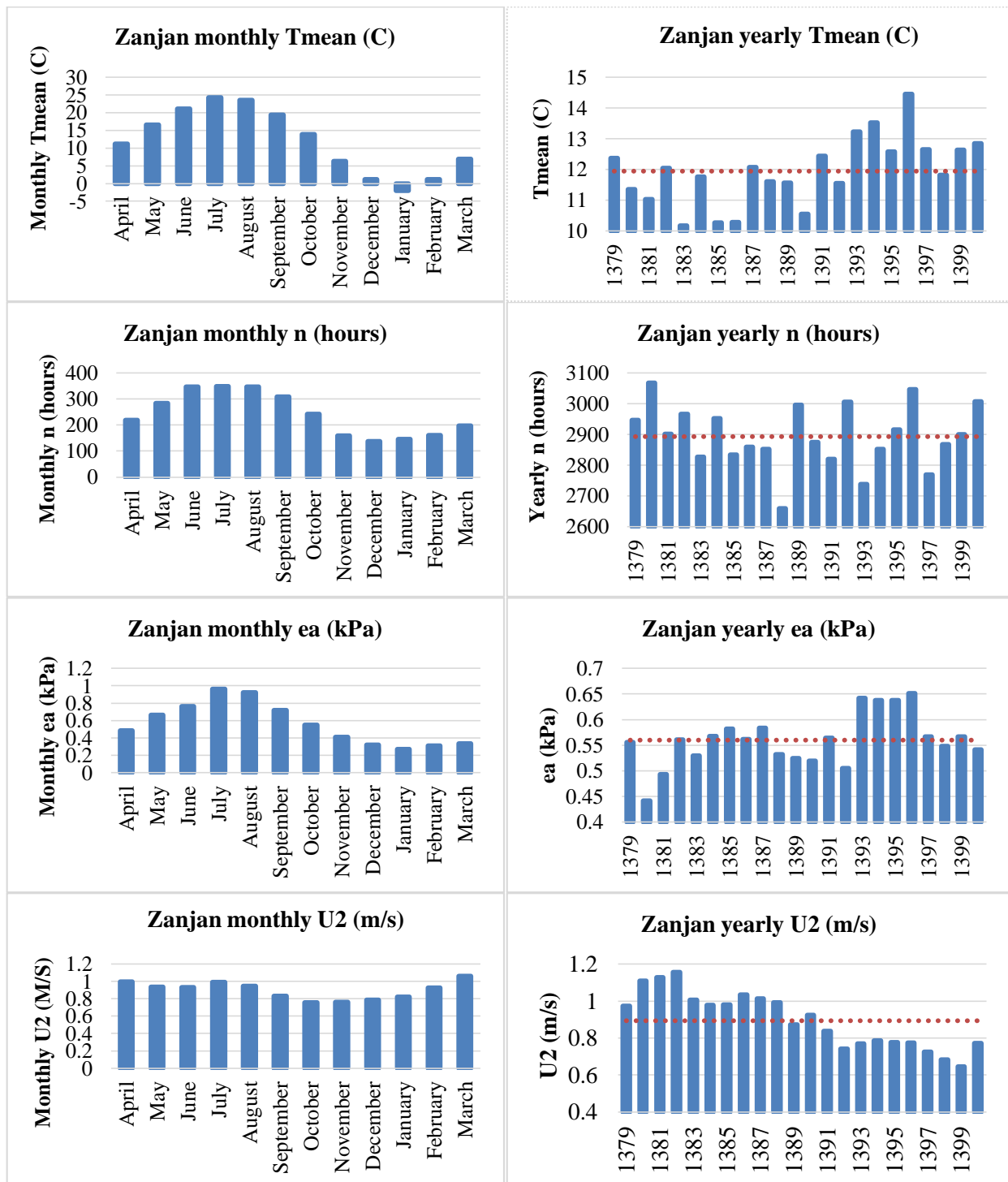


Fig. 2- Plots of climatic variables in Zanjan station (1379-1400 Iranian calendar)

شکل ۲- نمودارهای متغیرهای اقلیمی در ایستگاه زنجان (۱۴۰۰-۱۳۷۹)

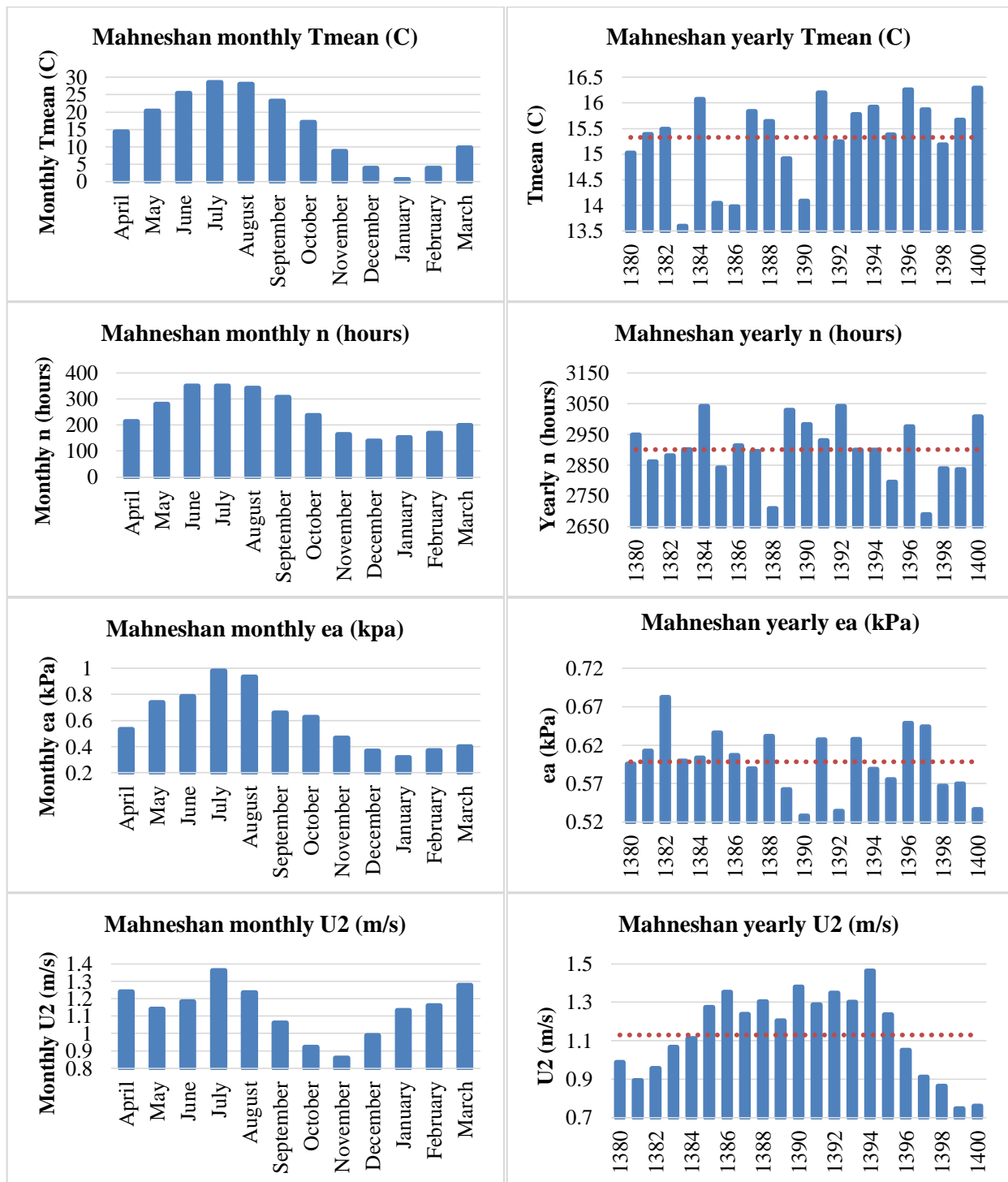


Fig. 3- Plots of climatic variables in Mahneshan station (1380-1400, Iranian calendar)

شکل ۳- نمودارهای متغیرهای اقلیمی در ایستگاه ماهنشان (۱۴۰۰-۱۳۸۰)

* در شکل های ۲ و ۳ سری زمانی میانگین سالانه دمای هوا و الگوی توزیع میانگین ماهانه دمای هوا (ردیف ۱)، تعداد ساعات آفتابی واقعی در سال و الگوی توزیع ماهانه تعداد ساعات آفتابی واقعی (ردیف ۲)، میانگین فشار بخار واقعی آب در طی سال و الگوی توزیع ماهانه میانگین فشار بخار واقعی آب (ردیف ۳) و میانگین سالانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و الگوی توزیع ماهانه میانگین سالانه سرعت باد (ردیف ۴) است.

* In figures 2 and 3, time are shown the series of annual average air temperature and distribution pattern of monthly average air temperature (first row), number of actual sunshine hours per year and monthly distribution pattern of actual sunshine hours (second row), average of actual vapor pressure during the year and monthly distribution pattern of the average actual vapor pressure (third row), annual average of wind velocity at a height of 2 meters and the monthly distribution pattern of the annual average wind velocity.

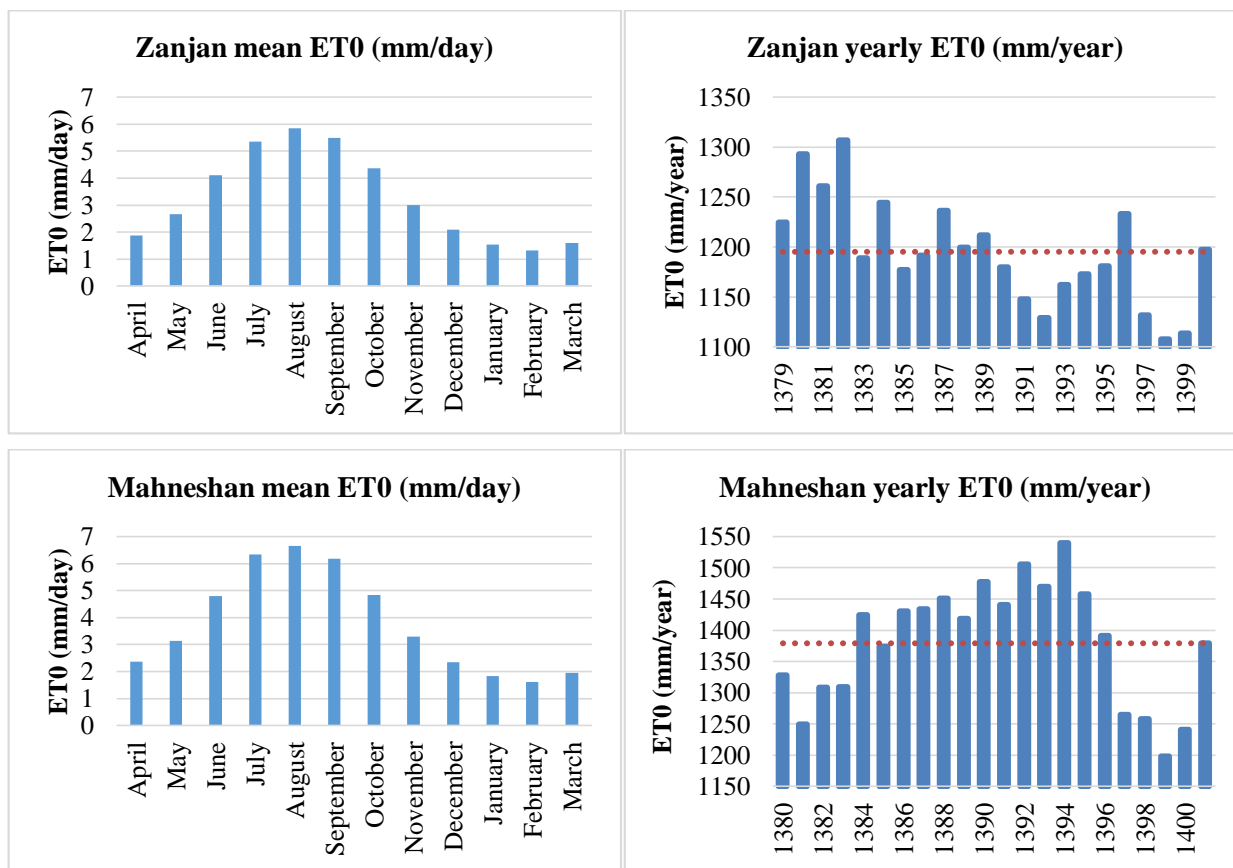


Fig. 4- Reference evapotranspiration time series in annual scale (left) and monthly distribution pattern (right) at the two stations of Zanjan (up row) and Mahneshan (bottom row) in the 1379-1400 period (Iranian calendar)

شکل ۴- نمودارهای سری زمانی ET₀ در مقیاس سالانه (چپ) و الگوی توزیع ماهانه آن (راست) در دو ایستگاه زنجان (ردیف بالا) و ماهنشان (ردیف پایین) در دوره آماری (۱۳۷۹-۱۴۰۰)

همبستگی معنی‌دار بودند در سایر موارد متغیرها دو به دو در سطح ۵ درصد معنی‌دار بودند.

شکل ۵ نمودار صخره‌ای حاصل از تجزیه به عاملها را برای ایستگاه زنجان می‌دهد. در این نمودار محور افقی، شماره مؤلفه و محور قائم مقدار ویژه است. به طوریکه از این شکل می‌توان دید فقط دو مؤلفه اول دارای مقدار ویژه بیش از یک هستند و مؤلفه‌های بعدی مقدار ویژه بسیار ناچیزی (نزدیک صفر) دارند. بنابراین، انتخاب دو مؤلفه اصلی اول که هر کدام ترکیبی از همه پارامترهای اقلیمی مندرج در ماتریس همبستگی است، منطقی است. در نهایت، این دو مؤلفه برای زنجان انتخاب شد.

پس از استاندارد کردن داده‌ها، که شامل ۶ متغیر و ۲۵۲ مورد (برای ایستگاه زنجان) در مقیاس ماهانه بوده است. با استفاده از نرم‌افزار SPSS عمل تجزیه به عاملها انجام شد. در عمل FA، تحلیل ماتریس همبستگی بین متغیرها از اهمیت زیادی برخوردار است. جدول ۲ ماتریس همبستگی را برای ایستگاه زنجان نشان می‌دهد. این شکل، دو قسمت متمایز دیده می‌شود که قسمت اول (بالا) ضرایب همبستگی هستند. قسمت دوم سطح معنی‌داری هر ضریب را نشان می‌دهد. مثلاً بیشترین ضریب همبستگی مثبت بین T_{min} و T_{max} برابر با $0/94$ است که نشان دهنده افزایش T_{max} با افزایش T_{min} و یا کاهش یکی با کاهش دیگری است. از طرفی ضریب همبستگی T_{max} با RH_{ave} معادل با $-0/784$ است که حاکی از کاهش مقدار T_{max} با افزایش RH_{ave} و برعکس یعنی افزایش یکی با کاهش دیگری است. بطوریکه از این جدول می‌توان استنباط کرد بجز یک مورد (باد و بارش) که فاقد

Table 2- Correlation matrix of climatic data in Zanjan station

جدول ۲- ماتریس همبستگی داده‌های اقلیمی در ایستگاه زنجان

Correlation Matrix						
	Rain	RHave	Tmax	Tmin	Wind	Sun
Correlation	Rain	0.461	-0.405	-0.319	0.051	-0.504
	RHave		-0.784	-0.720	-0.166	-0.783
	Tmax			0.940	0.166	0.926
	Tmin				0.120	0.879
	Wind					0.195
	Sun					
Sig. (1-tailed)	Rain	0.000	0.000	0.000	0.212	0.000
	RHave		0.000	0.000	0.004	0.000
	Tmax			0.000	0.033	0.000
	Tmin				0.028	0.000
	Wind					0.001
	Sun					

a. Determinant=0/003

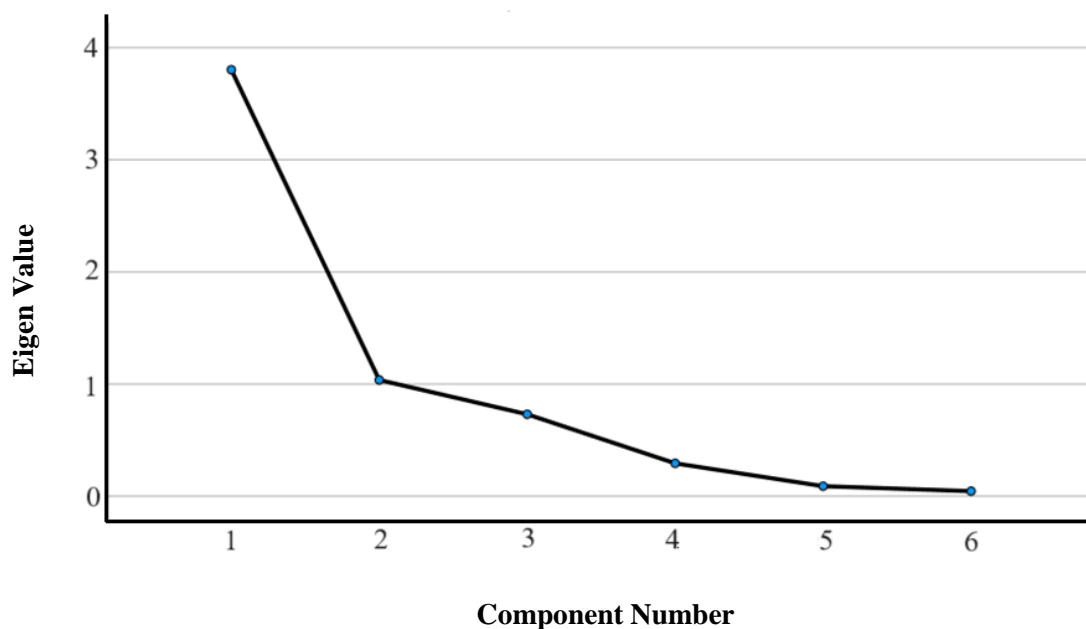


Fig. 5- Screeplot resulting from decomposition into main components in Zanjan station

شکل ۵- نمودار صخره‌ای حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در ایستگاه زنجان

را می‌توان به دمای هوا و رطوبت نسبی و مؤلفه دوم را به نام عامل باد نام‌گذاری کرد.

شکل ۷ نمودار صخره‌ای حاصل از تجزیه به عاملها را برای ایستگاه ماهنشان می‌دهد. به طوریکه از این شکل می‌توان دید دو مؤلفه اول که دارای مقدار ویژه بیشتر نسبت به بقیه هستند انتخاب شد. این دو مؤلفه اصلی ترکیبی از همه پارامترهای اقلیمی مندرج در ماتریس همبستگی است و نسبت به همدیگر متعام هستند. به عبارت بهتر این دو مؤلفه دارای ضریب همبستگی صفر است. بنابراین، این دو مؤلفه اول برای ماهنشان انتخاب شد.

در جدول ۴، مقادیر واریانس توجیه شده توسط هر مؤلفه اصلی و درصد آنها قبل و بعد از چرخش وریماکس بصورت مجزا و تراکمی در ماهنشان نشان داده شده است. به طوری که می‌توان دید مؤلفه اول ۶۵/۱۴۵ درصد واریانس را توجیه می‌کند و مؤلفه دوم ۱۷/۳۶۵ درصد واریانس را توجیه می‌کند که در مجموع دو مؤلفه اول در کل ۸۲/۵۰۹ درصد واریانس را توجیه می‌کند. به طوری که می‌توان نتیجه گرفت هر چند مجموع واریانس‌های دو مؤلفه منتخب (۸۲/۵۰۹) پس از چرخش محورها هیچ تغییری نکرده است ولیکن مقدار واریانس توجیه شده توسط هر مؤلفه پس از چرخش اندکی تغییر یافته است مثلاً مؤلفه اول مقدار واریانس ۶۶/۵۹۴ درصد را توجیه کرده است ولی بعد از چرخش محور مقدار آن به ۶۶/۱۴۵ درصد کاهش یافته است. به طور مشابه مؤلفه دوم مقدار واریانس ۱۵/۹۱۶ درصد را توجیه کرده است ولی بعد از چرخش محور مقدار آن به ۱۷/۳۶۵ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با چرخش محورها اندکی قابلیت تفسیر نتایج بهبود یافته است.

در جدول ۳، مقادیر واریانس توجیه شده توسط هر مؤلفه اصلی و درصد آنها قبل و بعد از چرخش وریماکس بصورت مجزا و تراکمی در زنجان نشان داده شده است. به طوری که می‌توان دید عامل اول پس از چرخش ۶۳/۲۸۱ درصد واریانس را توجیه می‌کند و عامل دوم ۱۷/۳۹۲ درصد واریانس را توجیه می‌کند که در مجموع دو مؤلفه اول در کل ۸۰/۶۷۳ درصد واریانس را توجیه می‌کند. به طوری که می‌توان نتیجه گرفت هر چند مجموع واریانس‌های دو عامل منتخب (۸۰/۶۷۳) پس از چرخش محورها هیچ تغییری نکرده است ولیکن مقدار واریانس توجیه شده توسط هر عامل پس از چرخش اندکی تغییر یافته است. مثلاً عامل اول قبل از چرخش مقدار واریانس ۶۳/۳۹۶ درصد را توجیه کرده است ولی بعد از چرخش محور مقدار آن به ۶۳/۲۸۱ درصد کاهش یافته است. به طور مشابه عامل دوم قبل از چرخش مقدار واریانس ۱۷/۲۷۷ درصد را توجیه کرده است ولی بعد از چرخش محور مقدار آن به ۱۷/۳۹۲ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با چرخش محورها اندکی واریانس توجیه شده با عامل‌های منتخب تغییر یافته اما قابلیت تفسیر نتایج بهبود یافته است. باتوجه به اینکه تعداد عامل‌های منتخب دو بوده است بنابراین در جدول زیر برای عامل‌های سوم تا ششم درصد واریانس‌ها درج نشده است.

شکل ۶ نمودار ضرایب عامل‌های اول و دوم را در ایستگاه زنجان بعد از چرخش محورها نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه زنجان پارامتر Sun حساس‌ترین عامل اقلیمی در تبخیر-تعرق گیاه مرجع محسوب می‌شود پس از آن پارامترهای T_{max} ، T_{min} و RH به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. بنابراین اگر بخواهیم مؤلفه‌های اول و دوم را در ایستگاه زنجان نام‌گذاری کنیم، مؤلفه اول

Table 3- The value of the variance justified by the selected factors before and after the rotation of the axes using the Varimax method in Zanjan station

جدول ۳- مقدار واریانس توجیه شده توسط عامل‌های منتخب قبل و پس از چرخش محورها به روش وریماکس در ایستگاه زنجان

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative%	Total	% of Variance	Cumulative%	Total	% of Variance	Cumulative%
1	3.804	63.396	63.396	3.804	63.396	63.396	3.797	63.281	63.281
2	1.037	17.277	80.673	1.037	17.277	80.673	1.044	17.392	80.673
3	0.731	12.183	92.856						
4	0.293	4.891	97.748						
5	0.090	1.496	99.244						
6	0.045	0.756	100.000						

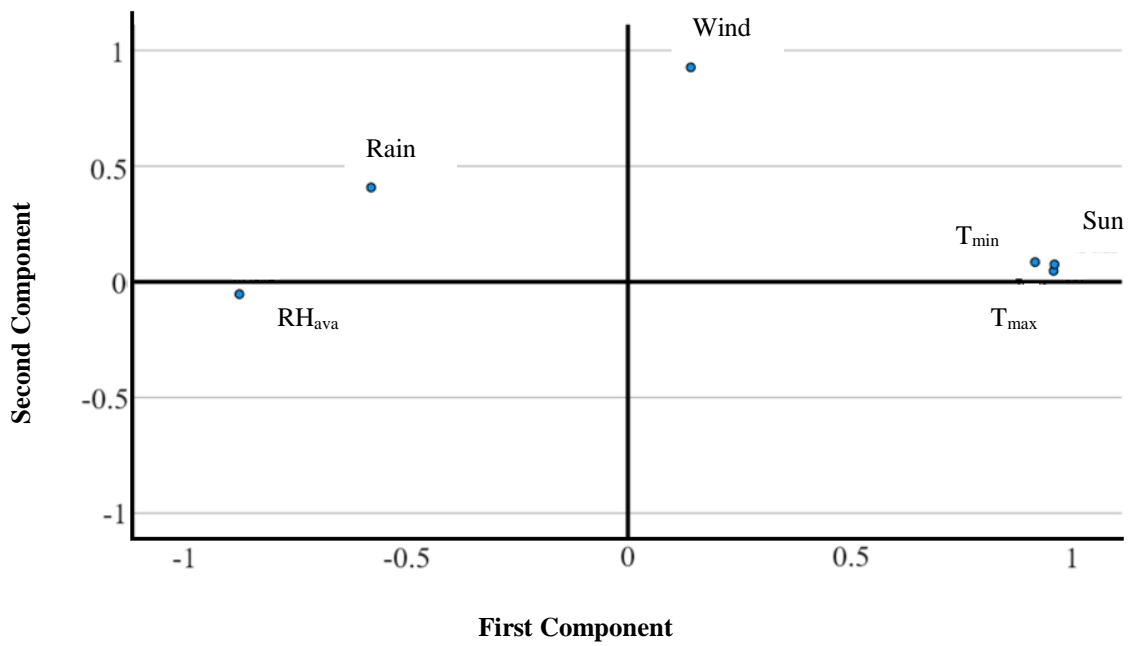


Fig. 6- Coefficients of the first and second factors at Zanzan station after rotation of axes

شکل ۶- نمودار ضرایب عامل‌های اول و دوم در ایستگاه زنجان بعد از چرخش محورها

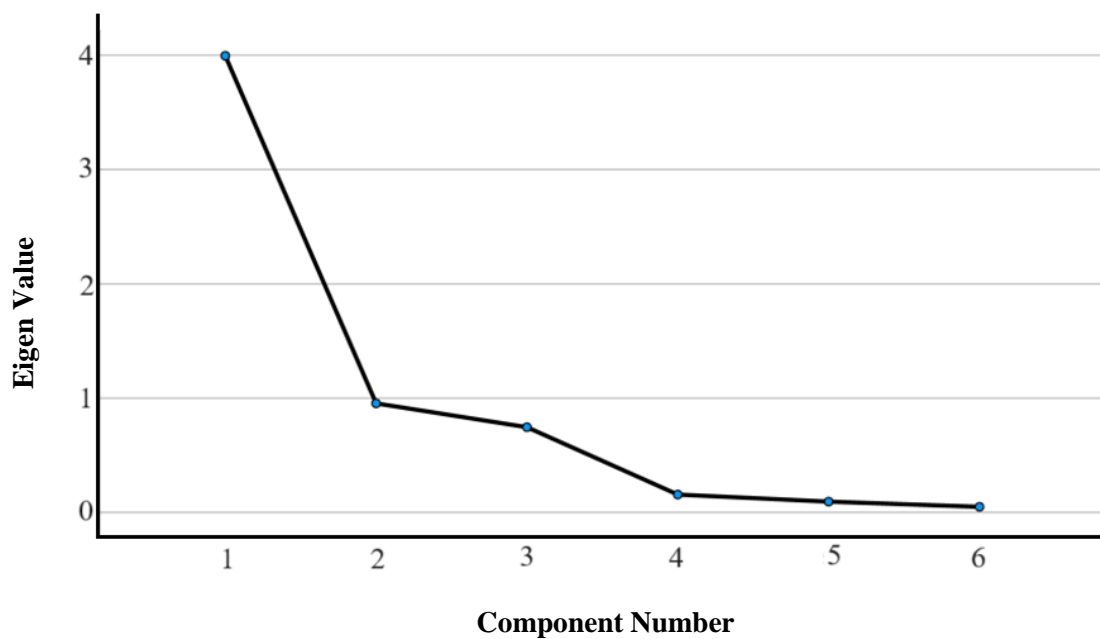


Fig. 7- Screeplot resulting from decomposition into main components at Mahenshan station

شکل ۷- نمودار صخره‌ای حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در ایستگاه ماهنشان

Table 4- The value of the variance justified by the selected factors before and after the rotation of the axes using the varimax method in Mahneshan station

جدول ۴- مقدار واریانس توجیه شده توسط عامل‌های منتخب قبل و پس از چرخش محورها به روش وریماکس در ایستگاه ماهنشان

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative%	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	3.996	66.594	66.594	3.996	66.594	66.594	3.909	65.145	65.145
2	0.955	15.916	82.509	0.955	15.916	82.509	1.042	17.365	82.509
3	0.747	12.444	94.953						
4	0.157	2.620	97.573						
5	0.095	1.591	99.164						
6	0.050	0.836	100.000						

و RH به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نمودار مربوط به زنگان دارای الگوی مشابه با نمودار ایستگاه ماهنشان است.

شکل ۸ نمودار ضرایب عامل‌های اول و دوم را در ایستگاه ماهنشان بعد از چرخش محورها نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در ایستگاه ماهنشان پارامتر Sun حساس‌ترین عامل اقلیمی در تبخیر-تعرق گیاه مرجع محسوب می‌شود پس از آن پارامترهای T_{max} ، T_{min}

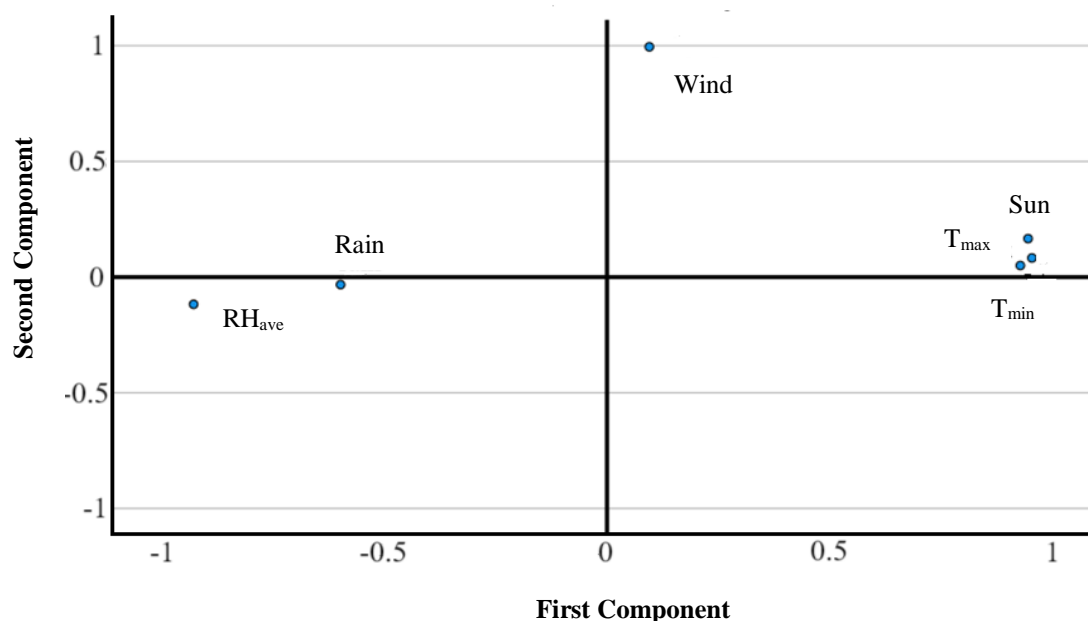


Fig. 8- Coefficients of the first and second factors at Mahneshan station after rotation of axes

شکل ۸- نمودار ضرایب عامل‌های اول و دوم در ایستگاه ماهنشان بعد از چرخش محورها

۴- نتیجه گیری

تبخیر-تعرق نه تنها یکی از مهم‌ترین متغیرهای مرتبط با آبیاری گیاهان زراعی و باغی است؛ بلکه از مهمترین مؤلفه‌های مربوط به چرخه آب در طبیعت به‌شمار می‌رود. در این مطالعه اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی مختلف روی تبخیر-تعرق با استفاده از روش چند متغیره موسوم به تجزیه به عامل‌ها بررسی شده است. داده‌های ماهانه مربوط به شش پارامتر اقلیمی شامل میانگین حداکثر دما، میانگین حداقل دما، تعداد ساعات آفتابی واقعی، مقدار بارش ماهانه، میانگین رطوبت نسبی هوا و میانگین سرعت باد در مقیاس ماهانه در دو ایستگاه هواشناسی واقع در استان زنجان (شامل ایستگاه‌های زنجان و ماهنشان) بررسی شد. روش FA در زمینه تأثیر نسبی متغیرهای اقلیمی روی ET_0 برای اولین بار در ایران در این مطالعه بکار گرفته شد. تاکنون در ایران و در مطالعات مرتبط با ET_0 روش مذکور استفاده نشده بود. نتایج نشان داد که تقریباً همه جفت متغیرهای مؤثر بر تبخیر-تعرق پتانسیل (بجز باد با بارش) دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد بودند. در این مطالعه، ابتدا تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بدون چرخش محورها انجام گرفت و سپس با استفاده از چرخش عامل‌های اصلی با روش وریماکس مطالعه به انجام رسید. برای هر ایستگاه، تعداد دو عامل اصلی که تقریباً در همه ایستگاه‌ها دارای مقدار ویژه بیش از یک بودند، انتخاب شد. این دو عامل تقریباً در هر دو ایستگاه بیش از ۸۰ درصد واریانس کل متغیرها را توجیه می‌کرد. به طور اخص، مقدار واریانس توجیه شده با دو عامل اول در ایستگاه زنجان $۸۰/۶۷۳$ و در ماهنشان $۸۲/۵۰۹$ درصد بود. علت تفاوت نتایج در این دو ایستگاه تغییر مقادیر داده‌ها است. عامل‌های اول و دوم در ارتباط با فرآیندهای فیزیکی مرتبط با تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع است که هیچ همبستگی با هم‌دیگر ندارند. نتایج نشان داد که تقریباً در هر دو ایستگاه، متغیرهای اقلیمی دما، رطوبت نسبی هوا و سرعت باد روی فرآیند تبخیر-تعرق ایستگاه‌های مورد مطالعه مؤثر بودند. در حالیکه معلوم شد که متغیر بارش بر روی تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع اثر مؤثری نداشته است. مهمترین متغیر مؤثر بر فرآیند تبخیر-تعرق پتانسیل پارامتر تعداد ساعات آفتابی واقعی بود. پس از آن پارامترهای T_{max} ، T_{min} و RH به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. بر اساس مطالعات انجام یافته در دو ایالت هندوستان موسوم به تامیل نادو و کارناتاکا معلوم شده است که در این دو ایالت نیز تبخیر-تعرق متأثر از پارامترهای رطوبت نسبی هوا، دما و سرعت باد بوده است که با نتیجه بدست آمده از مطالعه حاضر کاملاً همخوانی دارد. این مطالعه توسط Mohan & Arumugam (1996)

به انجام رسیده است. لزوم توجه به حفاظت آب از خطرات آلودگی با توجه به افزایش جمعیت شهرها و گسترش کارخانجات بیش از پیش احساس می‌شود. در این زمینه تأسیس و شروع بکار تیم‌های ویژه مانند پلیس آب در حوضه‌های آبخیز استان زنجان ضروری بنظر می‌رسد. کنترل مصرف آب بویژه در بخش کشاورزی و حفاظت آبخوان‌ها از بهره‌برداری بی‌رویه می‌تواند در جلوگیری از فرونشست خاک در منطقه و خطرات بالقوه آن مفید ضروری است. با توجه به کاهش بارندگی در مناطق مختلف کشور و فشار بر آبخوان‌ها جهت استفاده هرچه بیشتر از آب‌های زیرزمینی در منطقه بویژه از سوی کشاورزان و باغداران بنظر می‌رسد که زمان آن فرا رسیده که ملت و دولت نیازهای خود را با مقدار آب قابل تجدید حوضه‌ها (بدون چشمداشت به استفاده از منابع آب سایر حوضه‌ها) تأمین کنند.

از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به کم بودن طول دوره آماری ایستگاه‌ها و محدودیت انتخاب متغیرهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر-تعرق اشاره کرد؛ زیرا در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران همه پارامترهای مورد نیاز یا اندازه‌گیری نشده‌اند یا دارای آمار کافی نیستند. مثلاً میزان تشعشع آفتاب در مقیاس روزانه در دسترس محقق نیست. از مزیت‌های این مطالعه می‌توان به درک عمیق ارتباط پارامترهای هواشناسی با تبخیر-تعرق در ایستگاه‌های منتخب اشاره کرد. انجام چنین مطالعه‌ای در دیگر استان‌های کشور با اقلیم‌های متفاوت توصیه می‌شود. نتایج این مطالعه در مدیریت بهینه آب قابل دسترس بویژه در بخش کشاورزی مفید واقع شود.

۵- سپاسگزاری

بدینوسیله از کارشناسان اداره کل هواشناسی استان زنجان که داده‌های موردنیاز این مطالعه را در اختیار نگارندگان قرار دادند سپاسگزاری می‌شود. از اساتید محترم داور که نکات مفیدی را جهت بهبود کیفیت مقاله اشاره کردند، قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Potential Evapotranspiration
- 2- Mean Absolute Error
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Coefficient of Determination
- 5- Nonlinear Autoregressive Model with Exogenous Input
- 6- Support Vector Regression
- 7- Random Forest
- 8- Penman- Monteith- FAO-56
- 9- Blaney Kridel
- 10- Kimberly Penman
- 11- Principle Component Analysis

۶- مراجع

- Asadi MA (2019) Potential evapotranspiration prediction using nonlinear autoregressive model with exogenous input (NARX) (Case study: Yazd Province, Iran). *Journal of Arid Biome* 8(2):37-49 (In Persian)
- Fooladmand H and Haghghat M (2007) Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ET₀ based on Penman-Monteith method. *Irrigation and Drainage* 56:439-449
- Haghizadeh A, Bayat V, and Arshia A (2019) Estimation of the evapotranspiration potential of Kermanshah synoptic stations using genetic programming. *Geographical Space* 19(67):29-42 (In Persian)
- Jalali Z, Bakhtiari B, Qaderi K, & Golestani Kermani S (2021) Modified Hargreaves-Samani model based on altitude in the high-altitude regions of Iran. *Iran-Water Resources Research* 17(3):248-267 (In Persian)
- Manly B F J (1994) *Multivariate statistical methods, A primer*. Second edition. Chapman and Hall (PP.215)
- Mikaeili F, and Samadianfard S (2023). Application of tree and Kernel- based models for estimating daily reference evapotranspiration in humid and arid regions of Iran. *Water and Soil Science* 33(2): 35-51(In Persian)
- Mirhosseiny S M, Ghasemieh H, and Abdollahi K (2021) Prediction of monthly potential evapotranspiration under RCP scenarios in future periods (Case study: Golpayegan Basin). *Iranian Journal of Ecohydrology* 8(1):205-220 (In Persian)
- Mohan S and Arumugam N (1996) Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: Factor analysis approach. *Water Resources Management* 10:1-20
- Niazi Z (2018) Evaluation and comparison of different methods of reference evapotranspiration based on mass transmission methods in Iran and its zoning by using GIS. *Iran-Water Resources Research* 14(3): 263-267 (In Persian)
- Popova Z, Kercheva M, and Sepriro L (2006) Validation of the FAO methodology for computing ET₀ with limited data. Application to South Bulgaria, *Irrigation and Drainage* 55:201-215
- Rencher A C (1995) *Methods of multivariate analysis*. John Wiley and Sons INC (pp: 627)
- Shirzad M, Feyzi H, and Rezaei Banafsheh M (2022) Simulations reference evapotranspiration using artificial intelligence and comparison with experimental methods (Case Study: East Azerbaijan). *Journal of Geography and Planning* 26(80):171-183
- Valipour M (2015) Temperature analysis of reference evapotranspiration models. *Meteorological Applications* 22(3):385-394
- Varga-Haszonits Z, Szalka E, and Szakál T (2022) Determination of reference evapotranspiration using penman-monteith method in case of missing wind speed data under Sub-humid climatic condition in Hungary. *Atmospheric and Climate Sciences* 12(2):235-245
- Zeraati Neyshabouri S, Pourreza Bilondi M, Khashei-Siuki A, and Shahidi A (2022) Efficiency comparison of Fuzzy regression models with the Penman-Monteith method in estimating of monthly reference evapotranspiration of Neyshabour Plain. *Environment and Water Engineering* 8(1):205-217
- Zhai L, Feng Q, LI Q, and Xu C (2010) Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, Northwest China. *Irrigation and Drainage* 59(4):477-490