



Trend analysis of ET_0 and relative importance of climatic variables on ET_0 (Case study: Stations Khorramdareh, Gheidar, and Abbar)

Yagob Dinpashoh¹ | Nazanin Heidari²

1. Corresponding Author, Water Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: Dinpashoh@yahoo.com
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: n.hedari1998@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 15 December 2024 Received in revised form 19 October 2024 Accepted 10 December 2024 Published online 17 May 2025 Keywords: <i>Evapotranspiration</i> <i>Mann-Kendall</i> <i>Spearman</i> <i>Varimax</i>	In this study trends in ET_0 and the relative importance of climatic variables on ET_0 were analyzed for three stations namely Khorramdareh, Gheidar, and Abbar. The Penman- Monteith FAO-56 method was used to estimate ET_0 and the factor analysis method was used to study the effect of climatic variables on ET_0. The climatic variables used here were precipitation, maximum air temperature, minimum air temperature, wind speed, relative humidity, and actual sunshine hours. For each of the stations, trends in ET_0 were analyzed using the Spearman (SP) and Mann-Kendall (MK) methods. Results showed that in the station Abbar, trends were downward and significant at 0.05 level using both methods. In the station Gheidar, trends were downward and significant at 0.05 level using the MK method, however, the trend was decreasing (insignificant) using the SP approach. The correlation matrix of climatic variables was constructed. The correlation coefficients were tested for their significance. Results showed that all the correlation coefficients in Khorramdareh were significant at 0.05 level. Results of FA indicated that in all the sites, the eigenvalues of the first two factors were more than unity. These two factors accounted for about 83.49 to 86.14 percent of variances in the stations. After Varimax rotation, the factor loadings were calculated. Results showed that in the station Khorramdareh, the T_{max} and T_{min} were the most sensitive variables affecting ET_0. It was the T_{max} alone in the Gheidar and Abbar stations. According to the second-factor loadings, the wind speed (in Khorramdareh and Gheidar) and the precipitation (in the station Abbar) were the second most sensitive variables affecting ET_0.

Cite this article: Dinpashoh, Y., & Heidari, N. (2025). Trend analysis of ET_0 and relative importance of climatic variables on ET_0 (Case study: Stations Khorramdareh, Gheidar, and Abbar). *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 75-91. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.367513.1126>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.367513.1126>

Publisher: University of Tehran Press.



تحلیل روند ET₀ و اثر نسبی متغیرهای اقلیمی روی آن (مطالعه موردی: خرمدره، قیدار و آبیر)

یعقوب دین پژوه^۱ | نازنین حیدری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Dinpashoh@yahoo.com

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: n.hedari1998@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ کلیدواژه‌ها: تبخیر-تعرق وریماکس اسپیومن مان-کندال	در این مطالعه، روند تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه ET₀ و اهمیت تأثیر نسبی متغیرهای هواشناسی بر آن در سه ایستگاه خرمدره، قیدار و آبیر تحلیل شد. روش فائو-پنمن-مانتیت برای تخمین ET₀ و روش تجزیه به عامل‌ها (FA) برای مطالعه اثر متغیرهای اقلیمی بر ET₀ استفاده شد. متغیرهای مورد استفاده شامل بارش، بیشینه و کمینه دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بود. در هر ایستگاه، روند تغییرات ET₀ با روش‌های اسپیرمن (SP) و مان-کندال (MK) تحلیل شد. نتایج نشان داد که در آبیر، روند تغییرات ET₀ با هر دو روش در سطح ۰/۰۵ نزولی و معنی‌دار بود. در قیدار، روند با روش MK در سطح ۰/۰۵ نزولی و معنی‌دار، اما با روش SP نزولی و غیرمعنی‌دار بود. این روند در خرمدره با روش SP صعودی اما غیرمعنی‌دار بود. ماتریس همبستگی بین متغیرهای اقلیمی تشکیل شد. معنی‌داری ضرایب همبستگی آزمایش شد. نتایج نشان داد که در خرمدره کلیه ضرایب همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بودند. نتایج FA نشان داد که در همه ایستگاه‌ها، دو عامل اول دارای مقدار ویژه بیش از یک بودند. در این ایستگاه‌ها، دو عامل نخست، در کل بین ۸۳/۴۹ و ۸۶/۱۴ درصد واریانس را در بر داشتند. پس از چرخش وریماکس ضرایب عامل‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که در ایستگاه خرمدره، Tmax و Tmin حساس‌ترین متغیرهای مؤثر بر ET₀ بودند. در قیدار و آبیر تنها Tmax حساس‌ترین متغیر مؤثر بر ET₀ بود. با توجه به ضرایب عامل دوم، سرعت باد در ایستگاه‌های خرمدره و قیدار و بارش در آبیر به‌عنوان دومین متغیر حساس و مؤثر بر ET₀ بود.

استناد: دین پژوه، یعقوب و حیدری، نازنین (۱۴۰۴). تحلیل روند ET₀ و اثر نسبی متغیرهای اقلیمی روی آن (مطالعه موردی: خرمدره، قیدار و آبیر). نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۷۵-۹۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.367513.1126>



۱. مقدمه

تبخیر-تعرق (ET) یکی از فرایندهای مهم چرخه آب در طبیعت است. در این فرایند آب از سطح مزرعه و خاک به اتمسفر منتقل می‌شود. شدت آن به میزان فراهمی انرژی خورشیدی و محتوای رطوبتی خاک بستگی دارد. مدیریت علمی منابع آب در هر منطقه مستلزم تخمین دقیق تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET₀) است. اندازه‌گیری مستقیم ET₀ معمولاً با لایسیمتر صورت می‌گیرد که کاری پرهزینه و وقت‌گیر است. بنابراین، در اغلب مطالعات از مدل‌های تجربی برای تخمین ET₀ استفاده شده است. در بین همه مدل‌های تجربی، روش پنمن-مانتیت فائو-۵۶ (PMF56) مقادیر ET₀ را در اقلیم‌های مختلف خیلی نزدیک به مقدار واقعی برآورد می‌کند (Popova et al., 2006). این روش برای محاسبه ET₀ به‌طور گسترده توسط مهندسين، متخصصین زراعی و مدیران مزارع، پژوهش‌گران و طراحان سیستم‌های آبیاری به‌کار می‌رود. (Allen et al., 1994). از سویی، این روش توسط گروه کثیری از کارشناسان تراز اول جهان برای تخمین ET₀ توصیه شده است (Pereira et al., 2015). افزون براین، در بیش‌تر مطالعات، این روش به‌عنوان یک روش مبنای مقایسه خروجی سایر مدل‌های تجربی تخمین ET₀ استفاده شده است (Haghighat & Fooladmand, 2007; Valipour, 2015; Mirhosseini et al., 2021; Shirzad et al., 2022; Varga-Haszonits et al., 2022).

امروزه گرمایش جهانی همه مؤلفه‌های آب‌وهواشناسی، هیدرولوژیکی و چرخه آب در طبیعت از جمله ET₀ را دستخوش نوسانات کرده است. بنابراین، بیش‌تر پژوهش‌ها در جهان و ایران تحلیل روند تغییرات متغیرهای آب‌وهوایی و نیز ET₀ را موردتوجه قرار داده‌اند (Dinpashoh et al., 2011; Xu et al., 2018; Dinpashoh et al., 2019; Dimitriadou & Nikolakopoulos, 2022; Raghavendra Prasad et al., 2023). تحلیل روند تغییرات ET₀ در شمال‌شرق هند توسط Jhajharia et al. (2012)، در صحرای تارغ واقع در هند توسط Jhajharia et al. (2015)، در غرب و شمال‌غرب ایران توسط Dinpashoh et al. (2019) و در ایران توسط Dinpashoh et al. (2011) با استفاده از روش مان-کندال انجام شده است. به‌تازگی از این روش در تحلیل روند ET₀ در حوضه دریاچه ارومیه بهره گرفته شده است (Dinpashoh & Babamiri, 2020).

همه رویدادهای هیدرولوژیکی از جمله ET₀ در ذات خود فرایندهای تصادفی هستند. مثلاً، ET₀ تابعی پیچیده از متغیرهای مختلف اقلیمی (مانند درجه حرارت، سرعت باد، ساعات آفتابی واقعی و رطوبت نسبی هوا) است که این متغیرها اغلب به همدیگر وابسته‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات هر متغیر اقلیمی تاحدودی می‌تواند روی ET₀ تأثیر بگذارد. میزان اثر تغییر در یک متغیر خاص از نقطه‌ای به نقطه دیگر متغیر است. دانستن اثرات نسبی متغیرهای مختلف اقلیمی روی ET₀ در ارتقای بهره‌وری از آب کشاورزی اهمیت دارد. استفاده از فنون چندمتغیره برای تشخیص اثرات نسبی متغیرهای اقلیمی روی این پدیده موردتوجه دانشمندان است. از فنون پرکاربرد در آمار چند متغیره، می‌توان به روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تجزیه به عامل‌ها (FA) نام برد. این روش‌ها قادرند که حجم عظیمی از سری داده‌های وابسته به هم را تنها با تعداد اندکی مؤلفه یا عامل اصلی که با هم هیچگونه همبستگی ندارند، توصیف کنند (Matalas and Reihner, 1967). روش FA یک ابزار پرقدرت در تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی می‌باشد (Wallis, 1968). تاکنون در زمینه استفاده از روش FA در علوم مختلف، مطالعات زیادی انجام شده است. مثلاً در زمینه اقلیم‌شناسی می‌توان به کارهای Dinpashoh et al. (2004)، Ghorbani Aghdam et al. (2013) و Sadeghi et al. (2023)، در زمینه آب‌های زیرزمینی به کارهای Miesh (1980)، Karl et al. (1982) و Seyhan (1994) اشاره کرد. روش مذکور، در مطالعات مرتبط با کیفیت آب توسط Ruiz et al. (1990) و کشاورزی توسط Murthy et al. (1990) و Meyer et al. (1991) استفاده شده است.

روش FA در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در یک ناحیه ساحلی واقع در تایوان مورد استفاده واقع شده است (Liu et al., 2003). در مطالعه ایشان ۲۸ نمونه آب از چاه‌های مختلف تهیه و سپس ۱۳ پارامتر هیدروشیمیایی از هر چاه برای تحلیل در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که دو عامل نخست حدود ۷۸ درصد واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کند. بنا بر گزارش نامبردگان، عامل اول غلظت پارامترهای EC، TDS، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Na^+ ، K^+ و Mg^{2+} و عامل دوم، غلظت مواد دیگر مانند آرسینیک، بازها و کل کربن آلی (TOC) را توصیف می‌کرد. در ایالت کارناتاکی هند، اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی روی ET_0 با روش FA مطالعه شد نتایج حاکی از آن بود که سه عامل نخست بیش از ۸۵ درصد واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کند (Mohan & Arumugam, 1996). عامل‌های منتخب دارای ضریب عامل بیش‌تر برای متغیرهای هواشناسی رطوبت نسبی هوا، دما و سرعت باد بودند. نامبردگان نتیجه گرفتند که این سه متغیر، نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی روی ET_0 این ناحیه تأثیر بیش‌تری دارد.

در شمال ترکیه، به منظور ارزیابی کیفیت آب رودخانه ملن از روش FA استفاده شد (Koklu et al., 2010). این سامانه حاوی پنج ایستگاه بوده و در هر کدام ۲۶ پارامتر فیزیکی و شیمیایی در یک دوره آماری ۱۱ ساله در نظر گرفته شد. ایشان از روش FA در یافتن ارتباط بین دوره‌های کم‌آبی با آلاینده‌ها استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که در ایستگاه‌های مختلف عامل‌های منتخب بین ۷۲ تا ۹۷ درصد واریانس کل را در بر می‌گیرد.

در شرق الجزیره، کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت عین‌عزل با روش FA مطالعه شد (Belkheiri & Narany, 2015). در این پژوهش، ورودی روش مذکور شامل غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، سولفات، بیکربنات، نیترات، نیتريت، آمونیوم و COD) بوده که در سال ۲۰۰۸ از ۱۸ حلقه چاه عمیق نمونه‌برداری شده بود. نتایج نشان داد که دو عامل اول بیش از ۸۵ درصد کل واریانس را توجیه می‌کرد. عامل اول دارای ضریب عامل بیش‌تر برای پارامترهای شوری، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات بوده و به‌تنهایی بیش از ۵۹ درصد واریانس را در بر می‌گرفت. عامل دوم، دارای ضریب عامل بیش‌تر برای پارامترهای نیترات، نیتريت، آمونیوم و COD و بیکربنات بود که حدود ۲۶/۷ درصد واریانس را توجیه می‌کرد. آن‌ها نتیجه گرفتند که دو عامل مهم "طبیعی" و "دخالته بشر" در آلودگی سفره آبدار تأثیر داشته‌اند.

در دشت خوی، روش FA به منظور مطالعه وضعیت هیدروشیمیایی سفره آبدار از ۵۴ نمونه آب زیرزمینی بهره گرفته شد، به‌طوری‌که در هر نمونه ۱۲ پارامتر کیفی آب اندازه‌گیری شده بود (Akbari et al., 2022). در این مطالعه، همبستگی بین متغیرها تحلیل شد و سپس از روش FA برای کاهش ابعاد داده‌ها استفاده شد. آن‌ها نشان دادند که سه عامل نخست دارای مقدار ویژه بیش از یک دارند. در کل این سه عامل مقدار واریانسی نزدیک به ۶۳ درصد را در بر داشتند. نامبردگان، عامل اول را به اندرکنش آب و سنگ و عامل دوم به سنگ‌های بازالتی، رورانه و دگرگونی نسبت داده شد. عامل سوم نیز به فرایندهایی نسبت داده شد که در اثر فعل و انفعالات شیمیایی موجب آزادشدن آهن در آب زیرزمینی می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون نه‌تنها روند تغییرات ET_0 در ایستگاه‌های خرمدره، قیدار و آبر تحلیل نشده، بلکه تخمین ET_0 با روش PMF56 نیز در هیچ‌کدام از این ایستگاه‌ها انجام نشده است. در نتیجه، اثر نسبی متغیرهای هواشناسی روی ET_0 با بهره‌گیری از روش FA نیز بررسی نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه تخمین دقیق ET_0 با روش PMF56 و تحلیل روند تغییرات ET_0 در سه ایستگاه خرمدره، قیدار و آبر و سپس بررسی اثر نسبی متغیرهای اقلیمی روی ET_0 با استفاده از رویکرد FA می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

برای این مطالعه سه ایستگاه هواشناسی در استان زنجان شامل آبهر (یا طارم)، خرمدره و قیدار در نظر گرفته شد. این ایستگاه‌ها دارای آمار کافی برای تحلیل بوده و قبلاً در هیچ مطالعه مشابهی بررسی نشده‌اند. این استان در شمال غرب کشور بوده و با هفت استان دیگر شامل استان‌های اردبیل و گیلان از شمال، قزوین از شرق و شمال شرق، استان همدان از جنوب، کردستان از جنوب غرب، آذربایجان غربی از غرب و آذربایجان شرقی از شمال غرب همجوار است. موقعیت جغرافیایی استان بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی تا ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه و سه ایستگاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

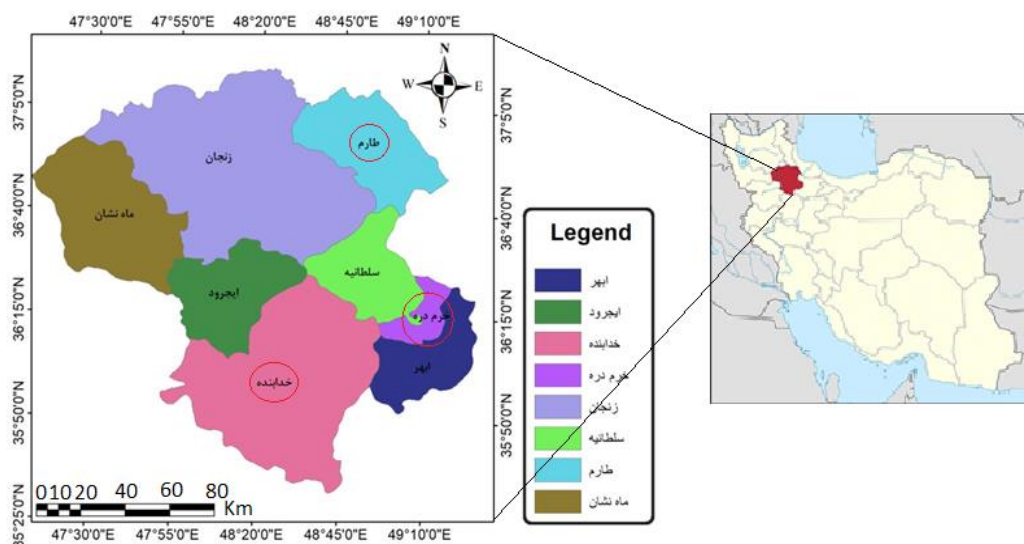


Figure 1. Geographical location of the three selected stations in Zanjan province

مختصری از خصوصیات اقلیمی ایستگاه‌های منتخب به شرح زیر است. ایستگاه خرمدره در شرق استان قرار دارد (شکل ۱). میانگین دمای سالانه آن ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۰۱ میلی‌متر است. این ایستگاه در ناحیه کوهستانی بوده و دارای ارتفاع ۱۵۷۰ متر است. آب‌وهوای آن اغلب سرد و خشک و در تابستان معتدل است. بیشینه دمای مطلق ثبت شده در خرمدره ۳۹ درجه (در مرداد) و کمینه آن ۲۴- درجه سانتی‌گراد (در دی‌ماه) است. میانگین تعداد روزهای برفی و بارانی در این ایستگاه به ترتیب ۲۲ و ۱۲۱ روز در سال است. بیش‌ترین مقدار بارش روزانه ثبت شده در خرمدره ۶۰ میلی‌متر است. ایستگاه قیدار در جنوب استان در شهر خداپنده و در ارتفاع ۲۰۴۰ متر قرار دارد (شکل ۱). میانگین بارش سالانه این ایستگاه ۳۹۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۱/۱۷ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه و کمینه دمای ثبت شده آن به ترتیب ۳۷ و ۷/۲- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تعداد روزهای یخبندان قیدار ۸۴ روز در سال است. ایستگاه آبهر مرکز شهرستان طارم (شمال شرق استان زنجان) است (شکل ۱). ارتفاع آن ۷۵۰ متر بوده و میانگین بارش سالانه و میانگین دمای سالانه آن به ترتیب ۲۴۵ میلی‌متر و ۱۹/۲ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه و کمینه دمای ثبت شده تاریخی در آبهر به ترتیب ۴۸ و ۹/۵- درجه سانتی‌گراد است.

۲.۲. داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از داده‌های هواشناسی شامل میانگین بیشینه دمای هوا (T_{max})، میانگین کمینه دمای هوا (T_{min})، میانگین رطوبت نسبی هوا (RH)، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (U_{10})، ساعات آفتابی واقعی (n) و بارش (P) در مقیاس روزانه استفاده شد. داده‌ها از سازمان هواشناسی استان زنجان اخذ شد. از داده‌های روزانه سری داده‌های ماهانه حاصل شد. برای این کار، مجموع بارش و ساعات آفتابی واقعی روزهای هر ماه حاصل شد. ضمناً میانگین داده‌های بیشینه درجه حرارت هوا، کمینه درجه حرارت هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی هوا محاسبه و برای تحلیل آماده شدند. کنترل داده‌های هواشناسی به شرح زیر انجام شد. بیشینه و کمینه رطوبت نسبی هوا در یک دیالگرام و بیشینه و کمینه دمای هوا در دیالگرام دیگر رسم شدند. اگر این دو نمودار یکدیگر را قطع نمی‌کردند و منحنی‌ها جهش ناگهانی (به بالا یا به پایین) نیز از خود نشان نمی‌دادند، آنگاه صحت داده‌ها درست فرض می‌شد. در غیر این صورت، تصحیحات لازم با توجه به داده‌های روز قبل و بعد انجام می‌شد. برای بررسی سرعت باد و ساعات آفتابی نیز به‌طور مشابه نمودار سری زمانی هر یک از این متغیرها جداگانه رسم شدند. وجود هر مقدار منفی در نمودار غیرقابل قبول تلقی شده و نسبت به تصحیح آن اقدام شد. درضمن، کنترل شد که داده پرت در نمودار مشهود نباشد. سری‌ها دارای تعداد معدودی داده گم‌شده بودند. برای بازسازی آن‌ها از میانگین طولانی‌مدت هر ماه استفاده شد. جدول (۱) ویژگی‌های آماری داده‌ها را در ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. مقادیر ET_0 در هر ایستگاه با روش PMF56 محاسبه شدند.

Table 1. Statistical measures of meteorological variables in the selected stations

Station	T (°C)	SD-T (°C)	n (hr)	SD-n (hr)	ea (kPa)	SD-ea (kPa)	U2 (m/s)	SD-U2 (m/s)	ET0 (mm/yr)	SD-ET0 (mm/yr)	P (mm)	SD-P (mm)
Khorramdareh	13.5	0.77	2927	107.2	0.57	0.05	1.01	0.16	1272.5	78.8	301.3	60.4
Gheidar	11.17	0.479	3015.4	103.6	0.49	0.03	1.41	0.13	1344.5	54.3	390.7	79.2
Abbar	19.23	0.6	2702.6	103.3	0.89	0.04	0.94	0.17	1370.3	80.3	245.2	71.5

Note: T is mean annual air temperature, SD denotes standard deviation, n is annual actual sunshine hours, ea is mean actual vapor pressure, U2 is the mean wind speed at 2 m height, and P is annual precipitation.

برای تخمین ET_0 از روش PMF56 استفاده شد. جزئیات این روش در متون علمی ارائه شده است (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2015).

۳.۲. تجزیه به عامل‌ها (FA)

در روش FA متغیرهای وابسته به هم (متغیرهای هواشناسی) به عامل‌های مستقل از هم تفکیک می‌شوند. اغلب دو یا چند عامل اول واریانس زیادی از داده‌ها را در بر دارد (Rencher, 1995). هر عامل به‌صورت ترکیب خطی از همه متغیرهای مورد استفاده توصیف می‌شود. برای انجام عمل FA، P متغیر هواشناسی (در این مطالعه شش متغیر) در نظر گرفته و عمل PCA (Miesh, 1980) روی آن‌ها انجام شد. متغیرهای هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه شامل میانگین دما، T_{max} ، T_{min} ، RH، U_{10} ، ساعات آفتابی واقعی (n) و میزان بارش (P) در مقیاس ماهانه بودند. در هر ایستگاه، این متغیرها استاندارد شدند و ماتریس همبستگی بین آن‌ها تشکیل و معنی‌داری ضرایب همبستگی بین متغیرهای کاندیدا بررسی شد. ضرایب متغیرها به‌دست آمد و مقادیر مؤلفه‌های اصلی یعنی z_i ها حساب شدند (Manly, 1994). برای انجام عمل FA فقط m مؤلفه اصلی که دارای مقدار ویژه بیش از یک بود، در نظر گرفته شد. 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 غیرچرخشی به‌دست آمد. در این

مطالعه، حداقل دو عامل که مقادیر ویژه آن‌ها بیش از یک بود، انتخاب شد. برای تفسیر بهتر نتایج از چرخش متعامد محورها، حول مبدا ثابت، موسوم به وریماکس استفاده شد. با این عمل، ضرایب عامل‌های اصلی با مقدار بیش‌تر برای برخی متغیرها و ضرایب با مقدار کم‌تر (نزدیک به صفر) برای سایر متغیرهای هواشناسی تولید می‌شود. به این ترتیب، پس از چرخش محورها، در صفحه عمود برهم، ضریب عامل اول - ضریب عامل دوم، موقعیت متغیرهای مستقل آنچنان تغییر می‌کنند که برخی از آن‌ها به قسمت کرانه‌ای محورها (یک یا منهای یک) و برخی دیگر نیز به قسمت مرکزی محورها (نزدیک صفر) تغییر مکان می‌یابند. به عبارت بهتر، پس از چرخش، قسمت اعظم نقاط مشاهداتی (متغیرها) هرچه بیش‌تر به محوره‌های عامل‌های اصلی منتخب نزدیک شدند. این عمل، تفسیرپذیری عامل‌های منتخب را تسهیل می‌کند (Seyhan, 1994; Rencher, 1995; Manly, 1994).

۴.۲. بررسی روند تغییرات ET₀ ایستگاه‌ها

در این مطالعه، روند تغییرات ET₀ ایستگاه‌ها با دو روش اسپیرمن^۳ (SP) و مان-کندال^۴ (MK) بررسی شد.

۴.۲.۱. روش اسپیرمن^۳ (SP)

در این روش از رابطه زیر استفاده شد (Shadmani et al., 2012):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، d_i تفاضل رتبه هر مشاهده در ترتیب صعودی با رتبه نظیر آن در ترتیب تاریخی بوده و n تعداد مشاهدات و ρ آماره‌ای است که در محاسبه آماره نهایی اسپیرمن - که با Z_{SR} نشان داده می‌شود - به کار می‌رود. مقدار ρ محاسبه شده مطابق رابطه زیر برای محاسبه آماره Z_{SR} استفاده شد:

$$Z_{SR} = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

برای بررسی معنی‌داری روند، مقدار قدر مطلق آماره Z_{SR} با t مستخرج از جدول t -student با درجه آزادی $(n-2)$ و سطح اعتماد $(1 - \frac{\alpha}{2})$ مقایسه شد. اگر قدر مطلق Z_{SR} بزرگ‌تر از t می‌شد، روند معنی‌دار و در غیر این صورت، روند غیرمعنی‌دار در نظر گرفته می‌شد.

۴.۲.۲. روش مان کندال^۴ (MK)

در این روش، داده‌های تاریخی به صورت $x_1, x_2, \dots, x_n$ در نظر گرفته شدند. سپس آماره S از رابطه زیر به دست آمد:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

پس از محاسبه آماره S ، مقدار آن در رابطه زیر قرار داده شد:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{for } S > 0 \\ 0 & \text{for } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن $\text{var}(S)$ از رابطه زیر به دست آمد:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad \text{رابطه (۵)}$$

آماره τ کندال نیز از رابطه زیر محاسبه شد (Shadmani et al., 2012):

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

اگر علامت آماره Z مثبت می‌شد، آنگاه روند صعودی و اگر منفی می‌شد، روند نزولی فرض می‌شد. برای بررسی معنی‌داری آماره Z مقدار آن با مقدار Z جدول نرمال استاندارد در سطح اعتماد $(1 - \frac{\alpha}{2})$ مقایسه می‌شد. اگر قدرمطلق آماره Z بزرگ‌تر از مقدار نظیر جدول نرمال استاندارد می‌شد، آنگاه روند معنی‌دار و در غیر این صورت، روند غیرمعنی‌دار در نظر گرفته می‌شد. در این مطالعه، برای α سه سطح شامل ۱۰، پنج و یک درصد برای انجام آزمون روند در نظر گرفته شد.

۳. نتایج و بحث

شکل (۲) نمودارهای سری‌های زمانی و الگوی تغییرات ماهانه هر کدام از متغیرهای مورد استفاده را در سه ایستگاه خرمدره، قیدار و آبیر نشان می‌دهد. در این شکل، هر دو ردیف مربوط به یک ایستگاه معین بوده که ردیف اول از بالا نمودار متغیرهای هواشناسی در مقیاس سالانه (از چپ به راست شامل میانگین دمای سالانه، مجموع ساعات آفتابی واقعی سالانه، فشار بخار واقعی سالانه و میانگین سرعت باد سالانه) و در ردیف زیرین آن الگوی ماهانه همان متغیرها به ترتیب، نشان داده شده است. دو ردیف اول از بالا متعلق به خرمدره، دوردیف میانی متعلق به قیدار و دو ردیف تحتانی متعلق به ایستگاه آبیر می‌باشند.

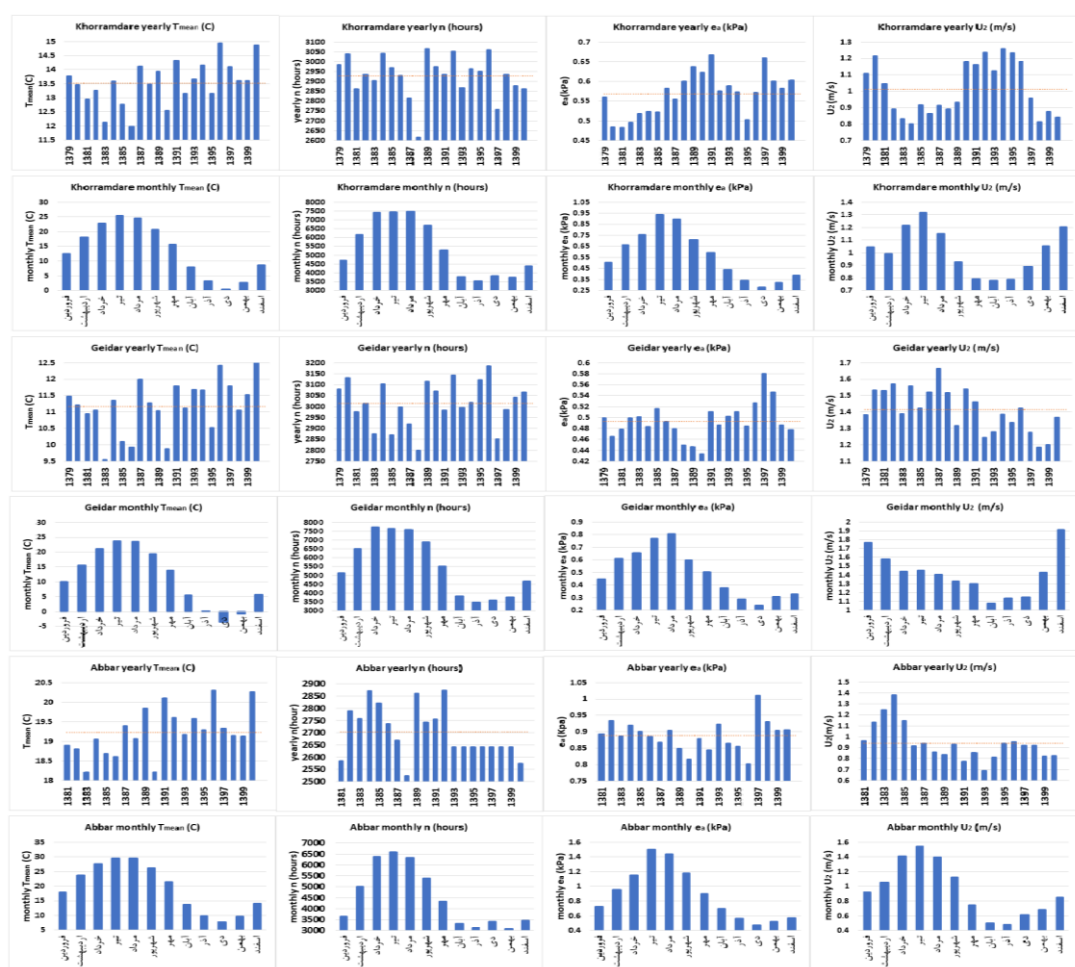


Figure 2. Plots of climatic variables in the selected stations: Khorramdareh, Gheidar and Abbar (2000-2021)

۱.۳. نتایج FA

پس از استاندارد کردن داده‌ها، که شامل شش متغیر و ۲۵۵ مورد (برای ایستگاه خرمدره در مقیاس ماهانه) با استفاده از نرم‌افزار SPSS، عمل FA انجام شد. جدول (۲) ماتریس همبستگی را برای ایستگاه خرمدره نشان می‌دهد. این جدول ضرایب همبستگی هر یک از متغیرهای هواشناسی را با متغیرهای دیگر نشان می‌دهد. مثلاً در خرمدره، بیش‌ترین ضریب همبستگی مثبت بین T_{max} و T_{min} برابر با ۰/۹۳۷ می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش T_{max} با افزایش T_{min} و برعکس کاهش یکی با کاهش دیگری است. از طرفی، ضریب همبستگی T_{max} با RH_{ave} معادل با ۰/۸۲۴- است که حاکی از کاهش مقدار T_{max} با افزایش RH_{ave} و برعکس، افزایش T_{max} با کاهش RH_{ave} می‌باشد. به‌طوری‌که از این جدول می‌توان استنباط کرد، ضرایب همبستگی کلیه متغیرها دو به دو در سطح پنج درصد معنی‌دار بودند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انجام تجزیه به عامل‌ها در کاهش اندازه داده‌ها مفید خواهد بود. دترمینان ماتریس همبستگی محاسبه شد در مورد خرمدره مقدار آن ۰/۰۰۳ به‌دست آمد. این رقم از مقدار بحرانی بیش‌تر است که حاکی از عدم نیاز به حذف یک یا چند متغیر هواشناسی که موجب چند هم‌خطی^۵ بین متغیرهای هواشناسی شده می‌باشد.

Table 2. Correlation matrix of the monthly climatic data at the station Khorramdareh

	Sun	Wind	Tmin	Tmax	RH _{ave}	Rain
Rain	-0.638*	-0.259*	-0.491*	-0.516*	0.597*	
RH _{ave}	-0.834*	-0.343*	-0.788*	-0.824*		
Tmax	0.896*	0.359*	0.937*			
Tmin	0.875*	0.280*				
Wind	0.414*					
Sun						

Determinan=0.003

شکل (۳) نمودار صخره‌ای را برای ایستگاه خرمدره، قیدار و آببر نشان می‌دهد. در این نمودار محور افقی، شماره مؤلفه و محور قائم مقدار ویژه می‌باشد. به‌طوری‌که از این شکل می‌توان دید، فقط دو عامل اصلی اول دارای مقدار ویژه بیش از یک بودند و مؤلفه‌های بعدی مقدار ویژه بسیار ناچیزی (نزدیک صفر) داشتند. بنابراین، در هر سه ایستگاه فقط دو مؤلفه‌ی اصلی برای تحلیل انتخاب گردید.

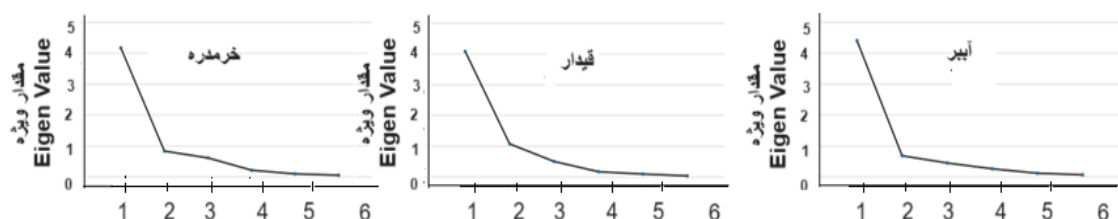


Figure 3. Screeplots of the selected stations (from left to right: Khorramdareh, Gheidar, and Abbar)

شکل (۴) نمودار ضرایب عامل‌های اول و دوم را در ایستگاه خرمدره، قیدار و آببر، بعد از چرخش محورها، نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه خرمدره متغیرهای بیشینه و کمینه دمای هوا و در ایستگاه قیدار متغیر بیشینه دمای هوا به‌عنوان حساس‌ترین متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ET_0 بودند. این نتیجه با توجه به ضرایب عامل اول (در خرمدره) حاصل شد. با این حال، براساس ضرایب عامل دوم متغیر سرعت باد دارای بیش‌ترین ضریب بوده و بنابراین، سرعت باد در خرمدره و قیدار پس از عامل اول مؤثر بر فرایند ET_0 در نظر گرفته شد. باید اذعان نمود که پس از دمای

هوا، متغیرهای Sun، RH_{ave} و Rain در ایستگاه خرمدره از نظر ضریب عامل اول در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. بنابراین، در خرمدره و قیدار مؤلفه اول به نام "دما و تابش" و مؤلفه دوم تحت عنوان "باد" نام گذاری شد. در ایستگاه آبر، متغیر بیشینه دمای هوا بیش‌ترین ضریب عامل اول را دارا بود (شکل ۴). بنابراین، بیشینه دمای هوا حساس‌ترین عامل اقلیمی در تبخیر-تعرق گیاه مرجع در آبر در نظر گرفته شد. پس از آن، متغیرهای T_{min}، sun و Wind به ترتیب، در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار داشتند. از سویی، در آبر بارش دارای بیش‌ترین ضریب عامل دوم در بین همه متغیرهای هواشناسی بود. بنابراین، در آبر عامل اول به نام "دما و تابش" و عامل دوم به نام "بارش" نام‌گذاری گردید.

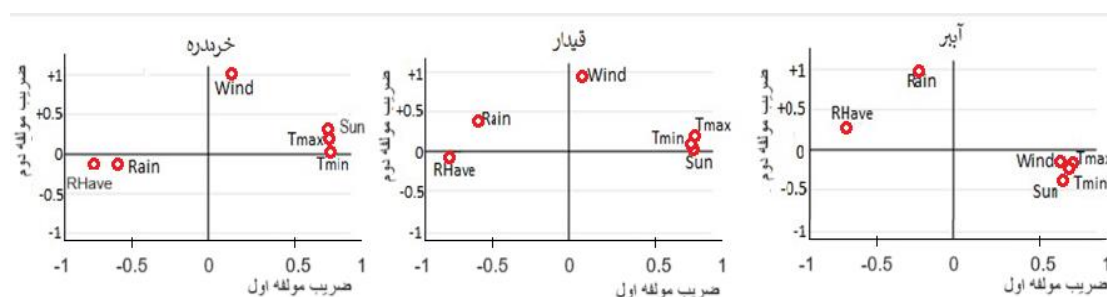


Figure 4. Geometrical positions of variables based on the first two factors in the selected stations (from left to right: Khorramdareh, Gheidar, and Abbar)

جدول (۳)، مقادیر واریانس توجیه‌شده توسط هر عامل اصلی و درصد آن‌ها را قبل و بعد از چرخش وریماکس در خرمدره نشان می‌دهد. به‌طوری‌که می‌توان دید عامل اول پس از چرخش ۶۴/۷۴ درصد واریانس، عامل دوم ۱۸/۷۴ درصد واریانس را به خود اختصاص داده است. بنابراین، در مجموع دو عامل اصلی نخست حدود ۸۳/۴۹ درصد واریانس را توجیه می‌کند. بنابراین، انتخاب دو عامل اصلی اول برای خرمدره منطقی به نظر می‌سد. هر چند مجموع واریانس‌های دو عامل منتخب (۸۳/۴۸) پس از چرخش محورها هیچ تغییری نکرده، ولیکن مقدار واریانس توجیه‌شده توسط هر عامل پس از چرخش اندکی نسبت به قبل از چرخش تغییر یافته است. مثلاً، عامل اول قبل از چرخش، مقدار واریانسی معادل ۶۹/۵۶ درصد و بعد از چرخش مقدار واریانسی برابر با ۶۴/۷۴ درصد را به خود اختصاص داد. به‌طور مشابه، عامل دوم قبل از چرخش مقدار واریانس ۱۳/۹۳ درصد را توجیه کرده است، اما بعد از چرخش محورها مقدار آن به ۱۸/۷۴ درصد افزایش یافته است. در هر حال، مجموع واریانس دو عامل اصلی ثابت باقی مانده است.

Table 3. The variance values accounted for the selected factors before or after the rotation using the varimax method at the station Khorramdareh

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	4.174	69.561	69.561	4.174	69.561	69.561	3.885	64.743	64.743
2	0.836	13.926	83.487	0.836	13.926	83.487	1.125	18.744	83.487
3	0.617	10.276	93.763						
4	0.218	3.635	97.398						
5	0.099	1.648	99.046						
6	0.057	0.954	100.000						

جدول (۴)، مقادیر واریانس توجیه‌شده توسط هر عامل اصلی را در ایستگاه قیدار نشان می‌دهد. در این جدول، درصد واریانس توجیهی هر عامل قبل و بعد از چرخش وریماکس نیز ارائه شده است. در قیدار عامل اول پس از چرخش ۶۷/۹۱ درصد و عامل دوم ۱۸/۲۳ درصد واریانس را توجیه می‌کند. در مجموع، دو مؤلفه اول ۸۶/۱۴ درصد واریانس را توجیه

می‌کند. مشابه با خرمدره، در قیدار نیز با چرخش محورها واریانس توجیه‌شده با عامل‌های منتخب اندکی تغییر یافته، اما مجموع واریانس دو عامل ثابت مانده است. این کار که با چرخش محورها انجام شد، قابلیت تفسیر نتایج را کمی بهبود داده است. باتوجه به این که در هر ایستگاه، تنها دو عامل انتخاب شد، بنابراین، در جدول (۴) برای عامل‌های بعدی (سوم تا ششم) درصد واریانس‌ها درج نشده است.

Table 4. The values of the variances accounted for by the selected factors either before or after the rotation using the Varimax method at the station Gheidar

Component	Initial Solution			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	4.087	68.119	68.119	4.087	68.119	68.119	4.074	67.907	67.907
2	1.081	18.018	86.137	1.081	18.018	86.137	1.094	18.229	86.137
3	0.511	8.513	94.650						
4	0.177	2.955	97.605						
5	0.101	1.680	99.285						
6	0.043	0.715	100.000						

جدول (۵) نیز مقادیر واریانس توجیه‌شده توسط هر یک از عامل‌های اصلی را قبل و بعد از چرخش وریماکس در آببر نشان می‌دهد. در آببر، در مجموع دو عامل نخست حدود ۸۴/۹ درصد واریانس را توجیه می‌کند. این نتیجه حاکی از مفید بودن عمل FA در این ایستگاه است. عامل اول، پس از چرخش ۶۳/۳۶ درصد و عامل دوم ۲۱/۵۴ درصد واریانس را توجیه می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روش FA به‌طور مؤثری در کاهش ابعاد داده‌ها موفق عمل کرده است. محاسبه ضرایب هر یک از عامل‌های منتخب برای هر یک از متغیرهای هواشناسی در تشخیص اثر نسبی متغیرهای هواشناسی روی ET₀ ایستگاه‌ها مفید واقع شد.

Table 5. The values of the variances accounted for the selected factors either before or after the rotation using the Varimax method at the station Abbar

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	4.408	73.469	73.469	4.408	73.469	73.469	3.802	63.362	63.362
2	0.686	11.436	84.905	0.686	11.436	84.905	1.293	21.543	84.905
3	0.451	7.524	92.429						
4	0.263	4.389	96.818						
5	0.121	2.017	98.835						
6	0.070	1.165	100.000						

۲.۳. نتایج تحلیل روند ET₀ ایستگاه‌ها

جدول (۶) نتایج روند تغییرات سری زمانی ET₀ سالانه را با روش‌های SP و MK برای هریک از سه ایستگاه منتخب نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از این جدول می‌توان استنباط کرد، در ایستگاه آببر روند تغییرات ET₀ با هر دو روش نزولی و معنی‌دار (در سطح پنج درصد) بود. روند تغییرات ET₀ قیدار با هر دو روش نزولی بود. اما روند ET₀ ایستگاه خرمدره صعودی (اما غیرمعنی‌دار) بود. هرچند این روند با روش MK در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، اما روند تغییرات همین سری با روش SP غیرمعنی‌دار بود. شکل (۵) نمودار سری زمانی ET₀ ایستگاه آببر را نشان می‌دهد. در این مطالعه، روند تغییرات سایر متغیرهای اقلیمی نیز در ایستگاه‌های منتخب بررسی شد. نتایج نشان داد که روند

تغییرات متغیر ساعات آفتابی ایستگاه آبر با هر دو روش، نزولی و معنی‌دار (در سطح پنج درصد) بود. روند ساعات آفتابی ایستگاه خرمدره نزولی (غیرمعنی‌دار) بود. روند تغییرات ساعات آفتابی ایستگاه قیدار با هر دو روش صعودی (اما غیرمعنی‌دار) بود. همچنین، روند تغییرات میانگین دمای هوای سالانه هر سه ایستگاه صعودی و معنی‌دار بود. در خرمدره و قیدار روند تغییرات میانگین دمای هوای سالانه با هر دو روش در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. روند افزایشی، دمای هوای سالانه ایستگاه آبر با روش MK در سطح پنج درصد و با روش SP در سطح ۱۰ درصد معنی‌دار بود.

بررسی‌ها نشان داد که روند تغییرات رطوبت نسبی هوا در خرمدره با هر دو روش صعودی و معنی‌دار (در سطح ۱۰ درصد) بود. روند تغییرات رطوبت نسبی در ایستگاه قیدار با هر دو روش صعودی (اما غیرمعنی‌دار) بود. همچنین روند تغییرات این متغیر در آبر با روش MK نزولی (غیرمعنی‌دار) و با روش SP صعودی (غیرمعنی‌دار) بود. از سویی نتایج حاکی از آن بود که روند تغییرات سرعت باد (در ارتفاع دو متری) در قیدار و آبر با هر دو روش نزولی و معنی‌دار (در سطح ۱۰ درصد) بود. روند تغییرات این متغیر در خرمدره با هر دو روش صعودی (ولی غیرمعنی‌دار) به‌دست آمد.

Table 6. Results of trends in ET_0 in the selected stations using the Mann- Kendall and Spearman methods

Station	Mann- Kendall				Spearman				Direction
	Kedall's tau	Significant level	N	Result	Spearman's rho	Significant level	N	Result	
Khorramdareh	0.177	0.124	22	NS	0.178	0.214	22	NS	Upward
Gheidar	-0.273	0.038	22	**	-0.348	0.056	22	NS	Downward
Abbar	-0.284	0.040	20	**	-0.453	0.023	20	**	Downward

Note: NS, and ** denote insignificant and significant at 5% level, respectively.

در شکل (۵) نمودار سری زمانی ET_0 سالانه ایستگاه آبر که روند نزولی معنی‌دار داشته، نشان داده شده است. روند نزولی سری ET_0 سالانه در این شکل مشهود است.

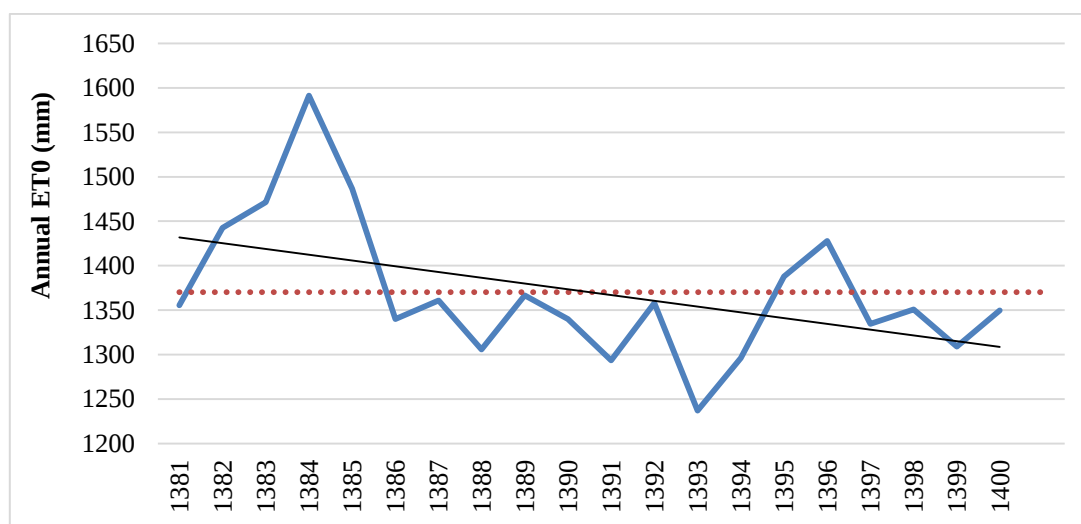


Figure 5. Trends in Potential Reference Crop Evapotranspiration (ET_0) at the Station Abbar (2000-2021)

می‌توان نتیجه گرفت که در این مطالعه، روش FA به‌طور مؤثری ابعاد داده‌ها را کاهش داده است. براساس نتایج معلوم شد که عامل‌های اول و دوم در ارتباط با فرایندهای فیزیکی مرتبط با ET_0 است. این عامل‌ها هیچ همبستگی با همدیگر ندارند. نتایج نشان داد که تقریباً در هر سه ایستگاه، متغیرهای هواشناسی شامل دما، ساعات آفتابی واقعی و رطوبت نسبی روی فرایند ET_0 ایستگاه‌های مورد مطالعه مؤثر بودند. مهم‌ترین متغیر مؤثر بر فرایند ET_0 بیشینه دمای هوا

بود. براساس مطالعات انجام یافته در دو ایالت هندوستان موسوم به تامیل نادو و کارناتاکا که توسط Mohan & Arumugam (1996) به انجام رسیده، معلوم شده است که در این دو ایالت نیز ET₀ متأثر از متغیرهای رطوبت نسبی هوا، دما و سرعت باد بوده است که با نتیجه به دست آمده از مطالعه حاضر کاملاً همخوانی دارد. هرچند دامنه نوسانات اقلیمی به علت گرمایش جهانی از ایستگاهی به ایستگاه دیگر متفاوت است، با این حال، نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهای مهم هواشناسی مؤثر بر ET₀ در ایستگاه‌ها یکسان نیست. افزون بر این، تغییرات اقلیمی روی ET₀ ایستگاه‌های مورد مطالعه مشابه نبوده است. در مطالعه حاضر، علاوه بر تحلیل روند ET₀، روند چند متغیر دیگر اقلیمی نیز بررسی شد. نتایج تحلیل روند نشان داد که روند تغییرات ET₀ در آببر نزولی و معنی دار بود، در حالی که در دو ایستگاه دیگر معنی دار نبود. به طور اخص، نتایج نشان دهنده این واقعیت بود که روند سری زمانی ET₀ ایستگاه آببر با هر دو روش SP و MK منفی (نزولی) و در سطح ۰/۰۵ معنی دار بود. روند ET₀ ایستگاه خرمدره مثبت (صعودی) و غیرمعنی دار بود. روند تغییرات ET₀ ایستگاه قیدار در سطح ۰/۰۵ با روش MK نزولی و معنی دار، اما با روش SP نزولی (اما غیرمعنی دار) بود. در این مطالعه، روند تغییرات متغیرهای هواشناسی ایستگاه‌ها نیز بررسی شد. نتایج حاکی از این بود که روند تغییرات ساعات آفتابی واقعی ایستگاه آببر با هر دو روش نزولی و معنی دار (در سطح پنج درصد) بود. روند ساعات آفتابی واقعی ایستگاه خرمدره نیز نزولی (ولی غیرمعنی دار) بود. روند تغییرات ساعات آفتابی واقعی ایستگاه قیدار با هر دو روش صعودی (اما غیرمعنی دار) بود. روند تغییرات دمای هوای سالانه ایستگاه خرمدره و قیدار با هر دو روش صعودی و در سطح پنج درصد معنی دار بود. روند تغییرات دمای هوای سالانه ایستگاه آببر هم صعودی بود. این روند با روش MK در سطح پنج درصد و با روش SP در سطح ۱۰ درصد معنی دار بود. روند تغییرات میانگین رطوبت نسبی هوا در ایستگاه خرمدره و قیدار با هر دو روش صعودی بود. این روند در سطح ۱۰ درصد معنی دار، اما در قیدار غیرمعنی دار بود. از سویی روند تغییرات متغیر فوق‌الذکر در ایستگاه آببر با روش MK نزولی (ولی غیرمعنی دار) و با روش SP صعودی (اما غیرمعنی دار) بود. روند تغییرات سرعت باد در ارتفاع دو متری در طی دوره آماری ایستگاه‌های قیدار و آببر با هر دو روش نزولی و در سطح ۱۰ درصد معنی دار بود. روند تغییرات سرعت باد در خرمدره با هر دو روش صعودی (اما غیرمعنی دار) بود. یافته‌های مطالعه Hashemi & Misaghi (2015)، در مورد روند تغییرات ET₀ را در دشت زنجان (ایستگاه‌های زنجان، خرمدره و خدابنده) نشان داد که روند بارندگی در سطح ۹۵ درصد در ایستگاه زنجان معنی دار بود، اما بارش در ایستگاه‌های خرمدره و خدابنده در هیچ یک از فصول سال تغییر معناداری نداشت. در حالی که روند تغییرات دمای هوا هر سه ایستگاه (در فصول بهار و تابستان) افزایشی گزارش شده است. یافته‌های هاشمی و میثاقی با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد، زیرا دمای هوا در هر دو مطالعه روند صعودی داشت. نتایج حاصل از رگرسیون دومتغیره مابین دما و ET₀ ایستگاه‌ها، نشان داد که قیدار در نیمه اول سال و آببر در نیمه دوم سال، بیش‌ترین مقدار ET₀ را دارد. در مطالعه ایشان، این مقادیر به ترتیب، در قیدار و آببر برابر با مقدار ۱۳۱۴ و ۱۲۳۱ میلی‌متر در سال گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر که توسط Dinpashoh *et al.* (2024) انجام شده است، مقادیر ET₀ با روش PMF56 برای شش ایستگاه در حاشیه جنوبی دریای خزر محاسبه و روند تغییرات ET₀ سالانه ایستگاه‌ها با آزمون MK نشان داد که در همه ایستگاه‌ها (به جز نوشهر) روند ET₀ سالانه مثبت و معنی دار بود. شیب خط روند ET₀ ایستگاه‌ها در همه آن‌ها صعودی بود. این نتیجه با یافته‌های مطالعه حاضر همخوانی ندارد، زیرا روند تغییرات ET₀ در قیدار و آببر نزولی بود. در مطالعه Dinpashoh *et al.* (2024) که در آن از تجزیه به عامل‌ها در سواحل دریای خزر بهره گرفته شد، معلوم شد که مجموع واریانس توجیه شده توسط دو عامل اول از حداقل ۵۶/۵ درصد در رشت تا حداکثر ۷۹/۶ درصد در ساری تغییر می‌کند. بیش‌ترین ضریب عامل اول در رشت ساعات آفتابی و در ایستگاه‌های دیگر حداکثر درجه حرارت بود. بیش‌ترین ضریب عامل دوم، متعلق به سرعت باد (در ایستگاه‌های

رشت، ساری، گرگان و نوشهر) و بارش (در ایستگاه‌های رامسر و آستارا) بودند. نتایج این مطالعه نیز با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع، نه تنها یکی از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با طراحی سامانه‌های آبیاری گیاهان زراعی و باغی است بلکه از مؤلفه‌های اصلی در چرخه آب در طبیعت به‌شمار می‌رود. در این مطالعه، اهمیت نسبی متغیرهای مختلف اقلیمی روی ET_0 با استفاده از روش FA بررسی شد. هم‌چنین روند تغییرات مقادیر ET_0 با روش‌های SP و MK بررسی گردید. از داده‌های ماهانه مربوط به شش متغیر هواشناسی شامل میانگین بیشینه دما، میانگین کمینه دما، تعداد ساعات آفتابی واقعی، مقدار بارش ماهانه، میانگین رطوبت نسبی هوا و میانگین سرعت باد بهره گرفته شد. همبستگی بین هر جفت از متغیرهای اقلیمی منتخب در هر ایستگاه موردآزمون واقع شد و از ماتریس همبستگی بین متغیرهای هواشناسی استانداردشده در تحلیل FA استفاده شد. این مطالعه در سه ایستگاه هواشناسی شامل خرمدره، قیدار و آبر واقع در استان زنجان به‌انجام رسید. روش FA، برای بررسی تأثیر نسبی متغیرهای هواشناسی روی ET_0 به‌کار رفت. نتایج نشان داد که در هریک از سه ایستگاه، همه متغیرهای هواشناسی دو به دو در سطح پنج درصد معنی‌دار (یا کم‌تر) بودند. در این مطالعه، ابتدا PCA بدون چرخش محورها انجام گرفت. سپس با استفاده از چرخش محورها عامل‌های اصلی با روش وریماکس ضرایب عامل‌ها برای هر متغیر هواشناسی به‌دست آمد. در هر ایستگاه، تعداد دو عامل اصلی که تقریباً در همه ایستگاه‌ها دارای مقدار ویژه بیش از یک بودند، انتخاب شد. این دو عامل در هر سه ایستگاه بیش از ۸۰ درصد واریانس کل متغیرها را توجیه می‌کرد. به‌طور اخص، مقدار واریانس توجیه‌شده با دو عامل اول در ایستگاه خرمدره ۸۳/۴۹، در قیدار ۸۶/۱۴ و در آبر ۸۴/۹۰ درصد واریانس را توجیه می‌کرد. پس از چرخش محورها با روش وریماکس ضرایب عامل‌های اصلی منتخب در مورد هر متغیر هواشناسی به‌دست آمد. در حالت کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که روش FA ابعاد داده‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده است. از محدودیت‌های این مطالعه باید به کم‌بودن طول دوره آماری ایستگاه‌ها اشاره نمود. در منطقه تعداد ایستگاه با داده کافی اندک است. محدودیت دیگر، مربوط به انتخاب متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ET_0 است. در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران (به‌ویژه در شهرهای کوچک) متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ET_0 یا اندازه‌گیری نشده‌اند، یا طول دوره آماری کم دارند. مثلاً، میزان انرژی تابشی خورشیدی رسیده به سطح زمین (تشنعش آفتاب) در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها در مقیاس روزانه یا اندازه‌گیری نشده و یا اگر اندازه‌گیری شده، در دسترس پژوهندگان قرار نگرفت. از مزیت‌های این مطالعه، می‌توان به درک عمیق ارتباط متغیرهای هواشناسی با یکدیگر از یک سو و با ET_0 از سوی دیگر در ایستگاه‌های منتخب اشاره کرد. انجام چنین مطالعه‌ای در دیگر استان‌های کشور با اقلیم‌های مختلف ایران توصیه می‌شود. انتظار می‌رود، نتایج این مطالعه در مدیریت بهینه آب قابل دسترس به‌ویژه در بخش کشاورزی مفید واقع شود.

لزوم توجه به حفاظت آب‌ها در استان زنجان و سایر نقاط ایران بسیار مهم است. خطر آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی موجب کاهش آب سالم در دسترس می‌گردد. از سوی دیگر، افزایش جمعیت شهرها با توجه به نرخ رشد جمعیت و مهاجرت از روستاها به شهرها و گسترش کارخانجات صنعتی منجر به اعمال فشار بیش‌تر بر منابع آب شیرین می‌گردد. افزایش دمای هوا نیز موجب افزایش نیاز گیاهان و جانداران به آب می‌شود. بنابراین، جای خالی گروهی که بتواند به‌طور مؤثر از منابع آب حوضه‌ها محافظت می‌کند، احساس می‌شود. پیشنهاد می‌شود، گروه "پلیس حفاظت از منابع آب" در حوضه‌های آبخیز سازماندهی و سریع شروع به کار کنند. افزون بر این، کنترل مصرف آب (به‌ویژه در بخش

کشاورزی) ضرورت دارد. مصرف بیش از نیاز آب در کشاورزی از یک سو و کشت محصولات آبر از سوی دیگر، بهره‌برداری پایدار از منابع آب منطقه را تهدید نموده و نسل‌های آتی را در تأمین آب مورد نیاز آن‌ها با مشکل مواجه می‌کند. در این زمینه، برنامه‌ریزی برای تغییر تدریجی سامانه‌های آبیاری از روش‌های سنتی (مانند غرقابی، کرتی، نواری و فارویی) به روش‌های مدرن (مانند انواع روش‌های بارانی، قطره‌ای و زیرسطحی) و پوشش نهرها پیشنهاد می‌شود. با توجه به کاهش بارندگی در مناطق مختلف کشور (Dinpashoh et al., 2014) و فشار مضاعف بر آبخوان‌ها (Daneshvar Vousoughi et al., 2013) جهت استفاده هرچه بیش‌تر از آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (به‌ویژه از سوی کشاورزان و باغداران) به‌نظر می‌رسد، مردم و دولت فعالیت‌های کشاورزی خود را باید با آب موجود و قابل تجدید منطقه هماهنگ کنند. بهتر است، کشاورزان، بهره‌برداران و سازمان‌های مختلف دولتی چشم‌داشت به منابع آب حوضه‌های همجوار نداشته باشند. تا جامعه از خطر ایجاد تنش‌های اجتماعی بر سر مساله آب مصون بماند. در کل، کشاورز، مردم و دولت باید با شرایطی که طبیعت منطقه برای آن‌ها مقدر کرده، سازش کنند. در این زمینه، به‌نظر می‌رسد، فعالیت‌های وسیع فرهنگی و ترویجی (مانند بیان ارزش آب به دانش‌آموزان، بیان حقایق مرتبط با موجودیت آب هر منطقه به بهره‌برداران، زارعین و عموم مردم) مفید می‌باشد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Principle Component Analysis
2. Factor Analysis
3. Spearman
4. Mann- Kendall
5. Multicollinearity
6. Thar Desert

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Akbari, E., Nadiri, A., & Sadghi Aghdam, F. (2022). Hydro-chemical characteristics investigation of Khoy plain aquifer and determination of probable anomalies sources. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 857-883. (In Persian with English Abstract)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Reas, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage, 56300 p.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., & Pereira, L. S. (1994). *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin, 43(2), 1-34.
- Belkheiri, L., & Narany, T.S. (2015). Using multivariate statistical analysis, geostatistical techniques and structural equation modeling to identify spatial variability of groundwater quality. *Water Resources Management*, 29, 2073-2089.
- Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., Aalami, M.T., & Jhajharia, D. (2013). Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). *Stoch Environ Res Risk Assess*, 27, 547-559. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0599-4>
- Dimitriadou, S., & Nikolakopoulos, K. G. (2022). Evapotranspiration trends and interactions in light of the anthropogenic footprint and the climate crisis: A review. *Hydrology*, 8, 163.
- Dinpashoh, Y., & Babamiri, O. (2020). Trends in reference crop evapotranspiration in Urmia Lake basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 372.

- Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Moghaddam, M., Jahanbakhsh, S., & Mirnia, M. (2004). Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. *Journal of Hydrology*, 297(1), 109-123.
- Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh-Asl, S., & Azadeh Garebagh, A. (2024). Study of relative effectiveness of climatic factors on reference crop potential evapotranspiration in the Southern fringe of Caspian Sea. *Journal of Geography and Planning*, In Press. (In Persian with English Abstract).
- Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh-Asl, S., Rasouli, A.A., Foroughi, M., & Singh, V.P. (2019). Impact of climate change on potential evapotranspiration (case study: west and NW of Iran). *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 185-201.
- Dinpashoh, Y., Mirabbasi, R., Jhajharia, D., Zare Abianeh, H., Mostafaeipour, A., (2014) Effect of short-term and long-term persistence on identification of temporal trends. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 617-625.
- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, 399(3), 422-433.
- Fooladmand, H., & Haghighat, M. (2007). Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ET_0 based on Penman-Monteith method. *Irrigation and Drainage*, 56, 439-449.
- Ghorbani-Aghdam, M., Dinpashoh, Y., & Mostafaeipour, A. (2013). Application of factor analysis in defining drought prone areas in Lake Urmia Basin. *Natural Hazards*, 69, 267-277.
- Hashemi, M., & Misaghi, F. (2015). Evaluation of evapotranspiration changes due to climate change in Zanzan province. *National conference on new ideas in agriculture, Environment, Tourism*. 20 December 2015, Held in Ardabil, Iran. (In Persian with English Abstract).
- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V.P., & Fakheri-Fard, A. (2012). Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes*, 26(3), 421-435.
- Jhajharia, D., Kumar, R., Dabral, P. P., Singh, V. P., Choudhary, R. R., & Dinpashoh, Y. (2015). Reference evapotranspiration under changing climate over the Thar Desert in India. *Meteorological Applications*, 22(3), 425-435.
- Karl, T. R., Koscielny, A. J., & Diaz, H. F. (1982). Potential errors in the application of principal component (eigen vector) analysis to geophysical data. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 1183-1186.
- Koklu, R., Sengorur, B., & Topal, B. (2010). Water Quality Assessment Using Multivariate Statistical Methods—A Case Study: Melen River System (Turkey). *Water Resources Management*, 24, 959-978.
- Liu, C.W., Lin, K.H., & Kuo, Y.M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 313, 77-89.
- Manly, B. F. J. (1994). *Multivariate Statistical Methods, A primer*. Second edition. Chapman and Hall, (PP. 215).
- Matalas, N. C., & Reihel, B. J. (1967). Some comments on the use of factor analysis. *Water Resources Research*, 13(1), 213-223.
- Meyer, S. J., Hubbard, K. G., & Wilhite, D. A. (1991). The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields: A principal components analysis. *Agricultural Forest Meteorology*, 55 (1), 59-84.
- Miesch, A. T. (1980). Scaling variables and interpretation of eigenvalues in principal component analysis of geologic data. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 12, 523-538.
- Mirhosseini, S. M., Ghasemieh, H., & 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 with English Abstract).
- Mohan, S., & Arumugam, N. (1996). Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: Factor analysis approach. *Water Resources Management*, 10, 1-20.
- Murthy, H. G. S., Nagabhushanam, T. D. J., & Hiremath, K. C. (1990). Performance of the MARKFED, Karnataka-Factor analysis approach. *Indian Journal of Agricultural Economy*, 45(4), 477-485.
- Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20.
- Popova, Z., Kercheva, M., & Seprero, L. (2006). Validation of the FAO methodology for computing ET_0 with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage*, 55, 201-215.
- Raghavendra Prasad, K., Bhimala, K. R., Patra, G. K., Himesh, S., & Goroshi, S. (2023). Annual and seasonal trends in actual evapotranspiration over different meteorological sub-divisions in India using satellite-based data. *Theoretical Applied Climatology*, 152, 999-1017.

- Rencher, A. C. (1995). *Methods of Multivariate Analysis*. John Wiley and Sons INC, (pp: 627).
- Ruiz, F., Gomis, V., & Blasco, P. (1990). Application of factor analysis to the hydro-chemical study of a coastal aquifer. *Journal of Hydrology*, 119, 169-177.
- Sadeghi, H., Mohammadi, H., Shamsipour, A. A., & Karimi, M. (2023). Climatic zoning of the southern coastline of the Caspian Sea using multivariate statistical methods. *Geography and Environmental Planning*, 34(2), 55-74. (In Persian with English Abstract).
- Seyhan, E. (1994). *Introduction to Multi-variate Statistical Analysis in Hydrology*. Free University, Inst. Earth Sciences, Amsterdam, Vrije Universiteit, 4th Edition.
- Shadmani, M., Marofi, S., & Roknian, M. (2012). Trend analysis in reference evapotranspiration using Mann-Kendall and Spearman's Rho tests in arid regions of Iran. *Water Resources Management*, 26, 211-224. (In Persian with English Abstract).
- Shirzad, M., Feyzi, H., & 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. (In Persian with English Abstract).
- Valipour, M. (2015). Temperature analysis of reference evapotranspiration models. *Meteorological Applications*, 22, 385-394.
- Varga-Haszonits, Z., Szalka, E., & 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.
- Wallis, J. R. (1968). Factor analysis in hydrology: An agnostic view. *Water Resources Research*, 4(3), 521-527.
- Xu, S., Yu, Z., Yang, C., Ji, X., & Zhang, K. (2018). Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 118-129.