

Original Research Article

Decadal variation of evaporation with respect to the variability of some climatic elements in the Zayandeh_Roud basin

Narges Hesami^{1*}, Hossein Asakereh², Kohzad Raispour³

¹ PhD student of climatology, Zanjan University, Zanjan, Iran

² professor of climatology, Zanjan University, Zanjan, Iran

³ assistant professor, Zanjan University, Zanjan, Iran

 10.22034/GRD.2023.18986.1549

Received:
September 21, 2022
Accepted:
February 12, 2023

Keywords:
Climatechange,
Zayandeh_Roud basin,
Multivariate regression,
Evaporation process,
Variation

Abstract

Evaporation is a vital process by which moisture is transferred from the earth's surface and other sources to the atmosphere. The accurate assessment and comprehension of evaporation are crucial in calculating water balance and managing water resources effectively. The understanding of various climatic factors that influence the evaporation process, such as radiation, air temperature, wind speed and relative humidity, is essential. The variability of evaporation on different timescales, particularly during global warming, highlights one of the significant manifestations of climate change. In this regard, examining decadal changes in evaporation and the parameters affecting it plays a vital role in medium-term planning and water resource management. The present study aimed to analyze the decadal changes in evaporation concerning effective parameters, specifically temperature, dryness and wind. To achieve this objective, the daily databases of evaporation, temperature, relative humidity and wind were utilized. They were obtained from an interpolation of synoptic, climatology, meteorology, and rain gauge stations supervised by the Ministry of Energy from 1969 through 2018. The corresponding spatial resolution was 4×4 km. The findings of the study demonstrated that temperature plays a more critical and effective role in the evaporation process than the other parameters. However, the share of this parameter decreased from the first decade (1969–1978) to the last decades. Humidity has the second most significant impact on the evaporation process among the atmospheric elements. Conversely, the role of temperature increased from the earlier decades to the last decade (2009–2018). Similarly, in the case of wind, its role increased from the first decade (1969–1978) to the last decade (2009–2018). In conclusion, this study underscores the importance of understanding the parameters that affect evaporation rates, especially with respect to climate change. By analyzing the decadal changes in evaporation and the influencing parameters, water resource managers can better conduct medium-term planning to ensure the efficient and sustainable management of water resources.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* **Corresponding Author:** Narges Hesami
Address: Zanjan University, Iran

Email: N_hesami12@yahoo.com

Extended Abstract

1. Introduction

Evaporation is the process of transferring moisture from water bodies and the earth's surface into the atmosphere. Identifying and assessing evaporation is a crucial step in calculating the water budget, which can aid water resources management. From a climatic perspective, several factors influence the evaporation process, including radiation, air temperature, wind speed, and relative humidity of the atmosphere. The variability of evaporation on different time scales, particularly in the context of global warming trends, is a significant manifestation of climate change. Identifying the decadal changes in evaporation and the associated effective parameters is essential for the medium-term planning and management of water resources. Therefore, the main objective of this study is to analyze the decadal changes in evaporation with respect to influential parameters such as temperature, humidity and wind.

2. Data and methods

To achieve our objectives, we used graded daily databases containing relevant parameters such as evaporation, temperature, relative humidity, and wind speed. These databases had a spatial resolution of 4×4 km and were extracted from synoptic, climatology, and rain gauge data interpolation stations from 1969 to 2018.

To analyze changes in the studied variables, we calculated the spatial average of daily spatial distribution for each variable across the entire period as well as for each of the five successive decades studied. Additionally, we conducted multivariate standard regression to track the role of each of the three studied climatic parameters (humidity, wind, and temperature) in the decadal changes of evaporation. Each variable was standardized in terms of its mean and standard deviation using the following formula.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j}{s_j}$$

Finally, to justify the spatial variation of evaporation, we used the following regression model for K , the independent variable.

$$E_i = \sum_{i=1}^k b_i z_i + e_i$$

3. Results and discussion

The present research has revealed that, in the Zayandeh-Rood catchment, there is a northward decrease in temperature and annual evapotranspiration as a result of the negative correlation between latitude and these parameters. Conversely, as altitude descends from the northwest to the southeast of the river basin, climatic elements such as heat and evaporation increase, while the other elements such as humidity and precipitation decrease. This transition signifies a shift from a cold and humid climate in the northwest to a hot and dry climate in the southeast.

The mountainous regions in the northwest experience the lowest average temperatures, which increase towards the southeast. Consequently, the areas with lower temperatures are associated with less evaporation, and higher evaporation rates are observed in regions with higher temperatures. This fact is reflected in the strong positive correlation (0.9) between temperature and evaporation. On the other hand, a significant negative correlation coefficient (0.79) was observed between evaporation and relative humidity, with the highest relative humidity in the northwest of the study area. It was found decreasing towards the southeast.

The correlation between wind speed and evaporation was found to be lower than the other correlations. Wind speeds are lower in the western half of the study area and increase towards the eastern half of the basin.

The results suggest that, compared to the other parameters, temperature has a more significant impact on the evaporation process (with a correlation coefficient of 0.9). However, the proportion of its effect decreased from the first decade (1978-1969) to the last decade. Humidity ranked second among the atmospheric parameters in terms of its influence on the evaporation process (with a correlation coefficient of 0.79). The role of temperature increased from the early decades to the final decade (2019-2009), while the same trend was observed for wind, which played an increasingly important role in the evaporation process from the first decade (1978-1969) to the last decade (2018-2019).

4. Conclusion

In this study, multivariate regression was done to analyze the correlation between three atmospheric parameters (namely temperature, humidity and wind speed) and evaporation from 1969 to 2018. The primary objective was to identify the most significant parameter that affects evaporation in the study area. Subsequently, we discussed the changes in the relationship between these variables and evaporation in the studied decades.

Based on the general characteristics of the basin, the temperature and wind were higher in its southern parts than in the northern areas. Also, the rate of evaporation was lower in the northern half and higher in the southern half. On the other hand, there was more moisture in the northern parts of the study area than in the southern regions.

The research results indicated that temperature is the most influential parameter concerning evaporation, with a statistically significant correlation at a 95% confidence level throughout the basin. However, it was found that the role of temperature declined from the first decade to the last decade, while humidity and wind became increasingly important factors to affect evaporation.

مقاله پژوهشی

وردایی دهه‌ای تبخیر در ارتباط با تغییرپذیری برخی عناصر اقلیمی در حوضه زاینده‌رود

نرگس حسامی^{۱*}، حسین عساکره^۲، کوهزاد رئیس پور^۳

^۱ دانشجوی دکتری تغییرات آب و هوایی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
^۲ استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۳ استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

doi 10.22034/GRD.2023.18986.1549

چکیده

تبخیر فرایند انتقال رطوبت از سطح زمین- منابع رطوبتی به جو است. شناخت و ارزیابی تبخیر، یک بخش مهم در محاسبه بیلان آب و مدیریت صحیح منابع آب است. از منظر اقلیمی، عوامل متعددی در فرایند تبخیر دخالت دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تابش و دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی اشاره کرد. تغییرپذیری تبخیر در مقیاس‌های زمانی مختلف به‌ویژه طی فرایند و روند گرمایش زمین، از جمله مظاهر درخور توجه تغییرات اقلیمی است. بررسی تغییرات دهه‌ای تبخیر و فراسنج‌های مؤثر بر آن، نقش مؤثری در برنامه‌ریزی میان‌مدت و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. هدف از پژوهش حاضر واکاوی تغییرات دهه‌ای تبخیر در ارتباط با فراسنج‌های مؤثر (دما، خشکی و حرکت هوا) بر این فراسنج است. بدین منظور از پایگاه داده‌های روزانه تبخیر، دما، رطوبت نسبی و باد، حاصل میان‌یابی ایستگاه‌های هم‌مدید، اقلیم‌شناسی هواشناسی و باران‌سنجی وزارت نیرو طی بازه زمانی ۱۸-۲۰۱۸ تا ۱۹۶۹ با تفکیک مکانی ۴ × ۴ کیلومتر استفاده شد. نتایج نشان داد فراسنج دما نسبت به سایر فراسنج‌ها نقش مهم‌تر و مؤثرتری بر فرایند تبخیر دارد، ولی میزان سهم این فراسنج از دهه اول (۱۹۷۸-۱۹۶۹) به سمت دهه‌های انتهایی رو به کاهش است. رطوبت از میان عناصر جوی جایگاه دوم را به لحاظ تأثیر بر فرایند تبخیر دارد که بالعکس دما نقش آن از دهه‌های ابتدایی به سمت دهه انتهایی (۲۰۱۸-۲۰۰۹) رو به افزایش است. همین روند در مورد فرایند باد نیز تکرار شده و نقش آن از دهه اول (۱۹۷۸-۱۹۶۹) به سمت دهه انتهایی (۲۰۱۸-۲۰۰۹) رو به افزایش است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۲۳

کلیدواژه‌ها:

تغییر اقلیم، حوضه زاینده‌رود، رگرسیون چندمتغیره، فرایند تبخیر، وردایی



۱ مقدمه

در گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۱، بر تغییرات آب و هوایی تاکید گردیده است. تغییر اقلیم به تغییرات معنی‌دار آماری در میانگین‌های اقلیمی یا تغییرپذیری آن برای دوره‌های طولانی‌مدت، اشاره دارد که این تغییرات به علت رخداد فرایندهای طبیعی یا تداوم تغییرات ناشی از فعالیت‌های بشر در ترکیب‌های جوی و یا تغییر کاربری زمین است. این هیئت افزایش دمای کره زمین را ۰/۲ درجه سلسیوس در هر دهه گزارش کرده است (IPCC، ۲۰۰۷). شرایط اقلیمی گرم‌تر باعث تغییر رفتار عناصر مختلف اقلیمی و به‌ویژه تبخیر می‌شود. تبخیر و تعرق یکی از پیوندگاه‌های سه جزء مهم زیست‌کره، آب‌کره و هواکره به شمار می‌آید (زو^۲ و همکاران، ۲۰۰۶؛ ۸۲) و بعد از بارش، اصلی‌ترین جزء چرخه آب‌شناختی است که مقدار هدررفت آب را به‌صورت کمی بیان می‌کند (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱). از این منظر تبخیر از اجزای اصلی مؤثر بر رواناب است که از مولفه‌های اقلیمی مهم همچون دما، باد، رطوبت و... بسیار متأثر بوده است. نقش هر یک از این عوامل بر روی تبخیر و تعرق با توجه به فصل سال و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه متغیر است (علی‌جانی، ۱۳۹۰؛ دهقانی‌سنج و همکاران؛ ۲۰۰۴، موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۹؛ علیزاده، ۱۳۹۰). از آن‌جا که میزان تبخیر و تعرق مستقیماً با تغییرهای اقلیمی در ارتباط است، انتظار می‌رود با تغییر در فراسنج‌های اقلیمی، به‌ویژه دمای هوا، میزان آن نیز تغییر پیدا کند (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱؛ هوئرو و لی هوئرو^۳، ۱۹۹۳: ۹۶). واضح است که این مؤلفه‌ها تحت تأثیر تحولات اقلیمی، واکنش‌های مختلفی را از خود بروز می‌دهند.

در میان متغیرهای جوی اقلیم (در مقایسه با متغیرهایی نظیر دما و بارش)، تحقیقات اندکی در زمینه بررسی و واکاوی فراسنج تبخیر صورت گرفته است. در این زمینه استساوانو^۴ و همکاران (۲۰۰۷)، به ارزیابی تبخیر و تعرق در مناطق جنگلی حوضه مکنونگ پرداختند. نتایج نشان داد سهم جنگل‌ها در قسمت جنوبی حوضه یکی از مولفه‌های غالب تبخیر و تعرق کل حوضه است. مسکیتا^۵ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی تبخیر و تعرق در دریاچه‌ای در برزیل پرداختند. نتایج نشان داد شرایط اقلیمی و کیفیت آب بر تبخیر و تعرق تأثیر مستقیم دارد. سالاریان و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش‌های تشعشعی - فائو ۲۴، بلانی - کریدل^۶، هارگریوز^۷ - سامانی^۷، پریستلی^۸، تیلور^۸، مکینگ^۹، تورک^{۱۰} و فائو پنمن - مانیتث به محاسبه تبخیر و تعرق در شهرستان اصفهان پرداختند. نتایج نشان داد اکثر این معادلات برای فصل سرد سال کاربرد داشته است.

گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی و شبیه‌سازی تبخیر با استفاده از مدل‌های آماری LARS-WG و SDSM در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد میزان تبخیر و تعرق محاسبه شده در تمامی ماه‌ها و تمامی فصول و در دوره‌های آبی تحت‌تأثیر دما افزایش خواهد یافت. قره‌لو و قاسمی‌فر (۱۳۹۸)، به تغییرپذیری فضایی تبخیر و تعرق در ارتباط با دماهای حدی در ایران پرداختند. نتایج نشان داد دو عامل دمای هوا و رطوبت خاک تعیین‌کننده اصلی ارتباط این پارامترها هستند.

برارخان‌پور و همکاران (۱۴۰۰)، به بررسی روند تغییرات تبخیر با استفاده از روش‌های رگرسیون چندک و رگرسیون چندک بیزی پرداختند. نتایج بررسی عوامل مؤثر بر تبخیر نشان داد که در تمام مقیاس‌های زمانی، بیش‌تری مؤلفه مؤثر بر تبخیر به ترتیب دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بوده است. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به لیانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)، ماتیگا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۰)، یوتینگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۲)، پائول^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۳)، گو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۴)، نورانی^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۰)، ایتو و مومی^{۱۷} (۲۰۲۱)، گو^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۱)، رودریگز^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۱)، تیان^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۱)، کوچک‌زاده و نیکبخت (۱۳۸۳)، علیزاده و همکاران (۱۳۸۹)، ثنائی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰)، بابائیان و کوهی (۱۳۹۱)، کوهی و همکاران (۱۳۹۵)، خسرویان و همکاران (۱۳۹۹)، اسدی و کرمی (۱۳۹۹) اشاره کرد. با نظر به مطالعات قبلی مشخص می‌شود کمتر به بررسی تأثیر فراسنج‌های مهم بر تبخیر در سطح حوضه پرداخته شده و بیشتر به روش‌های مؤثر برآورد این پارامتر و شبیه‌سازی آن در آینده پرداخته شده است. مطالعات کمی نیز در این زمینه در سطح حوضه انجام گرفته است.

در بسیاری از پژوهش‌ها اصول و روش‌های آماری به‌عنوان روش‌شناسی پذیرفته شده برای واکاوی بسیاری از مسائل پیچیده تصمیم‌گیری به‌شمار می‌آیند. یکی از روش‌های آماری، روش رگرسیون خطی چندمتغیره است. هدف این روش در شکل کلی آن پیدا کردن ارتباط بین متغیر وابسته و متغیر مستقل است (جعفری و دین‌پژوه، ۱۳۹۶: ۸۴). در بسیاری از پژوهش‌های اقلیمی معادلات

¹¹ Liang

¹² Mutiga

¹³ Yuting

¹⁴ Paul

¹⁵ Guo

¹⁶ Nourani

¹⁷ Ito and Momii

¹⁸ Guo

¹⁹ Rodrigues

²⁰ Tian

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Xu

³ Houerou and Le Houerou

⁴ Sawano

⁵ Mesquita

⁶ Blaney- Criddle

⁷ Hargreaves-Samani

⁸ Priestly-Taylor

⁹ Makkink

¹⁰ Torak

رگسیون برای تلخیص یا توصیف مجموعه‌ای از داده‌ها و در مواردی، برای شناخت موثرترین فراسنج (از میان تعداد زیادی عنصر و عوامل اقلیمی) بر یک پدیده استفاده می‌شود (عساکره، ۱۳۹۰: ۲۱۸).

لی^۱ و همکاران (۲۰۱۰)، در تحقیقی در شمال چین دقت داده‌های تشت تبخیر - روش پنمن - مانیت و فراسنج‌های مؤثر بر تبخیر - تعرق (دمای متوسط، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی) را براساس رگسیون چندمتغیره واسنجی، ارزیابی و پیش‌بینی کردند. آلمدیج^۲ (۲۰۱۲)، با استفاده از مدل رگسیون خطی تبخیر روزانه و ماهانه در کویت را پیش‌بینی کردند. مالیک^۳ و همکاران (۲۰۱۳)، برای برآورد تبخیر از روش‌های شبکه‌عصبی مصنوعی و رگسیون چندمتغیره خطی استفاده کردند. لدنی^۴ و همکاران (۲۰۱۵)، تبخیر- تعرق روزانه در منطقه مدیترانه‌ای کشور الجزایر را توسط روش‌های سیستم فازی و رگسیون چندمتغیره خطی مدل‌سازی کردند. سیفی و همکاران (۱۳۸۹)، با استفاده از مدل ترکیبی رگسیون چندگانه-تحلیل مولفه‌ها و عامل‌های اصلی به بررسی و پیش‌بینی تبخیر- تعرق در ایستگاه کرمان پرداختند.

عرب سلغار و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی روند با استفاده از روش کم‌ترین مربعات خطا و پیش‌بینی تبخیر- تعرق با استفاده از رگسیون چندمتغیره در شماری از ایستگاه‌های مناطق نیمه‌خشک پرداختند. کرمپور و همکاران (۱۳۹۴)، در بررسی رابطه عناصر اقلیمی (دما، بارش، رطوبت، تبخیر، باد، ساعت آفتابی) با پوشش گیاهی استان هرمزگان با استفاده از رگسیون چندگانه پرداختند. قاسمی و همکاران (۱۳۹۸)، تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه‌های تبریز و اردبیل را با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی و رگسیون چندگانه برآورد کردند. از دیگر محققانی که در این زمینه به مطالعه پرداختند می‌توان به کیسی^۵ (۲۰۰۹)، شیرگور^۶ (۲۰۱۱)، شیرگور و راجپوت^۷ (۲۰۱۲)، مالیک و کومار^۸ (۲۰۱۵)، عدنان^۹ و همکاران (۲۰۲۰)، پندا^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲)، قره‌خانی و قهرمان (۱۳۸۹)، حسینی و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. یکی از راهکارهای مقابله با بحران آب، استفاده مناسب و مدیریت بهینه منابع آب است. لازمه مدیریت بهینه منابع آب تعیین دقیق مؤلفه‌های بیلان آب در هر منطقه است. تبخیر یکی از مولفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین یکی از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی صحیح، متناسب و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در هر منطقه می‌باشد (گرنگر^{۱۱}، ۱۹۹۹: ۷۱). از طرف دیگر تبخیر نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا کرده است. عمده‌ترین عامل مصرف منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبخیر است که عمدتاً تحت تأثیر شرایط جوی این مناطق می‌باشد. بخش عمده حوضه زاینده‌رود در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. طی دهه‌های اخیر حوضه زاینده‌رود با خشکسالی و کاهش سطح آب روبرو بوده است، از این رو آگاهی از وردایی دهه‌ای تبخیر در ارتباط با فراسنج‌های اقلیمی مؤثر بر آن (دما، رطوبت نسبی و سرعت باد)، نقش مؤثری را در شناخت سازوکار و الگوهای زمانی - مکانی تبخیر و به تبع آن برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب در این حوضه ایفا می‌کند. هر تغییری در فراسنج‌های اقلیمی ذکر شده بر میزان تبخیر تأثیر خواهد گذاشت. بدین منظور پژوهش حاضر تلاش دارد تغییرات این فراسنج را در حوضه زاینده رود و در ارتباط با سایر فراسنج‌های اقلیمی برای پنج دهه اخیر (۱۹۷۸-۱۹۶۹، ۱۹۸۸-۱۹۷۹، ۱۹۹۸-۱۹۸۹، ۲۰۰۸-۱۹۹۹، ۲۰۱۸-۲۰۰۹) مورد بررسی و واکاوی قرار دهد.

۲ معرفی منطقه مورد مطالعه

زنده رود بزرگ‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران است که از ارتفاعات زاگرس و کوه‌های مرتفع زردکوه بختیاری سرچشمه می‌گیرد و به تدریج که وارد جلگه اصفهان می‌گردد، از شیب آن کاسته و پس از مشروب نمودن اراضی مستعد و دشت‌های کشاورزی از شهرهای اژیه و ورزنه عبور نموده و وارد تالاب گاوخونی می‌گردد.

مساحت حوضه زاینده‌رود برابر با ۴۱۵۵۰ کیلومتر مربع است. مناطق کوهستانی و نیمه کوهستانی این حوضه در شمال‌غرب، غرب و بخش کوچکی از شمال‌شرق قرار دارد. سراب رودخانه زاینده‌رود در شمال‌غرب این حوضه قرار دارد. ناحیه خشک و نیمه‌خشک شرقی حوضه زاینده‌رود به صورت قوسی شمال، جنوب، شرق و جنوب‌شرقی حوضه آبیاری زاینده‌رود را در شهرستان اصفهان احاطه کرده است (شکل ۱، الف) و از وسیع‌ترین، خشک‌ترین و کم‌جمعیت‌ترین نواحی حوضه زاینده‌رود بوده، بین کوه‌های مرکزی ایران، پایکوه‌های شرق زاگرس در جنوب اصفهان و حوضه داخلی چاله اصفهان - سیرجان به حساب می‌آید. ناحیه‌ای که نیمی از آن را شیب کوه‌های مرکزی و نیمی دیگر را اراضی فرورفته چاله گاوخونی و حواشی آن‌ها تشکیل می‌دهد و شامل اراضی رسوبی و پایکوه‌های خشک بدون آب جاری طبیعی است. عوامل مؤثر در ایجاد نواحی خشک و بیابانی را می‌توان به دو عامل مهم تقسیم کرد: عامل اقلیمی که به علت نبودن بارش کافی، دمای بالا و تبخیر زیاد ایجاد می‌شود. عامل دیگر ساختار اشکال ناهمواری و فرایندهای زمین‌شناختی است که سبب ایجاد یا تشدید نواحی بیابانی می‌گردد (قائمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۴۷).

⁷ Shirgure and Rajput

⁸ Malik and Kumar

⁹ Adnan

¹⁰ Panda

¹¹ Granger

¹ Li

² Almedeij

³ Malik

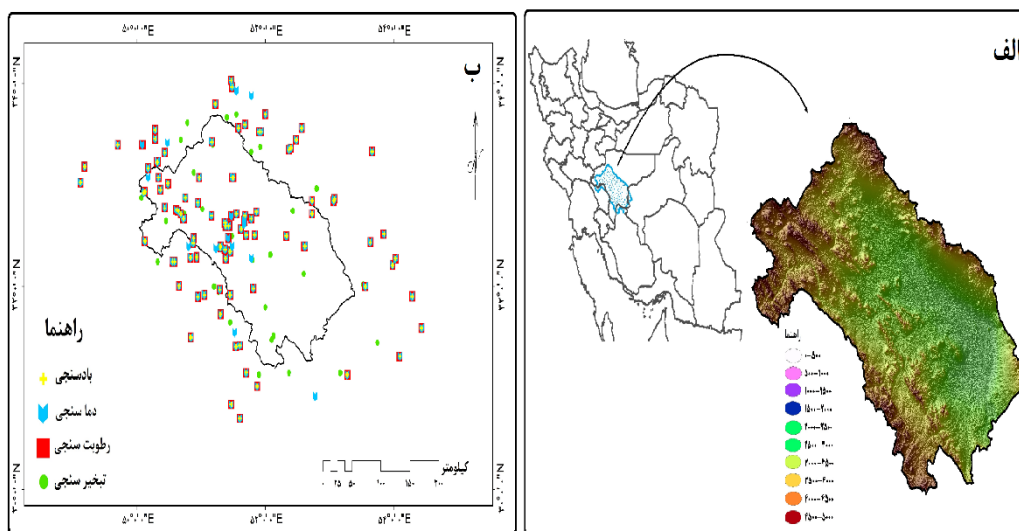
⁴ Ladlani

⁵ Kisi

⁶ Shirgure

۳ روش تحقیق

به منظور بررسی رفتار دهه‌ای تبخیر در ارتباط با عناصر اقلیمی منتخب، اندازه‌گیری‌های تبخیر و عناصر اقلیمی مرتبط انتخاب شد. داده‌های روزانه تبخیر ۷۴ ایستگاه (ایستگاه‌های همدید و وزارت نیرو) به کار گرفته شد. عناصر اقلیمی مرتبط با تبخیر شامل تابش-دما، رطوبت و سرعت باد است (کاویانی و علیجانی، ۱۳۹۰). از آن‌جا که مشاهدات و پوشش زمانی-مکانی مناسب از تابش در دست نبود و نیز به دلیل آن که دما می‌تواند انعکاس مناسبی از تابش باشد، تنها سه عنصر دما، رطوبت و سرعت وزش باد برای بررسی نقش عناصر اقلیمی در تبخیر استفاده شد. بدین ترتیب میانگین روزانه دما، رطوبت و باد در حوضه زاینده‌رود به ترتیب از ۹۷، ۹۴ و ۹۴ ایستگاه (شامل ایستگاه‌های همدید، اقلیم‌شناسی و وزارت نیرو) برای بازه زمانی ۲۰۱۸ - ۱۹۶۹ (۵۰ سال) گردآوری شده است (شکل ۱). در مجموع ۳۷۵ ایستگاه برای پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است که ۱۷۰ ایستگاه در داخل و ۲۰۵ ایستگاه در خارج از حوضه قرار دارد. به منظور انجام عملیات درون‌یابی (میان‌یابی) و به‌ویژه به دلیل کمبود ایستگاه در داخل حوضه زاینده‌رود، در سال‌های ابتدایی دوره آماری مورد مطالعه، نیاز به استفاده از ایستگاه‌های خارج از محدوده ضروری بوده است. ضمن این که برای انجام عملیات درون‌یابی و تشکیل ماتریس داده‌ها نیاز به استفاده از ایستگاه‌های خارج برای پوشش کل حوضه لازم بود.



شکل ۱ - موقعیت و مشخصات ارتفاعی حوضه زاینده‌رود (الف) و ایستگاه‌های مورد مطالعه (ب)

برای انجام پژوهش حاضر در ابتدا برای تشخیص ناهمگنی‌ها از آزمون همگنی الکساندرسون استفاده شد. ضمن این که معنی‌داری همگنی‌ها براساس این روش استاندارد محاسبه شد و نواحی فاقد همگنی تخمین زده شد، این نواحی بر روی نقشه‌ها ردیابی گردید تا همگنی و ناهمگنی به لحاظ دیداری نیز تأیید شود. آزمون الکساندرسون آزمون با کارایی بالاست که می‌تواند به دو صورت مطلق و نسبی استفاده شود (الکساندرسون^۱ ۱۹۸۶؛ الکساندرسون و موبرگ^۲ ۱۹۹۷؛ پندیک و لیکسو^۳ ۲۰۱۰؛ ویسنته سرانو^۴ و همکاران

۲۰۱۰؛ مارتینز^۵ و همکاران ۲۰۱۰؛ ساهین و سیزیک اوقلو^۶ ۲۰۱۰). سپس با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ، به‌عنوان روشی

بهینه برای میان‌یابی مشاهدات (عساکره، ۱۳۸۷: ۲۵)، داده‌های نقطه‌ای و ایستگاهی به داده‌های شبکه‌ای تبدیل شد. داده‌های شبکه‌ای به‌منظور یکسان نمودن طول دوره آماری مشاهدات در پهنه مورد مطالعه و یکنواخت کردن پراکندگی ایستگاه‌ها در طول دوره مورد مطالعه به کار گرفته می‌شود. در روش میان‌یابی کریجینگ برای هر یک از ایستگاه‌های درون و بیرون یک پهنه برحسب فاصله و موقعیت آن وزن آماری مشخصی در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که پراش تخمین کمینه شود (عساکره، ۱۳۸۷: ۲۷). حاصل فرایند میان‌یابی مشاهدات روزانه در پهنه مورد مطالعه، ماتریسی به ابعاد 18262×2591 (سطرها شمار یاخته‌ها و ستون‌ها شمار روزهای فراسنج‌های اقلیمی را شکل می‌دهند) به دست آمد که حوضه زاینده‌رود با توان تفکیک مکانی 4×4 کیلومتر نشان می‌دهد.

به‌منظور واری و ردایی متغیرهای مورد مطالعه، توزیع مکانی میانگین روزانه هریک از متغیرها برای کل دوره و نیز برای پنج دهه مورد مطالعه برآورد و تحلیل شد. علاوه بر این به منظور ردیابی تغییر نقش و اهمیت هریک از فراسنج‌های سه‌گانه اقلیمی مورد مطالعه

⁴ Vicente-serrano

⁵ Martínez

⁶ Sahin and Cizigoglu

¹ Alexandersson

² Alexandersson and Moberg

³ Pandzic and Likso

(رطوبت، باد و دما) بر وردایی دهه‌ای تبخیر، از رگرسیون استاندارد چندمتغیره استفاده شد. هدف از مدل‌سازی رگرسیون در مطالعه حاضر ردیابی تأثیر هریک از فراسنجهای سه‌گانه اقلیمی بر تبخیر و تغییرات دهه‌ای آن‌ها است که در یک مدل رگرسیون چند متغیره از طریق ضرایب رگرسیون قابل برآورد است. اما واحد اندازه‌گیری تبخیر برحسب میلی‌متر، دما برحسب درجه سلسیوس، رطوبت نسبی برحسب درصد و باد برحسب متر بر ثانیه است. از آنجا که یک‌های اندازه‌گیری برای هر متغیر متفاوت است، نمی‌توان قضاوت کرد، سهم کدام متغیر بر تغییرات تبخیر بیشتر است. برای محاسبه اهمیت نسبی هریک از ضرایب، به ضرایب رگرسیون فاقد واحد نیاز است. برای این منظور می‌بایست از ضرایب رگرسیون استاندارد استفاده کرد (عساکره، ۱۳۹۰: ۲۵۳). بدین ترتیب ابتدا هریک از متغیرها نسبت به میانگین و انحراف معیارشان به شرح زیر استاندارد می‌شوند:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j}{s_j}$$

سپس الگوی رگرسیونی زیر برای k متغیر مستقل و به‌منظور توجیه تغییرات مکانی تبخیر (E_i) به کار گرفته شد:

$$E_i = \sum_{i=1}^k b_i z_i + e_i$$

بدین ترتیب ضرایب رگرسیون (b_i) به‌عنوان اثرات نسبی هریک از متغیرها تعبیر می‌شود. در پژوهش حاضر، برآورد ضرایب رگرسیون چندمتغیره بر اساس روش کمینه مربعات خطا (LSE) برآورد شده است. معنی‌دار بودن هریک از ضرایب براساس فرض صفر ($H_0: \beta = 0$) به صورت زیر آزمون شد.

$$t = \frac{b}{SE(b)}$$

در اینجا $SE(b)$ انحراف استاندارد b به صورت زیر حساب می‌شود:

$$SE(b) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - a - b)^2}{(n-2) \sum_{j=1}^n (t_j - t)^{-2}}} = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_t - a - b)^2}{(n-2)n(n^2-1)}}$$

در اینجا باید به این نکته اشاره کرد که مقادیر بین صفر و ± 0.5 معنادار و بالاتر از آن غیر معنادار است. این محاسبات برای کل دوره آماری و نیز برای هریک از دهه‌های موردبررسی به‌طور جداگانه انجام شد.

همچنین برای ارزیابی مدل از میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R square) استفاده شد.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (q_i - o_i)^2 \right)$$

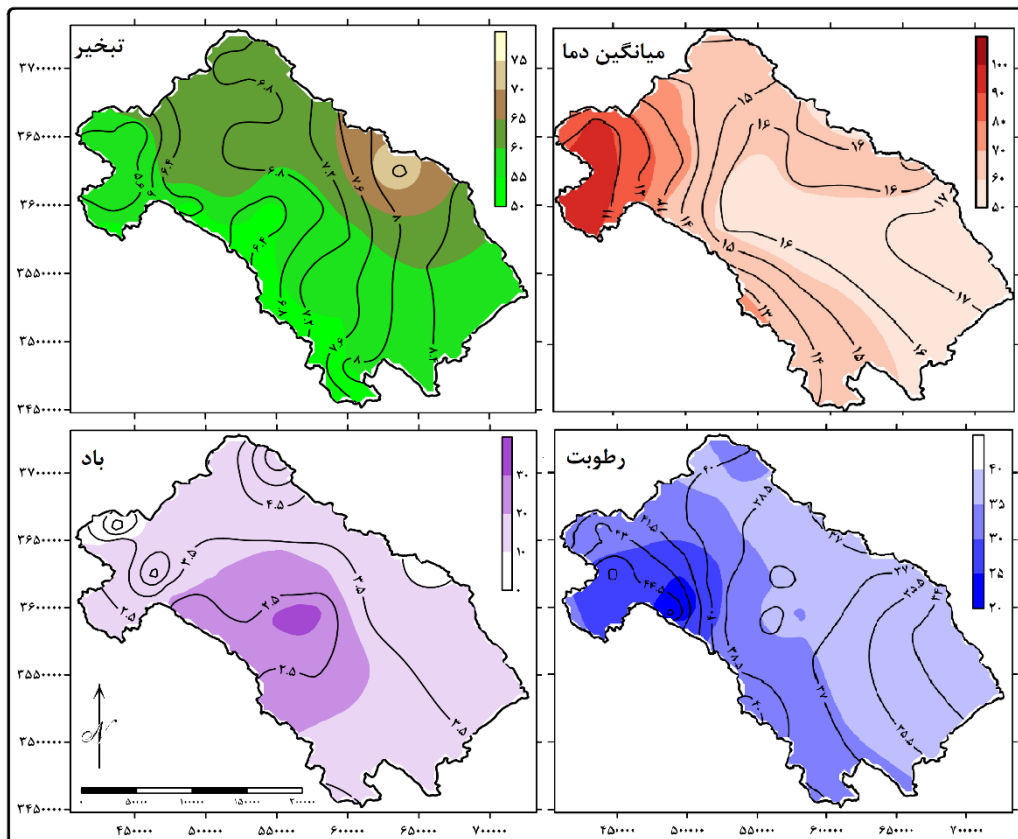
$$R^2 = \frac{\sum (q_i - \bar{q}_i)(Q_i - \bar{Q}_i)}{\sqrt{\sum (q_i - \bar{q}_i)^2 \sum (Q_i - \bar{Q}_i)^2}}$$

۴ یافته‌ها و بحث

۴.۱ ویژگی‌های عمومی

عامل ارتفاع در مقدار بارش و سایر فراسنجهای اقلیمی نهفته است، چون میزان فراسنجهای با ارتفاع تغییر می‌کند، در عملیات میان‌یابی با تغییر این فراسنجهای، تغییر ارتفاع نیز منعکس شده است. در حوضه آبریز زاینده‌رود، با افزایش ارتفاع، کاهش دما و در نتیجه کاهش تبخیر و تعرق سالانه قابل مشاهده است. با کاهش ارتفاع از شمال غرب به جنوب شرق، عناصر اقلیمی مانند حرارت و تبخیر رو به فزونی و برخی دیگر مانند رطوبت و بارش رو به کاهش می‌رود و اقلیم سرد و مرطوب به تدریج جای خود را به اقلیم گرم و خشک می‌دهد (شکل ۲). اثر ارتفاع بر فراسنجهای اقلیمی بسیار چشمگیر است (غیور و مسعودیان، ۱۳۷۵: علیجانی، ۱۳۹۰: قائمی و

همکاران، ۱۳۹۱: عساکره و سیفی پور، ۱۳۹۱: عساکره و همکاران، ۱۴۰۰). کوه‌ها می‌توانند سدی برای جریان هوای مرطوب از یک چشمه رطوبتی نظیر اقیانوس‌ها باشند و یا توفان‌های زمستانه را تضعیف کنند. معمولی‌ترین این دلایل آن است که قسمتی از هوا بر روی کوه‌ها شارش می‌یابد و در فرایند بارش، بر روی شیب کوهستان، رطوبت کاهش پیدا می‌کند. به عبارتی سیمای زمین‌های مرتفع بزرگ مقیاس، رطوبت را از هوایی که از فراز آن‌ها می‌گذرد، می‌گیرد و از طرف دیگر هوای خشک و گرم شده از طریق نزول بی‌درومکن است در ایجاد بیابان‌ها در سمت بادپناه کوه سهیم باشد (قائمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۶-۱۰۷).



شکل ۲ - میانگین (خطوط هم‌چند) و ضربت تغییرات (پس‌زمینه) سالانه فراسنج‌های مورد مطالعه

قله‌های کوهستانی حوضه زاینده‌رود به علت ارتفاع زیادی که دارند تقریباً در نیمی از سال پوشیده از برف بوده و در نتیجه آلودگی بالای برف، تبخیر و تعرق در آن کم‌تر صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، پایین‌ترین میانگین دما در شمال غرب حوضه و نواحی کوهستانی مشاهده می‌شود و میزان دما در جنوب شرق محدود به پیشینه می‌شود. در نقشه میانگین تبخیر نیز مانند دما کم‌ترین میزان در شمال غرب و بیشترین مقدار در جنوب شرق حوضه دیده می‌شود؛ بنابراین نواحی توام با دمای کم‌تر، تبخیر کم‌تر و بالعکس را شاهد هستیم که از همبستگی بالای (۰/۹) این دو فراسنج نیز قابل استنباط است (جدول ۱). این رابطه در مورد رطوبت برعکس است (جدول ۱، شکل ۲)؛ یعنی بالاترین مقدار رطوبت نسبی در شمال غربی محدود به مطالعه مشاهده می‌شود؛ به سمت جنوب شرق محدود از میزان رطوبت کاسته می‌شود. بعد از دما، عنصر رطوبت بالاترین میزان همبستگی با فراسنج تبخیر را دارد (۰/۷۹). بلافاصله پس از تبخیر، لایه نازک هوایی که در حدفاصل سطح مرطوب و جو قرار گرفته است از بخار آب اشباع می‌شود. اگر این لایه در جای خود ساکن باقی بماند عمل تبخیر متوقف می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰: ۲۲۴). بدین دلیل باد می‌تواند نقش مؤثری در فرایند تبخیر ایفا کند. رابطه سرعت باد و تبخیر نسبت به فراسنج‌های دیگر کم‌تر ولی مستقیم است (جدول ۱). در نیمه غربی محدود مطالعه مقدار آن کم‌تر و در نیمه‌های شرقی حوضه بر سرعت آن افزوده می‌شود. به عبارتی در مناطقی که سرعت باد کم‌تر است، تبخیر نیز کم‌تر و در مناطق توام با سرعت بیشتر باد، تبخیر نیز بیشتر رخ داده است (شکل ۲).

جدول ۱- ماتریس همبستگی تبخیر با فراسنج‌های مورد مطالعه

| سرعت باد | رطوبت | دما | تبخیر | |
|----------|-------|------|-------|----------|
| ۰/۰۶ | -۰/۷۹ | ۰/۹۶ | ۱ | تبخیر |
| ۰/۱۴ | -۰/۸ | ۱ | - | دما |
| ۰/۱۱- | ۱ | - | - | رطوبت |
| ۱ | - | - | - | سرعت باد |

۴,۲ الگوی آماری روابط مکانی تبخیر

با برازش الگوی رگرسیون چند متغیره استاندارد، ضرایب هریک از متغیرهای توضیحی برای هر پیکسل در نقشه برآورد گردید. توزیع مکانی این ضرایب در شکل (۳) ارائه شده است. تقریباً در غالب موارد ضرایب رگرسیون (نقش متغیرهای توضیحی: عناصر سه گانه اقلیمی) به لحاظ آماری معنی دار بوده است. در مواردی که این نقش‌ها فاقد معنی آماری بوده‌اند، پس زمینه نقشه در آن محل به رنگ تیره ارائه شده است.

بر اساس مدل رگرسیون چندمتغیره استاندارد، حدود ۸۰ درصد تغییرات مکانی فرایند تبخیر با این مدل توجیه شده است (جدول ۲). براساس این مدل اهمیت دما بیش از دو متغیر دیگر است و نقش بیشتری در فرایند تبخیر دارد و بالعکس باد سهم کمتری دارد. نقش رطوبت نسبی در فرایند تبخیر در جایگاه دوم اهمیت قرار دارد و بعد از دما نقش بیشتری در فرایند تبخیر ایفا می‌کند. همان‌گونه که مشخص است نقش دما در تبخیر در اکثر بخش‌های حوضه، ۰/۹۵ است. فقط در بخش کوچکی از غرب حوضه مورد مطالعه بین ۰/۶ تا ۰/۸۵ است. کمترین رابطه معکوس بین تبخیر و رطوبت نسبی در نیمه شمال حوضه و در بخش‌های کوهستانی آن مشاهده می‌شود. به سمت نیمه جنوبی و ناحیه خشک حوضه، به میزان این رابطه افزوده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است در بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه مورد مطالعه رابطه باد و تبخیر مستقیم و معنی دار است. در بخش‌های شمال غرب حوضه رابطه معکوس و معنی دار است. شاید بتوان دلیل رابطه مستقیم و مثبت بین باد و تبخیر در بخش‌های شمال غرب حوضه زاینده‌رود رو را به وجود نواحی کوهستانی توأم با رطوبت بالا و دمای کم نسبت داد که در آن‌ها باد همیشه حامل رطوبت و دمای کم (و در نتیجه افزایش رطوبت نسبی) است. همچنین این نواحی در معرض ورود هوای مرطوب به وسیله بادهای غربی می‌باشند؛ بنابراین می‌توان گفت رطوبتی که توسط این بادهای وارد محدوده مورد مطالعه می‌شود بیشتر از رطوبت خروجی به وسیله باد است.

۴,۳ وردایی دهه‌ای نقش عناصر اقلیمی در فرایند تبخیر

مدل‌های رگرسیونی برای تبخیر-متغیرهای اقلیمی هریک از دهه‌ها برازش یافت. به منظور ارزیابی مدل‌ها نمایه‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R square) به کار گرفته شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب تعیین، معیاری برای تعیین میزان هماهنگی مدل رگرسیونی با مشاهدات است. همان‌گونه که در جدول (۲) مشخص است ضریب تعیین در طی دوره‌های مختلف از حدود ۰/۷۵ تا ۰/۸۹ در تغییر است. مقدار مجذور میانگین مربعات خطا نیز از ۰/۳۷ تا ۰/۴۹ در دوره‌های مختلف در نوسان بوده است. بیشترین میزان ضریب تشخیص و کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا در دهه سوم به ترتیب با ۰/۸۹ و ۰/۳۲ و کمترین میزان ضریب تشخیص و بیشترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا در دهه اول به ترتیب با ۰/۷۵ و ۰/۴۹ بوده است.

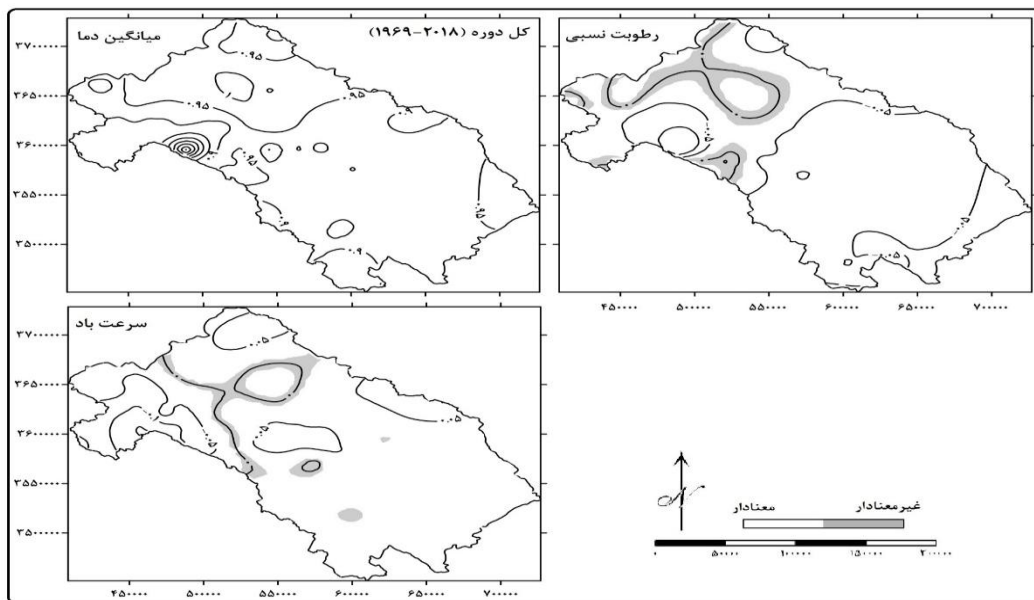
با توجه به مقدار ضریب تعیین در ابتدای دوره، رابطه متغیرهای اقلیمی ذکر شده با فراسنج تبخیر کم‌تر بوده در دهه‌های میانی (دوم و سوم) این رابطه افزایش پیدا کرده و در دوره‌های انتهایی این رابطه مجدداً کاهش پیدا کرده است. میزان ضریب تعیین در تمام دهه‌ها بالا و نزدیک به یک و میزان خطای بررسی شده پایین و نزدیک به صفر می‌باشد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل است. شیرسات و کومار^۱ (۲۰۰۹)، آلمدیج^۲ (۲۰۱۲)، لدلنی^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، مالیک و کومار^۴ (۲۰۱۵)، پتل^۵ و همکاران (۲۰۲۰)، سیفی و همکاران (۱۳۸۹)، شیخ‌الاسلامی و همکاران (۱۳۹۳) و جعفری و دین‌پژوه (۱۳۹۶) در مطالعات رگرسیونی خود، مجذور میانگین مربعات خطا را به ترتیب حدود ۱/۶، ۱/۸۳، ۱، ۱/۶، کم‌تر از ۰/۴، کم‌تر از ۰/۵، ۰/۱۸، ۰/۰۸، در دو مدل استفاده شده برابر با ۲/۴۵ و ۲/۵۸ بدست آوردند که این مقدار نشانگر کارایی خوب روش رگرسیون چندمتغیره در مناطق مختلف اقلیمی می‌باشد.

ضرایب رگرسیونی چندمتغیره تبخیر بر اساس فراسنج‌های دما، رطوبت و سرعت باد برای هر یک از دهه‌ها در شکل (۴) ارائه شده است. در بخش‌هایی که ضریب رگرسیونی b_i فاقد معنی آماری بوده و فرض صفر ($H_0: \beta = 0$) تأیید می‌شود، پس زمینه نقشه با

⁴ Malik and Kumar
⁵ Patle

¹ Shirsath and kumar
² Almedeij
³ Ladlani

رنگ تیره مشخص شده است. در بیشتر بخش‌های حوضه در سطح ۹۵ درصد اطمینان فرض صفر برای ضرایب $(H_0: \beta = 0)$ رد شده و با رنگ سفید مشخص شده است.



شکل ۳- توزیع مکانی ضرایب رگرسیون چندمتغیره استاندارد تبخیر - سایر فراسنج‌های اقلیمی مرتبط

در دهه اول و دوم، نقش دما در فرایند تبخیر، نسبت به کل دوره افزایش یافته است. سهم دما در اکثر نقاط حوضه بین ۱ تا ۱/۱ بوده است. آزمون معنی‌داری برای این دهه نیز نشان دهنده رد شدن فرض صفر و معنی‌داری ضریب در سطح ۹۵ درصد اطمینان می‌باشد. در دهه سوم نسبت به کل دوره، نقش دما در فرایند تبخیر تغییری نکرده است؛ ولی در دهه‌های چهارم و پنجم نقش دما در تبخیر کم‌تر شده و به ۰/۹ میلی‌متر کاهش یافته است. این مقدار در دهه آخر به ۰/۸ میلی‌متر نیز می‌رسد. بیشترین و کم‌ترین نقش این متغیر به ترتیب در دهه اول و پنجم بوده است؛ بنابراین نقش دما در دهه‌های ابتدایی در مقدار میانگین دهه‌ای تبخیر بیشتر از دهه‌های انتهایی می‌باشد.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل برای کل دوره و به تفکیک برای هر دهه

| RMSE | R square | معیار |
|------|----------|-----------------------|
| ۰/۴۴ | ۰/۸ | کل دوره (۱۹۶۹-۲۰۱۸) |
| ۰/۴۹ | ۰/۷۵ | دهه اول (۱۹۶۹-۱۹۷۸) |
| ۰/۳۹ | ۰/۸۴ | دهه دوم (۱۹۷۹-۱۹۸۸) |
| ۰/۳۲ | ۰/۸۹ | دهه سوم (۱۹۸۹-۱۹۹۸) |
| ۰/۴۴ | ۰/۸ | دهه چهارم (۱۹۹۹-۲۰۰۸) |
| ۰/۴۴ | ۰/۷۹ | دهه پنجم (۲۰۰۹-۲۰۱۸) |

نقش رطوبت نسبی در فرایند تبخیر طی سه دهه ابتدایی نسبت به کل دوره تغییری نکرده است ولی در دو دوره انتهایی این میزان کمی بیشتر شده است. به عبارتی در دوره‌های ابتدایی این مقدار ۰/۵ بوده ولی در دوره انتهایی ۰/۱ شده است؛ بنابراین کم‌ترین نقش رطوبت در فرایند تبخیر در سه دوره اول و بیشترین نقش آن در دوره پنجم می‌باشد. در دو دوره اول در بخش‌های شمال‌غربی حوضه رابطه رطوبت و تبخیر مثبت و مستقیم بوده که در سه دوره بعدی این رابطه منفی و معکوس می‌باشد. احتمالاً هم‌نوا با نمود رخداد گرمایش جهانی و افزایش دما، گنجایش هوا برای دریافت رطوبت بیشتر شده است. بدین دلیل بخشی از نقش دما در تکوین فرایند تبخیر به رطوبت منتقل شده است. (شکل ۴). شایان یادآوری است که نقش گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی در فرایند تبخیر در مطالعات پرشماری تأیید شده است. از این میانه می‌توان به هو^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، هارمسن^۲ و همکاران (۲۰۰۹)، باگیس^۳ و همکاران

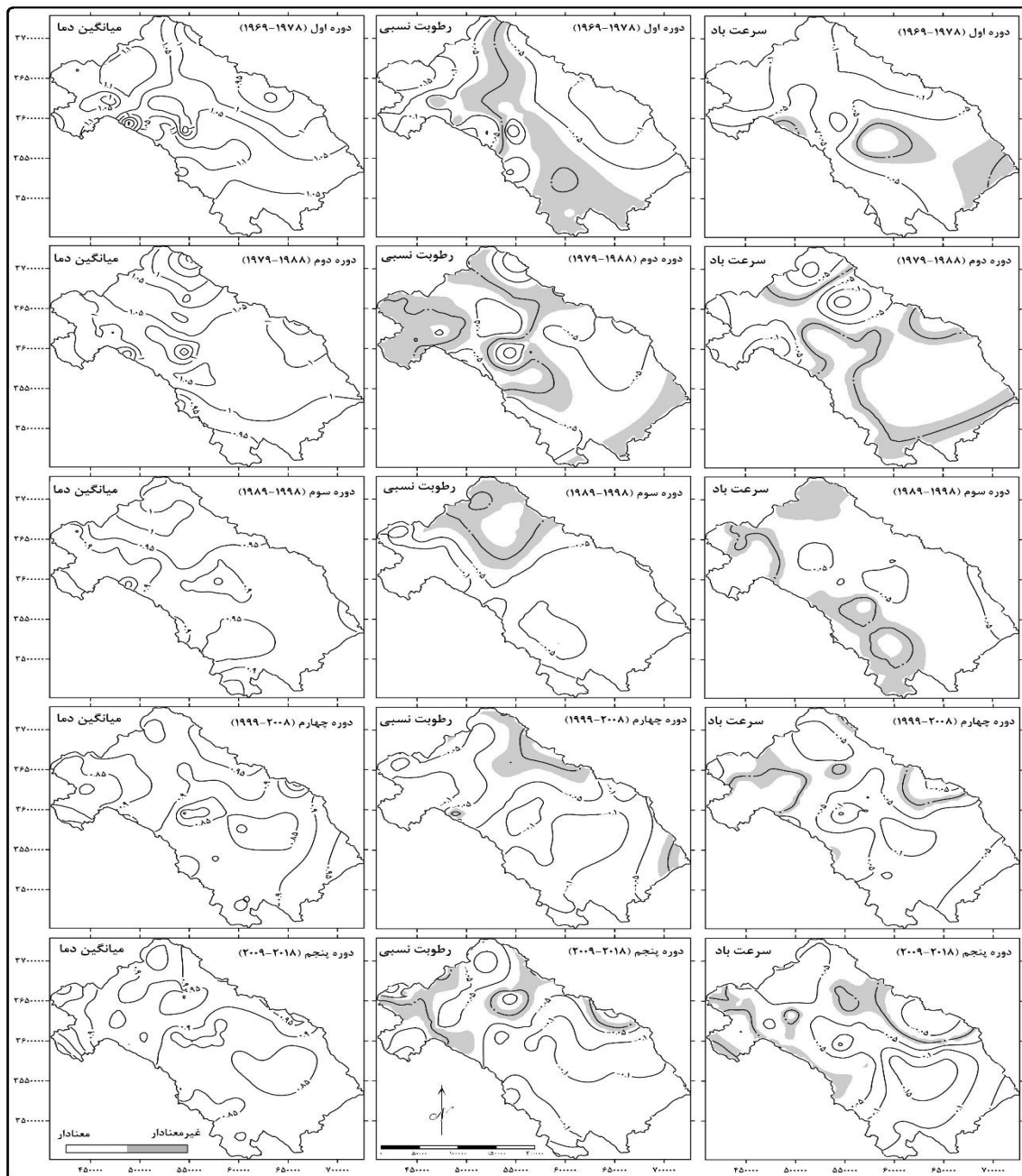
³ Baguis

¹ Huo

² Harmsen

(۲۰۱۰)، بندیاپدهایی^۱ و همکاران (۲۰۰۹)، گاریچت^۲ و همکاران (۲۰۰۴)، دانگشنگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷)، زو^۴ و همکاران (۲۰۰۶)، طبری و همکاران (۲۰۱۱)، سبزی پرور و همکاران (۱۳۹۰)، ملکی نژاد و پورمحمدی (۱۳۹۲) اشاره کرد.

در مورد فراسنج باد نیز در سه دهه ابتدایی نقش آن نسبت به کل دوره تغییر نکرده است، ولی در دو دهه پایانی نقش آن بیشتر شده است؛ یعنی در دوره‌های ابتدایی این مقدار ۰/۰۵ و در دهه پایانی این مقدار به ۰/۱ رسیده است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت کم‌ترین میزان نقش باد در فرایند تبخیر در دهه دوم و بیشترین نقش آن در دهه پنجم می‌باشد.



شکل ۴- توزیع مکانی ضرایب رگرسیون چندمتغیره استاندارد تبخیر - سایر فراسنج‌های اقلیمی مرتبط

³ Dongsheng

¹ Bandyopadhyay

⁴ Xu

² Garbrecht

۵ نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تلاش گردید با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، ارتباط بین این فراسنج‌ها و فراسنج تبخیر در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۶۹ واکاوی و مهم‌ترین فراسنج مؤثر بر تبخیر در محدوده مورد مطالعه مشخص شود. سپس به تغییرات دهه‌ای ارتباط این سه متغیر با تبخیر پرداخته شد. بدین جهت از داده‌های روزانه تبخیر (mm)، دما (°c)، رطوبت نسبی (%) و باد (m/s) ایستگاه‌های همدید، اقلیم‌شناسی و وزارت نیرو (طی ۵۰ سال) استفاده شد.

بر اساس مشخصات عمومی انجام‌شده در این حوضه مشخص شد که میزان دما و باد در بخش‌های انتهایی حوضه بیشتر از بخش‌های شمالی آن است به همین نسبت میزان تبخیر در نیمه شمالی کم‌تر و در نیمه جنوبی بیشتر است و بالعکس مقدار رطوبت در بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه بیشتر از بخش‌های جنوبی آن است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که موثرترین فراسنج در ارتباط با تبخیر فراسنج دما است که این ارتباط در سطح ۹۵ درصد اطمینان در کل حوضه معنی‌دار بود. رطوبت سهم دوم و باد آخرین رده را در فرایند تبخیر دارا است.

مطالعاتی که در مناطق اقلیمی دیگر نیز انجام‌شده نتایج این پژوهش را تأیید می‌کنند. عرب سلغار و همکاران (۱۳۹۰)، به مطالعه ضرایب تابع رگرسیونی چهارمتغیره بین تبخیر و دماهای بیشینه و کمینه و رطوبت نسبی در برخی از ایستگاه‌های مناطق نیمه‌خشک پرداختند؛ و به این نتیجه رسیدند بین فراسنج‌های اقلیمی میانگین دما موثرترین فراسنج مؤثر بر تبخیر است. احمدی مرادی و همکاران (۱۳۹۸)، به تحلیل رگرسیونی تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از متغیرهای اقلیمی بیشینه و کمینه دما، بیشینه و کمینه رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ایستگاه الشتر پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که همه متغیرها دارای رابطه خطی با تبخیر و تعرق مرجع بوده و ضرایب مدل حاکی از بیشترین تأثیر متغیر بیشینه درجه حرارت بر تبخیر و تعرق مرجع است. قاسمی و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از فراسنج‌های دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بارش و سرعت باد با استفاده از تحلیل مولفه‌های مبنا و رگرسیون چندمتغیره برای ایستگاه‌های تبریز و اردبیل به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین همبستگی بین دما و تبخیر بوده است. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷)، به برآورد میزان تبخیر و تعرق در ارتباط با تغییرات اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در دوره‌های آبی در تمامی ماه‌ها و فصول تبخیر تحت‌تأثیر دما افزایش پیدا می‌کند.

همچنین یافته‌های پژوهش نشان داد نقش دما از دهه نخست به دهه انتهایی رو به کاهش و بالعکس سهم رطوبت و باد رو به افزایش است. در این مدل، نزدیک بودن مقدار ضریب تعیین به یک و خطای نزدیک به صفر در کل دوره و در هر ۵ دهه، نشان می‌دهد که مدل رگرسیون چندمتغیره توانایی مناسبی در این زمینه دارد.

References

- Asakereh, H and seifipour, Z. 2012. Spatial modeling of annual precipitation in Iran. 29:6-9. [In Persian]
- Asakereh, H., Masoudian, S.A and Tarkarani, F. 2021. A Discrimination of Roles of Internal and External Factors on the Decadal Variation of Annual Precipitation in Iran over Recent Four Decades (1975-2016). Physical geography research quarterly. 53: 91-107. [In Persian]
- Asakereh, H. 2008. Kriging Application in Climatic Element Interpolation A Case Study: Iran Precipitation in 1996.12.16. geography and development. 12: 25-42. [In Persian]
- Asakereh, H., 2011. Basics of statistical climatology. Zanjan university publication. PP 545. [In Persian]
- Asadi, Mehdi and Karami, Mokhtar. 2020. Evaluation of Evapotranspiration Using Satellite Images and SEBAL Algorithm (Case Study: Eastern Azerbaijan Province). Ecohydrology. 1: 17-27. [In Persian]
- Ahmadi Moradi, M., Heidari Motlagh, A., Nasrolahi, A. H and Saeedi, M. 2019. Regression analysis of reference evapotranspiration using climatic variables in Al-Shatar weather conditions. Engineering, Natural Resources and Environment, Tehran. [In Persian]
- Alizadeh, A. 2011. The principles of applied hydrology. Emam reza university publication. Pp 911. [In Persian]

- Alizadeh, A., Sayari, N., Hesami Kermani, M.R. Banayan, M and Hosseini Ali, F. 2010. Investigating the potential effects of climate change on agricultural water sources and uses (case study: Kashf-Roud River catchment). *Water and soil*, 24: 815:835. [In Persian]
- Alijani, B. 2011. *Climatology of Iran*. Samt publication. PP 230. [In Persian]
- Arab slghar, A. A., Dehghan, H., sedghi, H and Naderianfar, M. 2011. Prediction of annual evapotranspiration using meteorological data in a number of stations in semi-arid regions of Iran. *Water resources engineering*. 8: 21-30. [In Persian]
- Almedeij, J. 2012. Modeling pan evaporation for Kuwait by multiple linear regression. *The Scientific World Journal*, 9: 10-11.
- Adnan, R.M., Liang, Z., Heddham, S., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Li, B. 2020. Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro- meteorological data as inputs. *Hydrology*. 586: 124371.
- Alexandersson, H and Moberg, A .1997. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends. *Journal of Climatology*. 24: 643–662.
- Alexandersson, H.1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatol*. 6: 661–675.
- Babaeian, I., Kouhi, M. 2012. Agroclimatic Indices Assessment over Some Selected Weather Stations of Khorasan Razavi Province Under Climate Change Scenarios. 26: 953- 967. [In Persian]
- Barkganpour, S., Ghorbani, kh., Salarijazi, M and Rezaeighale, L. 2021. *Climate Research*. 46: 57-72. [In Persian]
- Baguis, P., Roulin, E., Willems, P and Ntegeka, V. 2010. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theoretical and Applied Climatology*. 99: 273-286.
- Bandyopadhyay, A., Bhadra, A., Raghuwanshi, N.S and Singh R. 2009. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. *Journal of Hydrologic Engineering*. 14:508-515.
- Dongsheng, Z., Zheng, D., Shaohong, W and Zhengfang, W. 2007. Climate changes in northeastern china during last four decades. *Chinese Geographical Sciences*. 17:317-324.
- Dehghanisanj, H., Yamamoto, T. and Rasiyah, V. 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agric. Water, Manage*. 64: 91-106.
- Farokhzadeh, B., Chobeh., S and Bazrafshan, O. 2020. Evaluating the effects of climate change on standardized precipitation-evaporation and transpiration index (case study: Lethian watershed). *Rainwater catchment system*. 26: 59-72. [In Persian]
- Ghayoor, H.A and Masoudian, S.A. 1996. Investigating the system of total annual precipitation changes in Iran. *Nivar*. 29: 27-60. [In Persian]
- Ghareh khani, A., ghahreman, N. 2010. Seasonal and Annual Trend of Relative Humidity and Dew Point Temperature in Several Climatic Regions of Iran, *water and soil*. 4: 636-646. [In Persian]
- Ghasemi A. R. Timori, M and Timori, F. 2019. Estimating reference evaporation and transpiration of Tabriz and Ardabil stations using principal component analysis method. *Geographic space*. 65: 215-232. [In Persian]
- Gharehloo, R and Ghasemifar, E., 2019. Spatial variability of evapotranspiration regards to extreme temperatures using remote sensing data in Iran. 23: 193-212. [In Persian]
- Ghaemi, H., Zarin, A and Khoshakhlagh, F. 2012. *Climatology of arid regions*. Samt publication. pp 419. [In Persian]

- Goudarzi, M., salahi, B and Hsseini, S.A. 2018. Estimation of Evapotranspiration rate due to climate change in the Urmia Lake basin. Watershed mangement science. 41: 1-12. [In Persian]
- Guo, X., Gong, X., Shi, J., Guo, J., Dominguez-Villar, D., Lin, Y., Wang, H and Yuan, D. 2021. Temporal variations and evaporation control effect of the stable isotope composition of precipitation in the subtropical monsoon climate region, Southwest China. Hydrology. 599: 126278.
- Granger, R. J. 1999. Satellite-derived estimation of evapotranspiration in Gedis basin. Journal of Hydrology. 229: 70-76.
- Guo, B., Zhang, J., Gong, H and Cheng, X. 2014. Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin China, Ecohydrology and Hydrobiology. 1: 55-67.
- Garbrecht, J and Van Liew, M. 2004. Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States. Journal of Hydrological Engineering. 9:360-367.
- Huo, Z., Xiaoqin, D., Shaoyuan, F., Shaozhong, K and Guanhua, H .2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. Journal of Hydrology. 492: 24-34.
- Harmsen, E., Miller, N., Schlegel, N. and Gonzalez, JE. 2009. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficite and crop yield in Puerto Rico. Agricultural Water Management 96:1085-1095.
- Hosseini. M. R., khalet abadi farahani. A. H. 2017. Evaluation and sensitivity analysis of different methods of daily reference evaporation and transpiration estimation in a cold dry climate. Applied science research. 2: 29-40. [In Persian]
- Jafari, M and Dinpapasho. 2017. Evaluation of Multiple Ridge Regression Model to Estimation of Pan Evaporation. Irrigation sciences and engineering. 40: 83-97. [In Persian]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, Climate Change (2007), “The Physical Science Basis, A Contribution of Working Groups. I, to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon and the Core Writing Team (eds)”. Cambridge University press. Cambridge United Kingdom, and New York, USA.
- Ito, Y and Momii, K. 2021. Potential of climate changes on evaporation from a temperate deep lake. Jyornal of hydrology. 35: 100816
- Kisi, O. 2009. Modeling monthly evaporation using two different neural computing techniques. Irrigation Science. 27:417-430.
- Kavyani, M. R. and Alijani, B. 2011. The foundations of climatology. Samt publication. pp 582. [In Persian]
- Kochakzadeh, M and Nikbakht, J. 2004. Comparison of different methods of reference evapotranspiration estimation in different climates of Iran with the standard FAO-Penman-Monteith method. Agriculture science. 3: 43-57. [In Persian]
- Kouhi, M., Sanaei Nejad, H and Amini, M. 2017. The effect of the different ETo estimation methods on reconnaissance drought index (RDI) calculation in several climatic zones of Iran. Climate research. 25-26: 47-66. [In Persian]
- Karampoor, M., Yousefi, A., Koohpaye. N. 2015. Relationship between climatic elements with vegetation cover of meadows the Hormozgan province (A case study: Gymnocarpus decander). Natural ecosystems of Iran. 21: 41-48. [In Persian]
- Khosravin. M., entezari. A. R., Baaghideh. M and Zandi. R. 2020. Modeling the link between drought, number of rainy days and evaporation and transpiration in Fars province. Environmental research and technology. 7: 1-15. [In Persian]

- Liang, L., Lijuan L and Qiang, L. 2010. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer river basin of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150: 298-306.
- Li, Y.F., Min, X and Thong, N.G. 2010. Adaptive ridge regression system for software cost estimating on multi-collinear datasets. *The Journal of System and Software*, 83: 2332-2343.
- Ladlani, I., Hauichi, L., Dhemili, L., Heddem, S and Blouze, Kh. 2012. Estimation of daily reference evapotranspiration in the north of Algeria using adaptive neuro-Fuzzy inference system (ANFIS) and multiple linear regression Models: a comparative study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 5959-5969.
- Mesquita, J.B.D.F., Lima Neto, I.E., Raabe, A and deAraujo, J.C. 2020. The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. 590: 125456.
- Mutiga, J., Su, Zh and Woldai, T. 2010. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12S (2010) S100–S108.
- Mallik, A.P., Jyothy, S.A and Sekhar Reddy, K. C. 2013. Daily reference evapotranspiration estimation using linear regression and Ann models. *The Institution of Engineers (India)*. 4:215–221.
- Malik, A and Kumar, A. 2015. Pan evaporation simulation based on daily meteorological data using soft computing techniques and multiple minear megression. *Water Resources Management*. 29: 1859-1872.
- Martinez, M. D., Serra, C., Burgueño A and Lana, X. 2010. Time trends of daily maximum and minimum temperatures in Catalonia (ne Spain) for the period 1975–2004. *Journal of Climatol*. 30: 267–290.
- Malekinejad, H and pourmohamadi, S. 2012. Developing and performance assessment of a regression equation for estimating reference crop evapotranpiration based on FAO Penman -Moneteith in central Iran. 20: 495-507. *Pasture and desert research of Iran*. [In Persian]
- Mosavi Baigi, M., Ashraf, B and Mianabadi, A. 2010. The assessment of four reference crop evapotranspiration models in a semi-arid climate of Iran to find the best radiation model. *Water and soil conservation*. 17:85-105. [In Persian]
- Nourani, V., Sayyah-fard, M., Taghi Alami, M and Sharghi, E. 2020. Data pre-processing effect on ANN-based prediction intervals construction of evaporation process at different climate regions in Iran. *Journal of Hydrology*. 588: 125078.
- Pandzic, K and Likso, T. 2010. Homogeneity of average annual air temperature time series for Croatia. *Journal of Climatology*. 30: 1215–1225.
- Panda, K.C., Singh, R.M., Thakural, L.N and Sahoo, D.P., 2022. Representative grid location – multivariate adaptive regression spline (RGL-MARS) algorithm for downscaling dry and wet season rainfall. *Hydrology*. 605: 127381.
- Paul, G., Gowda, P. H., Vara Prasad, P. V., Howell, T. A., Staggenborg, S. A and Neale, C. M. U. 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources*. 59:157-168.
- Patle, G. T., Chettri, M and Jhajharia, D. 2020. Monthly pan evaporation modelling using multiple liner regression and artificial neural network techniques. *Water supply*. 3: 800-808.
- Rodrigues, I.S. Costa, C.A.G., lima Neto, I.E and Hopkinson. C.2021. Trends of evaporation in Brazilian tropical reservoirs using remote sensing. *Hydrology*. 598: 126476.

- Sahin, S and Cigizoglu, H. K. 2010. Homogeneity analysis of Turkish meteorological data set. *Hydrology Processes*. 24: 981–992.
- Sawano, Sh., Hotta, N., Komatsu, H., Suzuki, M and Yayama, T. 2007. Forest Environments in the Mekong River Basin. Evaluation of Evapotranspiration in Forested Areas in the Mekong Basin Using GIS Data Analysis. 295: 36-44.
- Shirgure, PS and Rajput, G.S. 2012. Prediction of daily pan evaporation using neural networks models. *Science Journal Agriculture*. 5:126–137.
- Shirgure, PS. 2011. Evaporation modeling with neural networks-A research review. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2:37–47.
- Shirsath, P.B and Kumar, A.S. 2009. A comparative study of daily pan evaporation estimation using Ann, regression and climate-based models. *Water Resources Management*, 24: 1571-1581.
- Sanaei Nejad, S.H, Noori, S., Hashemi nia, M. 2011. Estimation of Evapotranspiration Using Satellite Image Data in Mashhad area, 3:540: 547. [In Persian]
- Seifi. A., Mirlotfi. S. M and Riahi. H. 2010. Development of a combined model of multiple regression - analysis of main components and factors in the prediction of evaporation - reference transpiration. *Water and soil*. 6: 1186- 1196. [In Persian]
- Sabzi parvar., A. A and Shadmani., M. 2011. Analyzing the process of evaporation and transpiration using Mann-Kendall and Spearman tests in dry areas. 4: 823 – 834. [In Persian]
- Salarian, M., Najafi, M., Nagafi, K., Eslamiyan. S. S. Heidari, M. 2014. The most Appropriate Method to Estimate Potential Evapotranspiration in Meteorological Data Scarce Condition in the Warm and Cold Months of the Year (Case Study of Isfahan). *Irrigation and drainage*. 1: 62-73. [In Persian]
- Shikh eslami, N., Ghahreman, B., Mosaedi, A., Davari, K and Mohajerpoor, M. 2014. Estimating Reference Evapotranspiration by Using Principal Component Analysis (PCA) and The Development of a Regression Model (MLR-PCA) (Case Study: Mashhad Station). *Water and soil*. 2: 420- 429. [In Persian]
- Tian, CH., Jiao, W., Beysens, D., Kaseke, K.F., Medici, M. G. Li. F and Wang, L. 2021. Investigating the role of evaporation in dewformation under different climates using 17O-excess. *Journal of hydrology*. 592: 125847.
- Tabari, H., Marofi, S., Aeni, A., Hosseinzadeh Talaeaa, P and Mohammadi, K. 2011. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 128-136.
- Vicente-serrano, M. S., Begueria, S., Lopez-Mereno, J. L., Garcia-vera, M. A and Stepanek, P. 2010. A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity. *Journal of Climatology*. 30: 1146–1163.
- Xu, C., Gong, L., Jiang, T., Chen, D and Singh, V.P. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology*. 327: 81–93.
- Yuting, Y., Songhao, Sh and Lei, J. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural*.