



## Investigation of the Effects of Meteorological Parameters on Evaporation from the Water Surface Using Variance Analysis

Javad Zahiri<sup>\*1</sup>, Adell Moradi Sabzkouhi<sup>2</sup>

1. Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran.

\*Corresponding Author: [j.zahiri@asnrukh.ac.ir](mailto:j.zahiri@asnrukh.ac.ir)

### Keywords:

Reservoir losses, Meteorological parameters, Analysis of variance, Interaction effects

### Extended Abstract

#### Introduction

The challenge of reducing fresh water resources is more serious due to the hot and dry climate in Iran, and requires the optimal use of available water resources. Most of the losses in the reservoirs of dams are due to evaporation. Considering the number of dams in the country, every year a huge amount of the dams' reservoirs is lost due to evaporation. Changes in evaporation rates due to climate change can greatly affect hydrological parameters such as soil water content and runoff. Therefore, the investigation of the effects of different meteorological parameters on the evaporation rate provides insights into new ways of evaporation suppression methods. In addition to this, evaporation is considered the main factor in the loss of water resources in hot and dry regions. Based on this, investigating the rate of evaporation from these reservoirs under the climate change can help to understand this phenomenon and deal with it. By knowing the effective parameters on the evaporation and the mutual effects of different parameters, it is possible to take more effective measures in choosing the appropriate evaporation reduction methods and increasing their efficiency under different conditions. In this research, the main and interaction effects of different meteorological parameters such as temperature, relative humidity, wind speed, radiation and average vapor pressure on the evaporation rate from the free surface of water were investigated using variance analysis.

### Received:

17 Jun 2023

### Revised:

16 Aug 2023

### Accepted:

17 Aug 2023

### How to cite this article:

Zahiri, J., & Moradi Sabzkouhi, A. (2023). Investigating the interaction effects of meteorological parameters on evaporation from the water surface using variance analysis. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 87- 104. [10.22077/JDCR.2023.6498.1028](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6498.1028).



## Methodology

In this study, the information from Ahvaz weather station during 1991 to 2019 was analyzed. Ahvaz airport's weather station is at 31°32' latitude, 48°66' longitude and 16 meters above sea level. Class A evaporation pans are used at this station to measure the evaporation rate. The Mann-Kendall test was used in this study at four significance levels of 0.001, 0.01, 0.05 and 0.1. To perform the Mann-Kendall test, the MAKESENS application developed by the Meteorological Institute of Finland was applied. In this study, one-way and two-way variance analyses were used to compare and investigate the effect of evaporation reduction methods and different meteorological parameters. In this study, a two-way analysis of variance was used to check the effect of different meteorological parameters on the performance of different methods. Analysis of variance requires all parameters to follow normal distribution to some extent. In addition, the independent variables must have a nominal or ordinal scale. Accordingly, all meteorological parameters were divided into three levels: high, medium and low. For this purpose, first, different meteorological parameters were modified based on the average of each parameter. In this way, the average of each parameter was reduced from all the data of that parameter. In such a case, the average data of that parameter will be equal to zero. After that, according to the standard deviation (Sd) of each parameter, the data of that parameter were divided into three parts. Values less than -1Sd were considered as low (level 1), values greater than +1Sd as high (level 3) and values between -1Sd and +1Sd as intermediate (level 2). All calculations were done in SPSS environment. The statistical characteristics of different meteorological parameters during the investigated period are presented in Table 1.

**Table 1. Statistical characteristics of different meteorological parameters during the studied period**

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Bond 1	Bond 2	Bond 3
Temperature (C)	3.4	44.3	26.7	10.3	<16.4	16.4-36.9	>36.9
Humidity (%)	4.4	94.62	30.9	20.2	<10.7	10.7-51.1	>51.1
Surface Pressure (kPa)	98.6	102.42	100.5	0.8	<99.6	99.6-101.3	>101.3
Wind Speed (m/s)	0.6	8.33	2.2	0.9	<1.3	1.3-3.2	>3.2
Solar Irradiance (MJ/m <sup>2</sup> /day)	0.5	32.03	19.8	7.1	<12.7	12.7-26.9	>26.9

## Discussion and Results

At first, only the main effects of different parameters on the rate of evaporation were calculated using analysis of variance, and then the interaction effects of different meteorological parameters on the rate of evaporation were investigated. In Table 2, the main effects of temperature parameters, relative humidity, surface pressure, wind speed and the amount of radiation on evaporation are presented.

**Table 2. Results of ANOVA based on the main effects**

Source	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Temperature	2	2095.521	187.417	.000	.036
Humidity	2	3979.157	355.883	.000	.066
Surface Pressure	2	7765.179	694.493	.000	.122
Wind Speed	2	3113.505	278.462	.000	.053
Solar Irradiance	2	8253.249	738.144	.000	.129

Based on the analysis, all the mentioned parameters had a significant effect on the evaporation rate. The results of the Bonferroni test, which is used to observe the effects within the group, show that there is a significant difference in all meteorological parameters between the different levels of these parameters on the evaporation rate. The calculated explanation coefficient for the main effects is equal to 0.69, which shows that the main effects can estimate 0.69 of the output variance. Considering that only the main effects are used in this section, the Eta squared parameter can show the percentage of influence of each parameter on the output. Based on this parameter, solar radiation has the greatest effect on evaporation. Surface pressure and relative air humidity are also placed in the next place.

### **Conclusion**

Based on the analysis, all the mentioned parameters had a significant effect on the evaporation rate. According to Eta squared, the main effects could estimate 69% of the output variance. Based on this parameter, solar radiation had the most significant effect on the evaporation rate. The results of variance analysis showed that all the interactive effects had a significant effect on the evaporation rate, and only the interactive effect of wind speed and radiation was not significantly different. The interactive effect of surface pressure on temperature and radiation had the most significant effect on the rate of evaporation, followed by the interactive effect of temperature and relative humidity. Investigation of the effect of various meteorological parameters on the rate of evaporation from the water surface and their interactive effects can be used to investigate the efficiency of various methods to reduce evaporation.



## بررسی تأثیر متقابل پارامترهای هواشناسی بر تبخیر از سطح آب با استفاده از تحلیل واریانس

جواد ظهیری\*<sup>۱</sup>، عادل مرادی سبزه‌کوهی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران.

\*نویسنده مسئول: j.zahiri@asnruk.ac.ir

### چکیده

### واژه‌های کلیدی:

در کشور ایران با توجه به شرایط اقلیمی گرم و خشک، چالش کاهش منابع آب شیرین جدی‌تر بوده و لزوم استفاده بهینه از منابع آب موجود را ایجاب می‌کند. قسمت اعظم تلفات در مخازن سدها ناشی از پدیده تبخیر بوده و با توجه به تعداد سدهای موجود در کشور، هر ساله حجم عظیمی از ذخیره‌ی سدها در اثر تبخیر تلف می‌شود. جهت بررسی پدیده تبخیر نیاز است که تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب مورد ارزیابی قرار گیرد. بر همین اساس در این تحقیق سعی شد تا تأثیر پارامترهای درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان تابش و میانگین فشار بخار بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد آب بر اساس داده‌های درازمدت ایستگاه هواشناسی اهواز مورد ارزیابی قرار گیرد. جهت بررسی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب، از آنالیز واریانس استفاده گردید. بر اساس تحلیل صورت گرفته کلیه پارامترهای مورد اشاره تأثیر معناداری بر میزان تبخیر داشتند. ضریب تبیین محاسبه شده جهت تعیین اثرات اصلی، برابر با ۰/۶۹ بوده که نشان می‌دهد، اثرات اصلی می‌توانند ۰/۶۹ واریانس خروجی را برآورد کنند. بر اساس پارامتر مجذور اتا میزان تابش خورشیدی بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر داشته است. فشار سطح و رطوبت نسبی هوا نیز در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج آنالیز واریانس با در نظر گرفتن اثرات متقابل نشان داد که کلیه اثرات متقابل دارای تأثیر معنادار بر میزان تبخیر بوده و تنها اثر متقابل سرعت باد و میزان تابش فاقد تفاوت معنادار می‌باشد. اثرات متقابل فشار سطح در درجه حرارت و میزان تابش و نیز اثر متقابل درجه حرارت و رطوبت نسبی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر داشت. اطلاع از اثر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب و اثرات متقابل آن‌ها می‌تواند جهت بررسی کارایی روش‌های مختلف کاهش تبخیر مورد استفاده قرار گیرد.

آنالیز واریانس، اثرات متقابل، پارامترهای هواشناسی، تلفات مخزن

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۳/۲۷

### تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۵/۲۵

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۵/۲۶

## مقدمه

بر اساس مطالعات سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، در بین ۱۱۲ کشور از نظر بحران آب، ایران در رده ۱۱ قرار دارد که نشان دهنده وضعیت نامناسب ایران از لحاظ منابع آبی است. بر این اساس می‌بایستی کشور تا سال ۲۰۲۸ جهت حفظ شرایط موجود ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیافزاید که این افزایش می‌تواند از راه‌های مختلفی از قبیل افزایش راندمان آبیاری و کاهش تبخیر صورت پذیرد. بجز نواحی محدودی از ایران در حاشیه دریای خزر، در سایر مناطق مقدار بارندگی به مراتب کمتر از تبخیر است. به‌عنوان مثال توان تبخیری نیوار در یزد و مناطق کویری ایران در حدود ۹۳۱۱ میلی‌متر می‌باشد (Hashemi Garmdeh and Eslamian, 2005). آب شیرین از اساسی‌ترین نیازهای جوامع بشری است و چگونگی حفظ و بهره‌برداری از منابع آب شیرین یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر محسوب می‌شود. این چالش در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان وضعیت وخیم‌تری دارد و در حال تبدیل شدن به یک بحران می‌باشد به طوری که گفته می‌شود در حال حاضر بیش از نیمی از جمعیت جهان با کمبود منابع آب شیرین مواجه هستند. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین‌تری قرار دارد. با وجود آن که یک درصد جمعیت و ۱/۱ درصد خشکی‌های جهان به ایران اختصاص دارد، سهم آن از منابع آب شیرین تنها ۰/۳ درصد است. از طرف دیگر، کمبود بارندگی در ایران به دلیل قرار گرفتن آن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان باعث شده که کشور ما به صورت طبیعی همواره با کمبود آب مواجه باشد و در زمره کشورهای با محدودیت منابع آبی قلمداد شود (Madadi et al., 2020). با توجه به منابع آبی محدود و آب و هوای گرم و خشک در ایران، مدیریت منابع آب و پیش‌بینی‌های آتی نقش مهمی در ارزیابی منابع موجود و سطوح تقاضا دارد (Zarghami et al., 2011; Solomon, 2007). اگرچه وزارت نیرو در دهه‌های گذشته احداث سدها را برای مقابله با مشکل کم آبی در دستور کار خود قرار داد ولی عدم توجه به نرخ بالای تبخیر در کشور

(متوسط تبخیر سالانه در ایران ۲۱۰۰ میلی‌متر است که سه برابر متوسط تبخیر جهانی است (Mozafari et al., 2019) باعث شده که هر ساله میلیاردها مترمکعب آب از مخازن بیش از ۶۰۰ سد موجود در کشور تبخیر شود. بر اساس مطالعه‌ای که بر روی ۷۲۴۲ مخزن بزرگ جهانی از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۶ صورت گرفته، مشخص شده است که سالانه حدود ۹۳۳/۸ کیلومتر مکعب آب از این مخازن بزرگ طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۶ تبخیر شده است که این میزان تلفات نزدیک به حدود ۷۳ درصد برداشت آب شهری در سال ۲۰۱۰ را تشکیل می‌دهد (Tian et al., 2022). همچنین توسعه بخش کشاورزی در کشور با احداث هزاران استخر ذخیره آب در اراضی باغی و زراعی همراه بوده است که میزان تبخیر از آن استخرها در مناطق گرمسیری به میلیون‌ها مترمکعب در سال می‌رسد به طوری که امروزه تبخیر از سطح مخازن سدها و استخرهای ذخیره آب کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تشکیل خشکسالی و کاهش ذخیره منابع آبی در کشور ما محسوب می‌شود. این پدیده سهم مهمی در اتلاف آب به‌ویژه در مناطق کویر مرکزی دارد.

از این‌رو کنترل شدت تبخیر از سطوح آبی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند کمک شایانی در حفظ و تأمین منابع آب مناطق گرمسیری با پتانسیل تبخیر بالا بنماید.

عوامل متعددی بر میزان تبخیر از سطح آب مؤثرند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

پتانسیل تبخیر: که خود بستگی به عواملی نظیر تابش خورشید، رطوبت نسبی، سرعت باد، دما، وسعت منطقه‌ی تبخیر، فشار هوا و ... دارد (Ganjiza-deh, 2013).

تابش خورشیدی: در اصل انرژی خورشیدی می‌باشد و با توجه به فصول مختلف، میزان ابرناکی آسمان و ... مقدار آن متفاوت است (Craig et al., 2005). پنمن سال ۱۹۴۸ فرمول ترکیبی آئروپنیمیک تابشی ارائه داد که تبخیر از سطح آب، روی خاک و روی سطوح با پوشش علفی را پیش‌بینی می‌کند. معادلات اساسی پنمن به‌عنوان روش استاندارد جهت کاربردهای مهندسی هیدرولوژی در تخمین تبخیر پتانسیل از سطح آب

تبخیر ناشی از تغییرات آب و هوایی می‌تواند تا حد زیادی بر پارامترهای هیدرولوژیکی مانند محتوای آب خاک و رواناب تأثیرگذار باشد (Donohue et al., 2007). بنابراین، بررسی اثرات پارامترهای مختلف هواشناسی بر نرخ تبخیر بینش‌هایی را در مورد شیوه‌های جدید مدیریت آب ارائه می‌دهد. علاوه بر این تبخیر عامل اساسی اتلاف منابع آب در مناطق گرم و خشک به حساب می‌آید. مخازن طبیعی منبع حیات آب خانگی و کشاورزی برای بسیاری از مناطق خشک کشور به حساب می‌آید. بر همین اساس بررسی نرخ تبخیر از این مخازن تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی می‌تواند کمک شایانی به شناخت این پدیده و مقابله با آن نماید (Bazzi et al., 2021). با شناخت دقیق پارامترهای مؤثر بر پدیده تبخیر و اثرات متقابل پارامترهای مختلف می‌توان در انتخاب روش‌های کاهش تبخیر مناسب و افزایش کارایی آن‌ها تحت شرایط مختلف اقدامات مؤثرتری انجام داد. در این تحقیق به بررسی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی از قبیل درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان تابش و میانگین فشار بخار بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد آب با استفاده از تحلیل واریانس پرداخته شده است. از طریق شناخت دقیق تر پارامترهای مؤثر بر پدیده تبخیر و اثرات متقابل آن‌ها می‌توان در انتخاب روش‌های مناسب جهت کاهش تبخیر در مناطق مختلف استفاده نمود.

#### مواد و روش‌ها

در این مطالعه از اطلاعات ایستگاه هواشناسی اهواز در طول دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است. ایستگاه هواشناسی فرودگاه اهواز با عرض جغرافیایی ۳۲° ۳۱' و طول جغرافیایی ۴۸° ۶۶' در ارتفاع ۱۶ متری از سطح دریا قرار گرفته است. در این ایستگاه جهت اندازه‌گیری میزان تبخیر از تشت‌های تبخیر کلاس A استفاده می‌گردد. نمایی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه اهواز در شکل (۱) ارائه شده است.

برای مکان‌ها و شرایط اقلیمی متفاوت کاربرد زیادی دارد (Shuttleworth, 1993; Dingman, 2015).

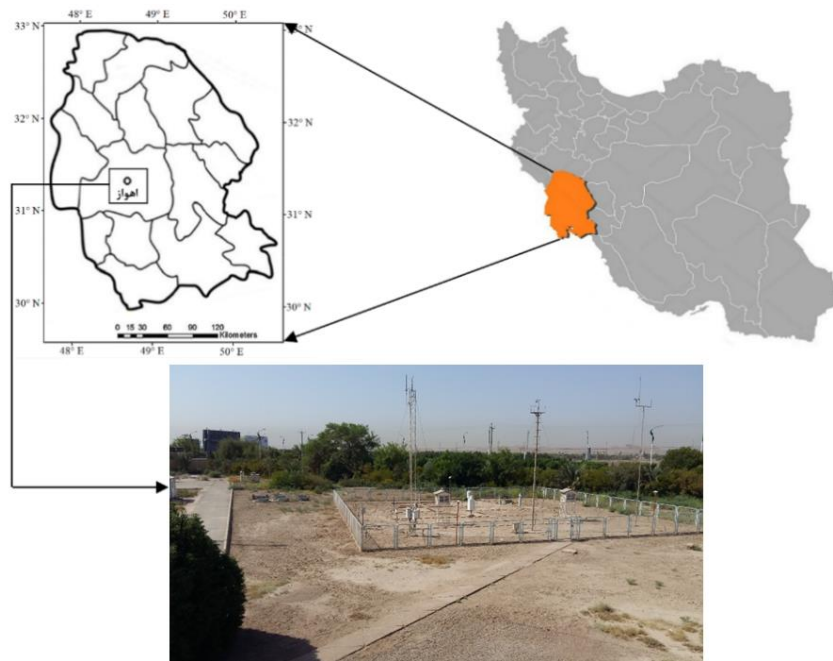
رطوبت نسبی: رطوبت نسبی، نسبت فشار بخار واقعی به فشار بخار اشباع است که بر حسب درصد بیان می‌شود. رطوبت نسبی با تغییر بخار هوا، یا تغییر دما تغییر می‌کند (Malek, 1991).

سرعت باد: باد عامل اصلی تبخیر محسوب نمی‌شود ولی با افزایش سرعت باد، جابجایی هوای اشباع زودتر رخ می‌دهد و این باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شود (Craig et al., 2005).

دما: موجب تشدید جنبش مولکولی آب شده و جنبش مولکولی آب موجب افزایش تبخیر می‌شود بنابراین ازدیاد دما باعث ازدیاد تبخیر می‌گردد.

وسعت منطقه‌ی تبخیر سطح: در مورد سطوح آزاد آب‌ها، میزان تبخیر در کناره‌های منبع آبی بیشتر از قسمت‌های مرکزی است زیرا در کناره‌ها انتشار عمودی و جانبی بخار آب سریع‌تر است. همچنین در مورد یک سطح تبخیر وقتی توده هوا به سمت مرکز سطح حرکت می‌کند به دلیل جذب رطوبت توان تبخیرش پایین می‌آید لذا مقدار تبخیر در قسمت‌های مرکزی کم می‌شود. از طرفی هرچقدر املاح درون آب بیشتر شود توان تبخیر کاهش پیدا می‌کند زیرا فشار بخار اشباع در مجاورت آب ناخالص کمتر از آب خالص است.

نرخ تبخیر به طور گسترده با استفاده از متغیرهای هواشناسی مانند تابش خالص، سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا فرموله شده است (Liu and Xia, 2012). در سال‌های اخیر، علی‌رغم افزایش دمای هوا، روند کاهشی در نرخ تبخیر در چندین منطقه از جهان گزارش شده است. این پدیده را پارادوکس تبخیر می‌نامند (Roderick and Farquhar, 2002). محققان این پدیده را به روش‌های مختلفی توصیف می‌کنند: کاهش تابش خورشیدی به دلیل افزایش پوشش ابر و غلظت آئروسول (Roderick and Farquhar, 2002)، کاهش سطح سرعت باد (Rayner, 2007) و غیره. تغییرات نرخ



شکل ۱. ایستگاه هواشناسی اهواز در استان خوزستان

Fig 1. Ahvaz meteorological station in Khuzestan province

تا حدودی از توزیع نرمال تبعیت کنند. بر این اساس از نمودار احتمال نرمال (probability-probability plot) P-P استفاده گردید. نتایج مربوط به نمودار احتمال P-P کلیه پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل (۲) ارائه شده است. علاوه بر این جهت انجام آزمون واریانس دوطرفه، متغیرهای مستقل می‌بایستی دارای مقیاس اسمی یا ترتیبی باشند. بر همین اساس کلیه پارامترهای هواشناسی به سه سطح بالا، متوسط و پایین تقسیم شدند. جهت این کار ابتدا پارامترهای مختلف هواشناسی بر اساس میانگین هر پارامتر اصلاح گردید. بدین گونه که میانگین هر پارامتر از تمامی داده‌های آن پارامتر کاسته شد. در چنین حالتی میانگین داده‌های آن پارامتر برابر با صفر خواهد شد. پس از آن با توجه به انحراف معیار (Sd) هر پارامتر، داده‌های آن پارامتر به سه قسمت تقسیم گردید (Karimzadeh et al., 2023). مقادیر کمتر از  $-1Sd$  به‌عنوان مقادیر کم (سطح ۱)، مقادیر بیشتر از  $+1Sd$  به‌عنوان مقادیر زیاد (سطح ۳) و مقادیر بین  $-1Sd$  و  $+1Sd$  به‌عنوان مقادیر بینابین (سطح ۲) در نظر گرفته شد. کلیه محاسبات در محیط SPSS انجام پذیرفت. مشخصات آماری پارامترهای مختلف هواشناسی در طول دوره مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است.

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، میانگین فشار بخار، سرعت باد، میزان تابش و تبخیر از تشت می‌باشد که به‌صورت روزانه در طول بازه ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ از ایستگاه هواشناسی به‌دست آمده است. مشخصات آماری پارامترهای مختلف هواشناسی در طول دوره‌ی مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول میزان تبخیر به صورت متوسط روزانه می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی معنی‌داری روندها از آزمون من-کندال<sup>۱</sup> در چهار سطح معنی‌داری  $0/001$ ،  $0/01$ ،  $0/05$  و  $0/1$  استفاده شد. جهت انجام آزمون من-کندال نیز از برنامه MAKESENS که توسط مؤسسه هواشناسی کشور فنلاند توسعه داده شده است، استفاده گردید (Salmi et al., 2002). علاوه بر این در این مطالعه از آنالیزهای واریانس یک‌طرفه و دوطرفه جهت مقایسه و بررسی تأثیر روش‌های کاهش تبخیر و پارامترهای مختلف هواشناسی استفاده گردید. در ابتدا جهت بررسی معنادار بودن تفاوت میان روش‌های مختلف کاهش تبخیر از آنالیز واریانس یک‌طرفه استفاده گردید و پس از آن جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر روی عملکرد روش‌های مختلف، از آنالیز واریانس دوطرفه استفاده شد. جهت استفاده از آنالیز واریانس می‌بایستی کلیه پارامترها

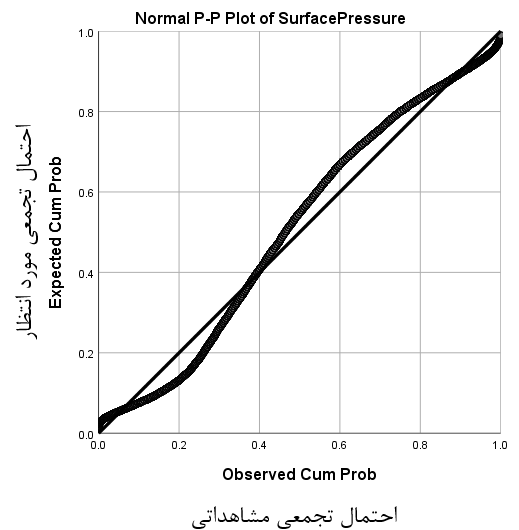
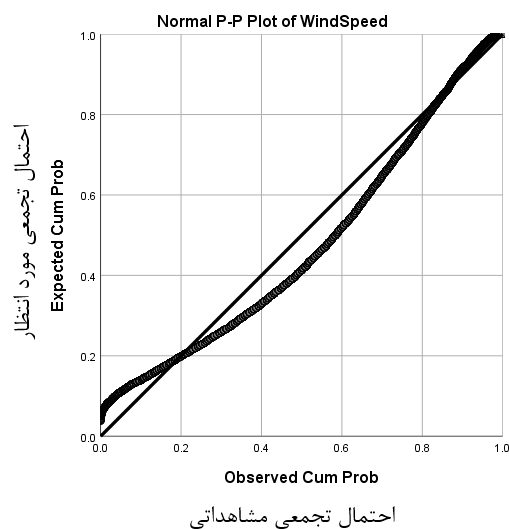
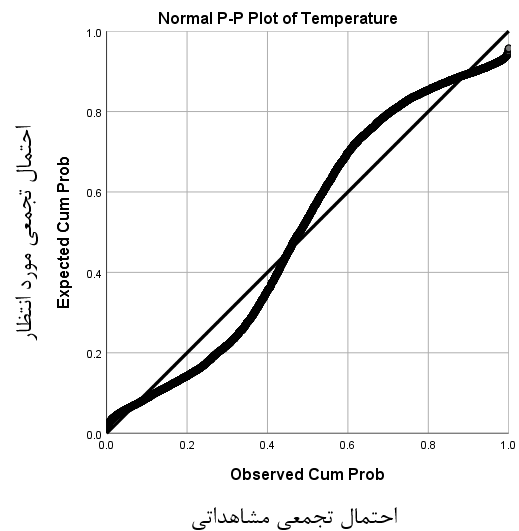
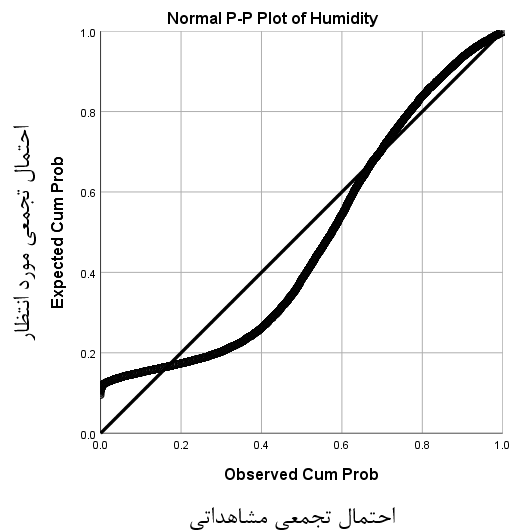
<sup>1</sup> Mann-Kendall test



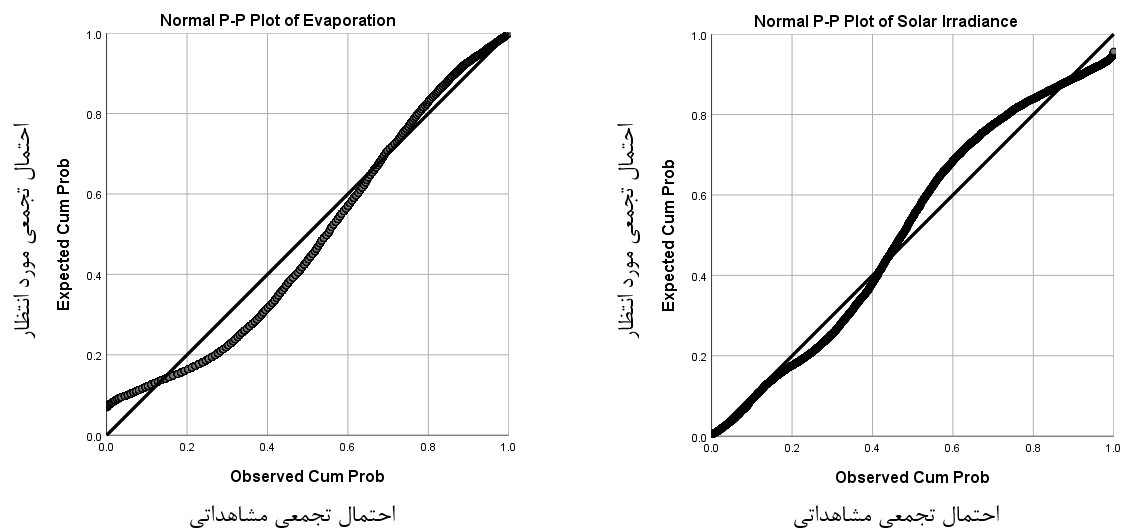
جدول ۱. مشخصات آماری پارامترهای مختلف هواشناسی در طول دوره مورد مطالعه

Table 1. Statistical characteristics of different meteorological parameters during the studied period

سطح ۳ Bond 3	سطح ۲ Bond 2	سطح ۱ Bond 1	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Average	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	
>36.9	16.4-36.9	<16.4	10.3	26.7	44.3	3.4	درجه حرارت Temperature (C)
>51.1	10.7-51.1	<10.7	20.2	30.9	94.62	4.4	درصد رطوبت نسبی Humidity (%)
>101.3	99.6-101.3	<99.6	0.8	100.5	102.42	98.6	میانگین فشار هوا (کیلو پاسکال) Surface Pressure (kPa)
>3.2	1.3-3.2	<1.3	0.9	2.2	8.33	0.6	سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind Speed (m/s)
>26.9	12.7-26.9	<12.7	7.1	19.8	32.03	0.5	میزان تابش (مگا ژول بر مترمربع در روز) Solar Irradiance (MJ/m <sup>2</sup> /day)







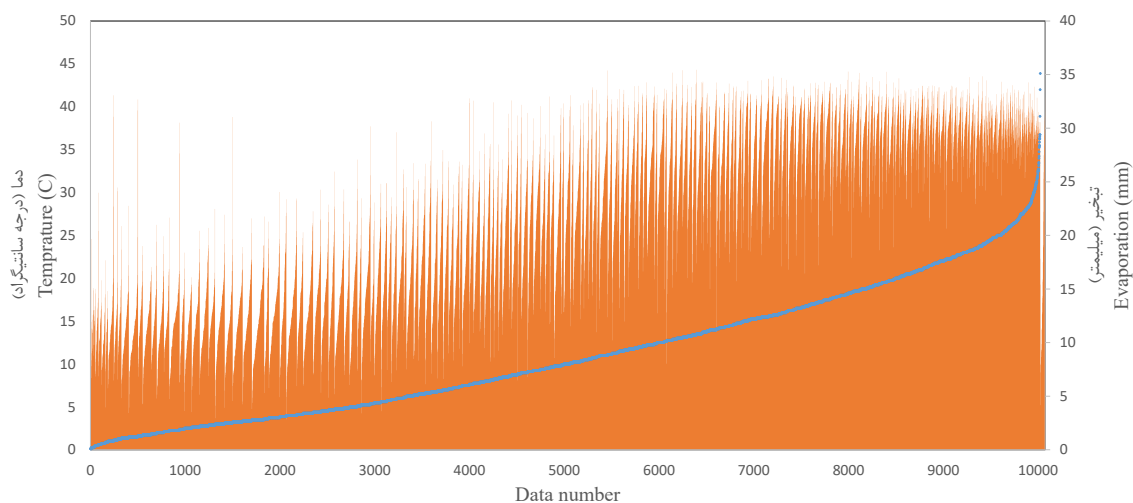
شکل ۲. نمودار توزیع احتمال P-P کلیه پارامترهای مورد استفاده

Fig 2. Probability-probability plot of all studied parameters

تبخیر از تشت می‌باشند. در شکل (۳) تغییرات دمای متوسط هوا در بازه‌ی آزمایش‌ها به‌صورت صعودی مرتب شده تا تأثیر این پارامتر بر میزان تبخیر واضح‌تر گردد. همین فرآیند برای کلیه‌ی پارامترهای هواشناسی صورت گرفته است. بر اساس شکل (۳)، با افزایش میزان تبخیر، درجه حرارت با توجه به آزمون من-کنندال در سطح اطمینان ۹۹/۹٪ روند صعودی داشته است. افزایش تبخیر با افزایش دما برای کلیه روزها مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد علاوه بر دمای هوا، دیگر پارامترهای هواشناسی نیز بر روند تبخیر مؤثر بوده که اثر آن‌ها نیز می‌بایستی در نظر گرفته شود.

### نتایج و بحث

از مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی مؤثر بر میزان تبخیر از سطح آب می‌توان به درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان تابش و میانگین فشار بخار اشاره نمود. تبخیر از سطح آزاد آب به شدت تحت تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بوده و با توجه به شرایط مختلف، میزان تبخیر از سطح آب نیز تغییر می‌نماید. در این قسمت جهت مشاهده تأثیر پارامترهای دمای هوا، سرعت باد، درصد رطوبت نسبی، فشار هوا در سطح زمین و میزان تابش بر میزان تبخیر، شکل‌های (۳) تا (۷) ارائه شده است. در تمامی شکل‌های (۳) تا (۷)، نقاط آبی مربوط به

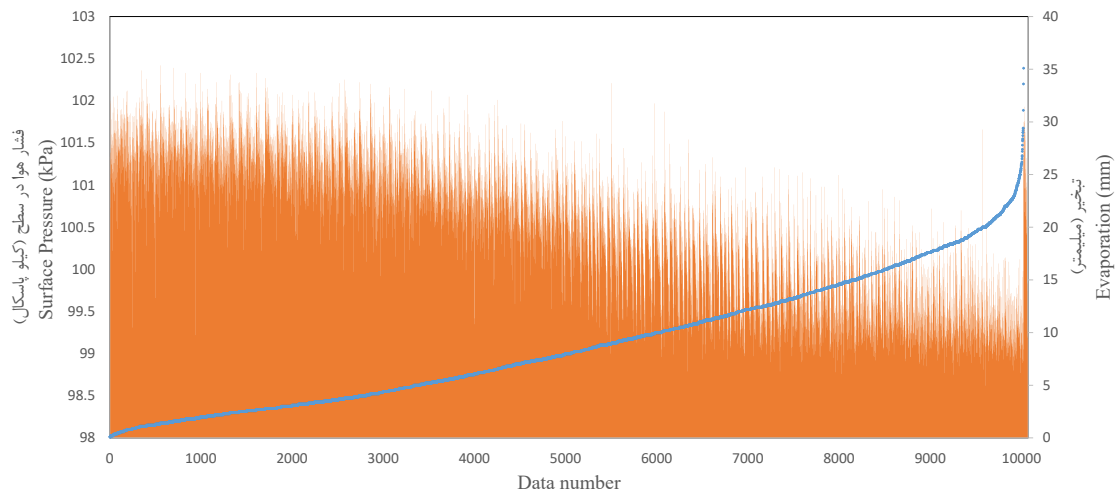


شکل ۳. تأثیر متوسط دمای هوا بر میزان تبخیر در بازه مورد مطالعه

Fig 3. The effect of mean air temperature on the rate of pan evaporation in the studied period

شکل و با توجه به آزمون من-کندال فشار هوا در سطح اطمینان ۹۹/۹٪ روند نزولی داشته است.

در شکل (۴) تأثیر میزان فشار هوا در سطح زمین بر میزان تبخیر نشان داده شده است. بر اساس این

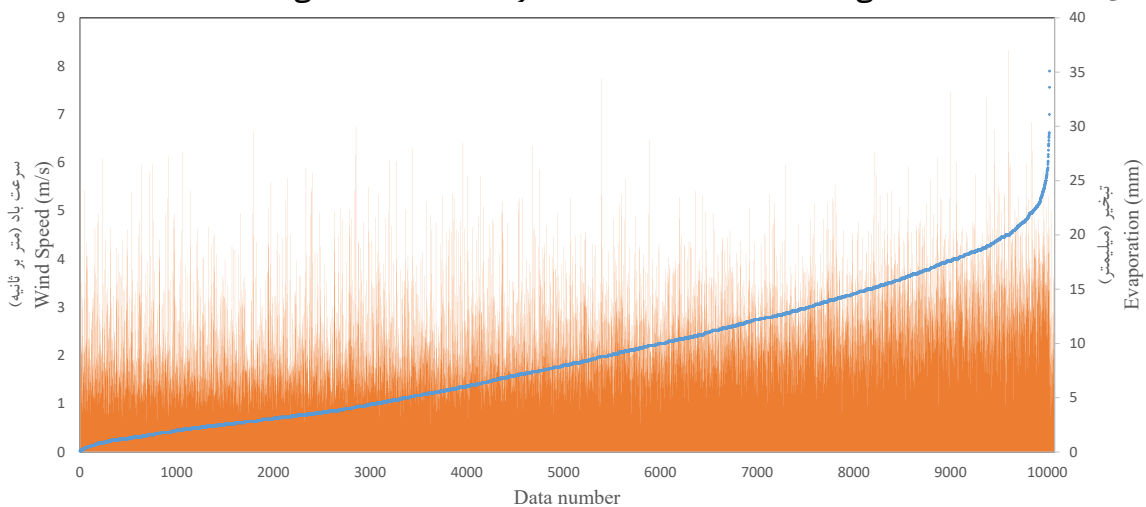


شکل ۴. تأثیر فشار هوا بر میزان تبخیر در بازه‌ی مورد مطالعه

Fig 4. The effect of air pressure on the rate of evaporation in the studied period

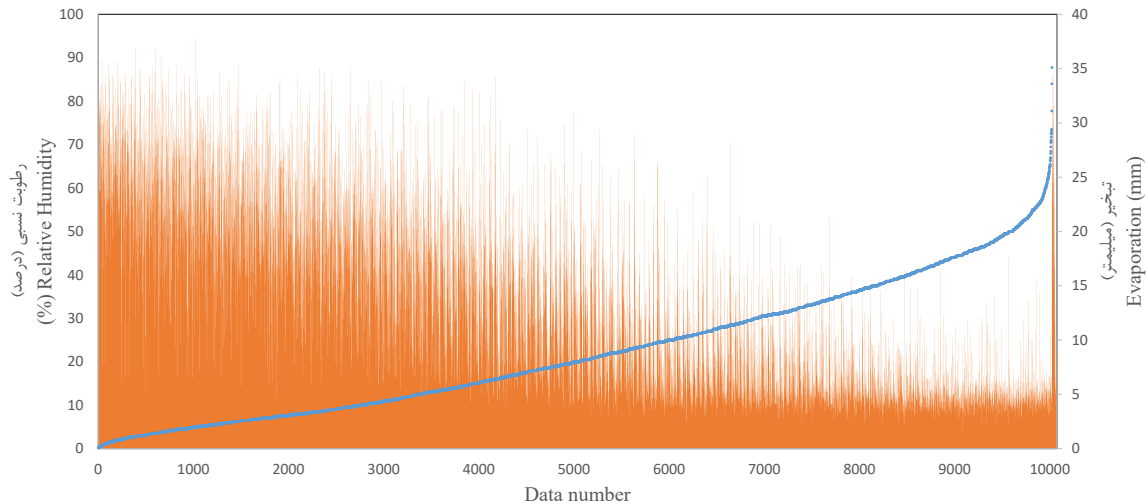
از جمله دیگر پارامترهای مؤثر بر میزان تبخیر از سطح آب، درصد رطوبت نسبی بوده که تأثیر این پارامتر بر میزان تبخیر در روزهای آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون من-کندال رطوبت نسبی در سطح اطمینان ۹۹/۹٪ دارای روند نزولی می‌باشد و رابطه‌ی معکوس میان درصد رطوبت نسبی و میزان تبخیر از سطح آب وجود دارد. بر اساس آمار مورد استفاده در بازه‌ی انجام آزمایش‌ها، درصد رطوبت نسبی در بیش از ۵۰ درصد اطلاعات مورد استفاده بین ۴۰ تا ۷۰ بوده که بر اساس استاندارد FAO، این مقادیر جزء رطوبت متوسط به حساب می‌آیند.

تأثیر سرعت باد بر میزان تبخیر در شکل (۵) ارائه شده است. در حالت کلی رابطه مستقیمی میان سرعت باد و میزان تبخیر از سطح آزاد آب وجود دارد و بر اساس آزمون من-کندال روند تغییرات سرعت باد در سطح اطمینان ۹۹٪ دارای روند صعودی می‌باشد. اکثر داده‌های سرعت باد کمتر از ۴ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است که بر اساس استاندارد FAO این بادهای جزء بادهای با سرعت ضعیف و متوسط تقسیم‌بندی می‌شوند. علاوه بر این بیش از نیمی از داده‌های اندازه‌گیری شده دارای سرعت باد کمتر از ۲ متر بر ثانیه بوده که بر اساس استاندارد FAO، جزء بادهای ضعیف به حساب می‌آیند.



شکل ۵. تأثیر سرعت باد بر میزان تبخیر در بازه‌ی مورد مطالعه

Fig 5. The effect of wind speed on the rate of evaporation in the studied period

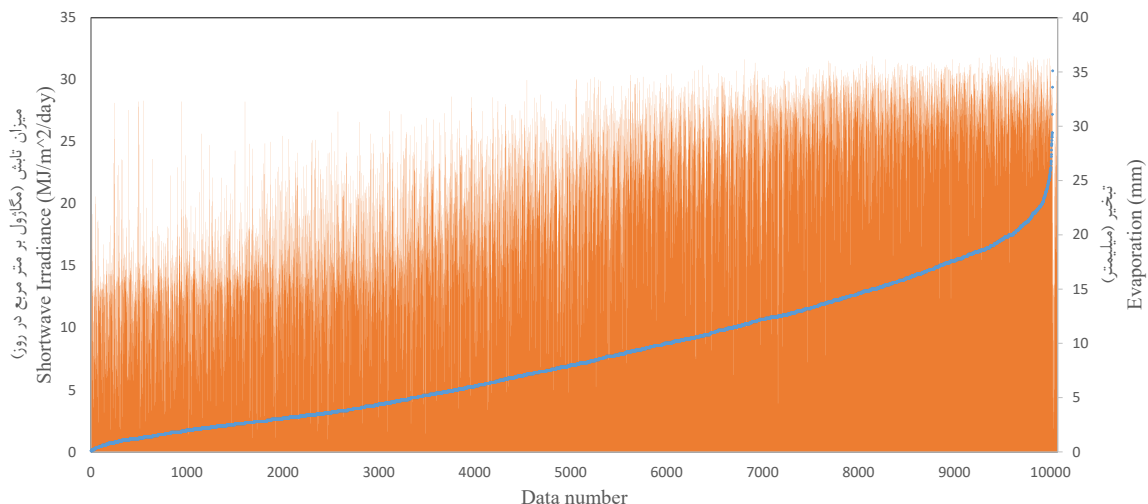


شکل ۶. تأثیر درصد رطوبت نسبی بر میزان تبخیر در بازه‌ی مورد مطالعه

Fig 6. The effect of relative humidity percentage on the rate of evaporation in the studied period

صعودی می‌باشد. این پارامتر نیز جزء پارامترهای مهم و مؤثر بر پدیده‌ی تبخیر به حساب می‌آید.

در شکل (۷) تأثیر میزان تابش بر میزان تبخیر ارائه شده است. بر اساس آزمون من-کندال روند تغییرات میزان تابش در سطح اطمینان ۹۹/۹٪ دارای روند



شکل ۷. تأثیر میزان تابش بر میزان تبخیر در بازه‌ی مورد مطالعه

Fig 7. The amount of radiation on the rate of evaporation in the studied period

اصلی پارامترهای مختلف بر میزان تبخیر با استفاده از آنالیز واریانس محاسبه گردید و پس از آن اثرات متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۲) اثرات اصلی پارامترهای درجه حرارت، رطوبت نسبی، فشار سطح، سرعت باد و میزان تابش بر تبخیر ارائه شده است.

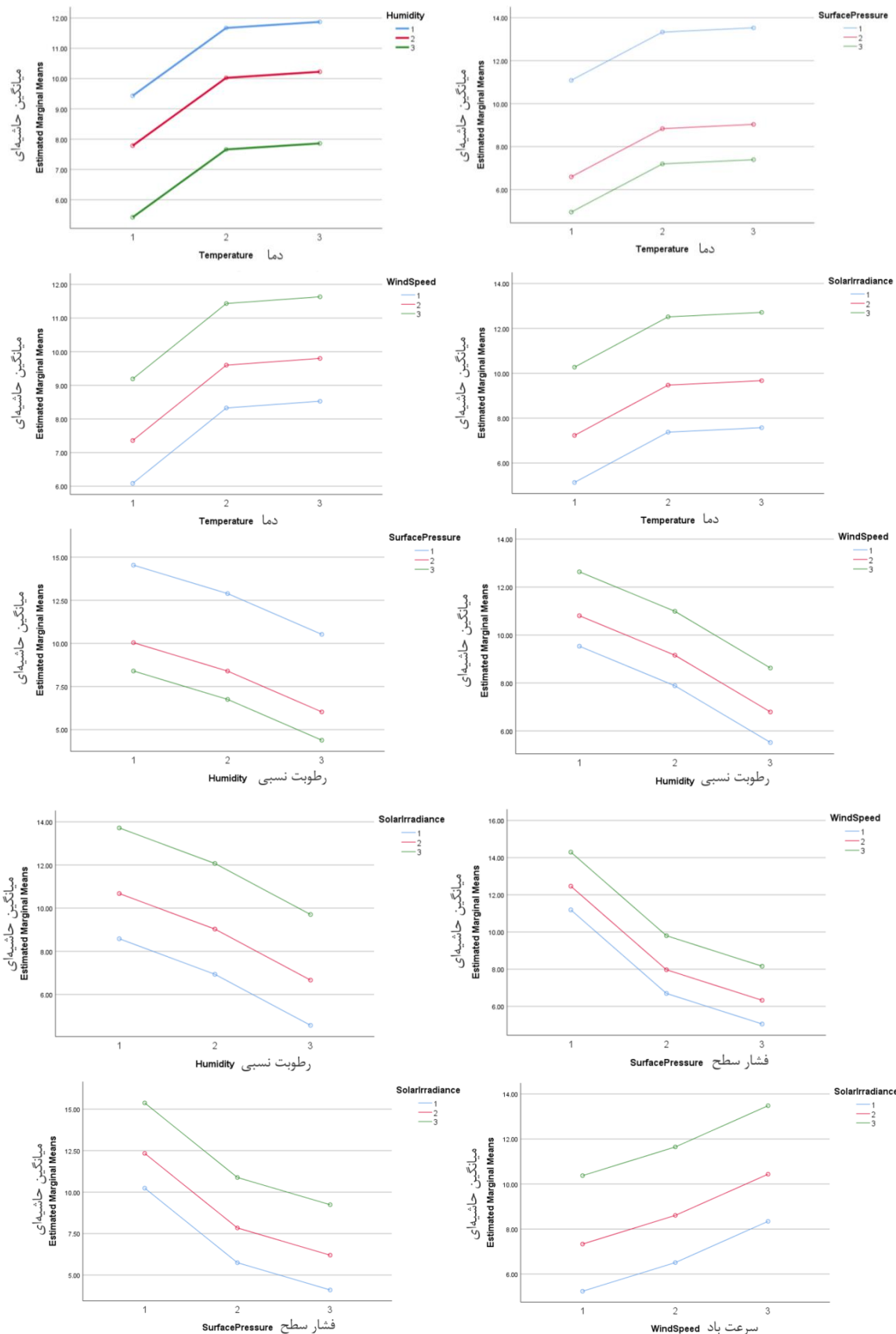
جهت بررسی دقیق‌تر اثر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب، از آنالیز واریانس استفاده گردید. با توجه به اینکه در کلیه نمودارهای احتمال ارائه شده در شکل (۲)، پراکندگی داده‌ها اکثراً در اطراف خط ۴۵ درجه قرار گرفته بودند می‌توان فرض نرمال بودن داده‌ها را صحیح در نظر گرفت. بر همین اساس در ابتدا تنها اثرات

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس دو طرفه بر اساس اثرات اصلی  
Table 2. Results of ANOVA based on the main effects

پارامتر مجذور اتا Partial Eta Squared	Sig.	F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	منبع Source
.036	.000	187.417	2095.521	2	درجه حرارت Temperature
.066	.000	355.883	3979.157	2	رطوبت نسبی Humidity
.122	.000	694.493	7765.179	2	فشار سطح Surface Pressure
.053	.000	278.462	3113.505	2	سرعت باد Wind Speed
.129	.000	738.144	8253.249	2	میزان تابش Solar Irradiance

سطوح مختلف پارامترهای هواشناسی مورد مطالعه بر میزان تبخیر می‌باشد که نشان می‌دهد مکانیسم انتخاب سطوح مختلف در پارامترهای مورد استفاده تا حدود زیادی درست بوده است. نمودار مربوط به درجه حرارت و رطوبت نسبی نشان می‌دهد که با افزایش دما از سطح ۱ (کمتر از ۱۶ درجه سانتی‌گراد) به سطح ۲ (بین ۱۶ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد)، میزان تبخیر افزایش چشمگیری داشته، با این حال با افزایش دما از سطح ۲ به سطح ۳ (بیشتر از ۳۷ درجه سانتی‌گراد)، میزان تبخیر رشد چندانی نداشته است. همین نکته در ارتباط با نمودار فشار سطح نیز مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که با افزایش فشار سطح از سطح ۱ (کمتر از ۹۹/۶ کیلو پاسکال) به سطح ۲ (بین ۹۹/۶ و ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال) میزان تبخیر افت چشمگیری داشته ولی افزایش فشار از سطح ۲ به سطح ۳ (بیشتر از ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال) تأثیر کمتری بر میزان تبخیر داشته است. در ارتباط با تأثیر سرعت باد بر میزان تبخیر مشاهده می‌شود که نرخ تبخیر با تغییر سرعت باد از سطح ۲ (بین ۱/۳ و ۳/۲ متر بر ثانیه) به سطح ۳ (بیشتر از ۳/۲ متر بر ثانیه) بیشتر از تغییر میان سطوح ۱ (کمتر از ۱/۳ متر بر ثانیه) و ۲ می‌باشد. در ارتباط با شدت تابش خورشیدی نیز اختلاف میان سطح ۲ و سطح ۳ (بیشتر از ۲۶/۹ مگا ژول بر مترمربع در روز) بیشتر از سطح ۱ (کمتر از ۱۲/۷ مگا ژول بر مترمربع در روز) و ۲ می‌باشد.

بر اساس تحلیل صورت گرفته کلیه پارامترهای مورد اشاره تأثیر معناداری بر میزان تبخیر داشته‌اند. نتایج آزمون بنفرونی که جهت مشاهده اثرات درون گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد که در کلیه پارامترهای هواشناسی اختلاف معناداری میان سطوح مختلف این پارامترها بر میزان تبخیر وجود دارد. ضریب تبیین محاسبه‌شده جهت اثرات اصلی برابر با ۰/۶۹ بوده که نشان می‌دهد، اثرات اصلی می‌توانند ۰/۶۹ واریانس خروجی را برآورد کنند. با توجه به اینکه در این قسمت تنها از اثرات اصلی استفاده شده است، پارامتر مجذور اتا می‌تواند درصد تأثیرگذاری هر پارامتر را بر روی خروجی نشان دهد. مجذور اتا یکی از معیارهای مربوط به اندازه‌گیری اثر بخصوص در جدول تحلیل واریانس و شیوه استنباطی آن است. از این مقدار برای تحلیل واریانس بین آزمودنی یا تحلیل واریانس یک طرفه یا تحلیل فاکتوریل استفاده می‌شود. همچنین بهره‌گیری از این شاخص در تحلیل واریانس آمیخته نیز میسر است. بر اساس این پارامتر حدود میزان تابش خورشیدی بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر دارد. فشار سطح و رطوبت نسبی هوا نیز در جایگاه بعدی قرار گرفته‌اند. در شکل (۸) تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب بر اساس میانگین‌های حاشیه‌ای نشان داده شده است. در این شکل‌ها از اثرات متقابل پارامترهای مختلف صرف‌نظر شده است. یکی از نکات مهم در این شکل‌ها اختلاف نسبتاً کم میان



شکل ۸. تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر با در نظر گرفتن اثرات اصلی

Fig 8. Effect of meteorological parameters on evaporation based on the main effects

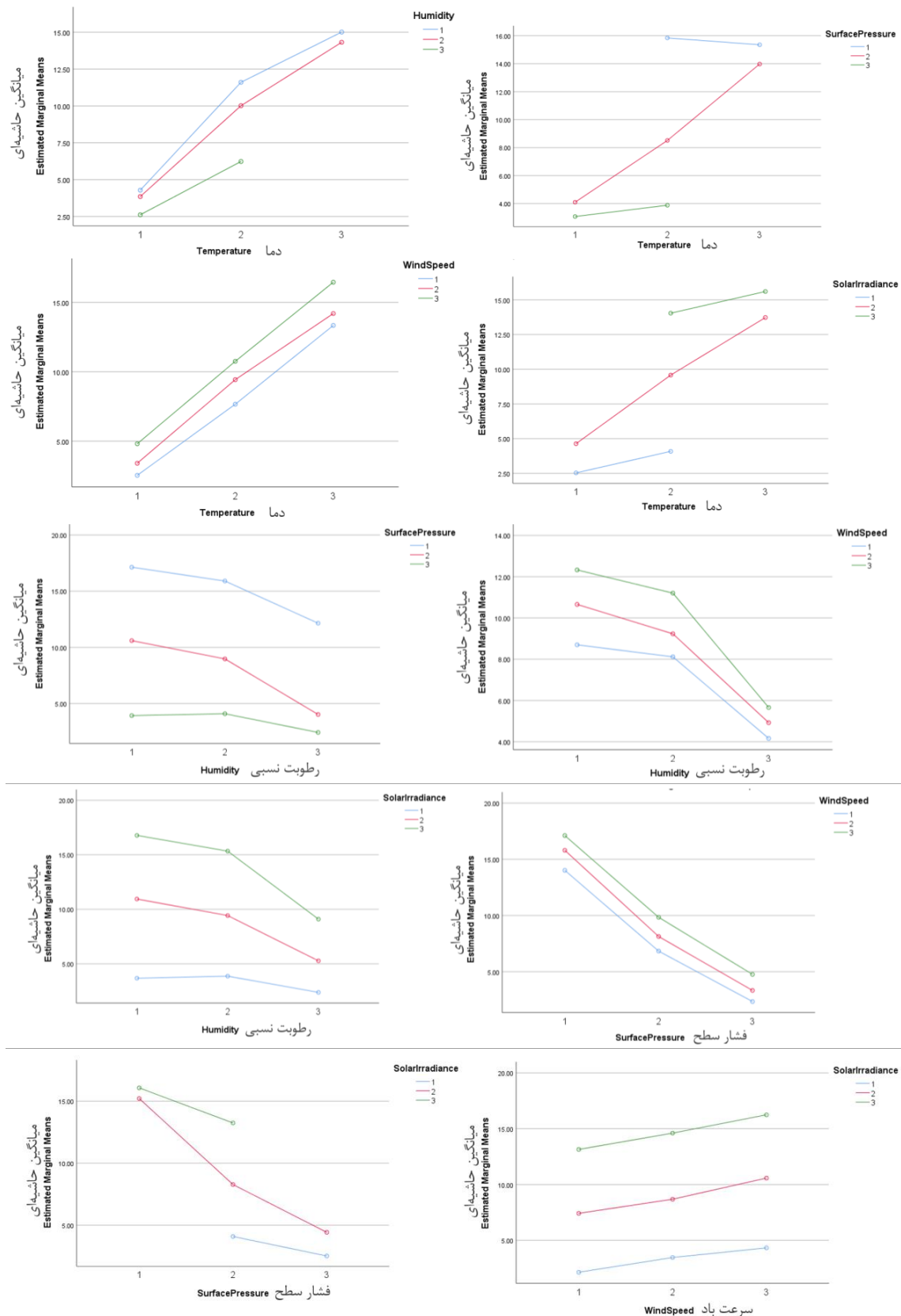
سانتی‌گراد باشد، رطوبت نسبی نمی‌تواند بالای ۵۱٪ باشد. در نمودار اثر متقابل درجه حرارت و رطوبت نسبی، با افزایش رطوبت نسبی از سطح ۲ به سطح ۳، افت محسوسی در میزان تبخیر مشاهده می‌شود که این تفاوت میان سطوح ۱ و ۲ قابل مشاهده نیست. مقایسه نمودار درجه حرارت و سرعت باد در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل نشان می‌دهد که اثرات متقابل باعث شده است که شیب تند میزان تبخیر بین سطح ۱ و ۲ در سطح ۳ نیز اتفاق افتد. به عبارتی اثر متقابل درجه حرارت و سرعت باد باعث شده است در سطح ۳ درجه حرارت، میزان تبخیر به شدت افزایش یابد. همین روند در مورد اثر متقابل دو پارامتر درجه حرارت و میزان تابش نیز مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن اثرات متقابل، تأثیر سرعت باد بر میزان تبخیر در مقادیر رطوبت نسبی بالا بسیار کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که تفاوت میان میزان تبخیر در رطوبت نسبی سطح ۳ به ازای کمترین و بیشترین سرعت باد کمتر از ۳ میلی‌متر می‌باشد. همین مسئله با شدت کمتر در مورد اثر متقابل رطوبت نسبی و میزان تابش نیز مشاهده می‌شود. در دیگر نمودارها، تفاوت محسوسی میان دو حالت مورد مقایسه مشاهده نمی‌شود.

در مرحله بعد از آنالیز واریانس دو طرفه جهت بررسی اثرات متقابل پارامترهای هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب استفاده شده است. نتایج تحلیل صورت گرفته در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، کلیه اثرات متقابل دارای تأثیر معنادار بر میزان تبخیر بوده و تنها اثر متقابل سرعت باد \* میزان تابش فاقد تفاوت معنادار می‌باشد. اثرات متقابل فشار سطح در درجه حرارت و میزان تابش بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر داشته و بعد از آن اثر متقابل درجه حرارت \* رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را داشته است. در شکل (۹) تأثیر متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب بر اساس میانگین‌های حاشیه‌ای ارائه شده داده است. در بعضی از نمودارها، گسستگی مشاهده می‌شود که بیانگر فقدان آن حالت در میان داده‌های مورد استفاده می‌باشد که با توجه به اینکه بازه بسیار طولانی از داده‌ها در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته شده است می‌توان نتیجه گرفت که احتمال اتفاق افتادن چنین حالت‌هایی نزدیک به صفر می‌باشد. به‌عنوان مثال در نمودار مربوط به اثر متقابل دما و رطوبت نسبی، سطح ۳ درجه حرارت و رطوبت نسبی فاقد داده می‌باشد و به عبارتی در حالتی که میانگین دما بالای ۳۷ درجه

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس دو طرفه بر اساس اثرات اصلی

Table 3. Results of two-way ANOVA based on interaction effects

پارامتر مجذور اتا	درجه آزادی	منبع			
Partial Eta Squared	Sig.	F	Mean Square	df	Source
.003	.000	6.760	64.784	4	رطوبت نسبی * میزان تابش Humidity * Solar Irradiance
.001	.009	3.388	32.464	4	رطوبت نسبی * فشار سطح Humidity * Surface Pressure
.008	.000	26.737	256.222	3	دما * رطوبت نسبی Temperature * Humidity
.002	.000	5.198	49.811	4	رطوبت نسبی * سرعت باد Humidity * Wind Speed
.010	.000	50.924	488.015	2	فشار سطح * میزان تابش Surface Pressure * Solar Irradiance
.003	.000	13.557	129.920	2	دما * میزان تابش Temperature * Solar Irradiance
.001	.016	3.047	29.200	4	سرعت باد * میزان تابش Wind Speed * Solar Irradiance
.032	.000	166.255	1593.254	2	دما * فشار سطح Temperature * Surface Pressure
.001	.010	3.298	31.602	4	فشار سطح * سرعت باد Surface Pressure * Wind Speed
.001	.008	3.445	33.012	4	دما * سرعت باد Temperature * Wind Speed



شکل ۹. تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر با در نظر گرفتن اثرات متقابل  
 Fig 9. Effect of meteorological parameters on evaporation based on the interaction effects



## نتیجه‌گیری

در این تحقیق از اطلاعات بلندمدت ایستگاه هواشناسی اهواز از قبیل درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان تابش و میانگین فشار بخار جهت بررسی تأثیر این پارامترها بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد استفاده شده است. جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب، از آنالیز واریانس استفاده گردید. بر همین اساس در ابتدا تنها اثرات اصلی پارامترهای مختلف بر میزان تبخیر با استفاده از آنالیز واریانس محاسبه گردید و پس از آن اثرات متقابل پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس تحلیل صورت گرفته کلیه پارامترهای مورد اشاره تأثیر معناداری بر میزان تبخیر داشته‌اند. ضریب تبیین محاسبه‌شده جهت اثرات اصلی، برابر با ۰/۶۹ بوده که نشان می‌دهد، اثرات اصلی می‌توانند ۰/۶۹ واریانس خروجی را برآورد کنند. نتایج آنالیز واریانس با در نظر گرفتن اثرات متقابل نشان داد که کلیه اثرات متقابل دارای تأثیر معنادار بر میزان تبخیر بوده و تنها اثر متقابل سرعت باد \* میزان تابش فاقد تفاوت معنادار می‌باشد. اثرات متقابل فشار سطح در درجه حرارت و میزان تابش بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر داشته و بعد از آن اثر متقابل درجه حرارت \* رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را داشته است. نمودار اثر متقابل درجه حرارت و رطوبت نسبی نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت نسبی از سطح ۲ به سطح ۳، افت محسوسی در میزان تبخیر مشاهده می‌شود که این تفاوت میان سطوح ۱ و ۲ دیده نمی‌شود. مقایسه تأثیر درجه حرارت و سرعت باد در دو حالت با در نظر گرفتن بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل نشان می‌دهد که اثرات متقابل باعث شده است که شیب تند میزان تبخیر بین سطح ۱ و ۲ در سطح ۳ نیز اتفاق افتد. به عبارتی اثر متقابل درجه حرارت و سرعت باد باعث شده است در سطح ۳ درجه حرارت، میزان تبخیر به شدت افزایش یابد. همین روند در مورد اثر متقابل دو پارامتر درجه حرارت و میزان تابش نیز مشاهده می‌شود. بررسی اثر متقابل میان میانگین فشار با درجه حرارت نشان می‌دهد که به ازای فشارهای

کمتر از ۹۹/۶ کیلو پاسکال، با افزایش درجه حرارت از سطح ۲ به سطح ۳، به جای افزایش تبخیر شاهد کاهش تبخیر هستیم که با نتایج رودریک و فارکوهار (۲۰۰۲) مطابقت دارد. با دانستن اثر پارامترهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آب و اثرات متقابل آن‌ها می‌توان جهت بررسی کارایی روش‌های مختلف کاهش تبخیر بهره برد.

## سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی سازمان جهاد دانشگاهی استان خوزستان در قالب پروژه تحقیقاتی به شماره ۱۶۲۴۶-۲۱۵۶۱۱ صورت پذیرفته است.

## منابع

- Bazzi, H., Ebrahimi, H., & Aminnejad, B. (2021). A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in Southern Iran using WEAP (Case study: Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1339-1352.
- Craig, I., Green, A., Scobie, M. & Schmidt, E. (2005). *Controlling Evaporation Loss from Water Storages*. NCEA publication, University of Southern Queensland, Australia.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology*. Waveland press.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2007). On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 983-995.
- Ganjizadeh, R. (2013). *Evaluating the amount of evaporation and transpiration using remote sensing and comparing it with the experimental method*. MSc dissertation, Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahvaz. [In Persian]
- Hashemi Garmdeh, A. & Eslamian, S. (2005). *Using covers to reduce evaporation from reservoirs*. 2nd National Conference on Watershed

- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., & Amnell, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates MAKESENS-The excel template application. Finish Meteorological Institute, Helsinki.
- Shuttleworth, W. J. (1993). Evaporation. Chapter 4 in: Handbook of Hydrology. DR Maidment (ed.) McGraw-Hill. Inc. New York.
- Solomon, S. (2007). Climate change the physical science basis. In AGU fall meeting abstracts (Vol. 2007, U43D-01).
- Tian, W., Liu, X., Wang, K., Bai, P., Liu, C., & Liang, X. (2022). Estimation of global reservoir evaporation losses. *Journal of Hydrology*, 607, 127524.
- Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y., & Kanani, R. (2011). Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global & Planetary Change*, 78(3-4), 137-146.
- Management and Water and Soil Resources Management. Kerman, Iran. [In Persian]
- Hooshmand, A., Salari-jazi, M., Bahrami, M., Zahiri, J., & Soleimani, S. (2013). Assessment of pan evaporation. Changes in South Western Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 8(16), 1449-1456.
- Irmak S., Haman, D. & Jons, J. (2002). Evaluation of Class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(3), 153-159.
- Liu, Q., & Xia, X. H. (2012). Contribution of meteorological variables to changes in potential evaporation in Haihe River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1836-1845.
- Madadi, M. R., Kouhestani, S., Jadavi, M., & Zakariayi, M. (2020). Performance Comparison of Two Types of Natural and Artificial Covers in Reducing Evaporation from Water Reservoirs: A Case Study (Jiroft). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(4), 1448-1459. [In Persian]
- Malek, A. (1991). Recognition and measurement of effective atmospheric structures in agriculture. (1st Edition). Shiraz University Publishing Center. [In Persian]
- Mozafari, A., Mansouri, B., & Chini, S.F. (2019). Effect of Wind Flow and Solar Radiation on Functionality of Water Evaporation Suppression Monolayers. *Water Resources Management*, 33(10), 3513-3522.
- Rayner, D.P. (2007). Wind run changes: the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia. *Journal of Climate*, 20(14), 3379-3394.
- Roderick, M.L. & Farquhar, G.D. (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298(5597), 1410-1411.

